

TUES  
1503  
A79/e  
2002  
Ej. 2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



“ELABORACIÓN DE UN MANUAL PARA LA SELECCIÓN DE  
VARIABLES DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN SÓLIDA”

PRESENTADO POR:

JUAN CARLOS ARTIGA DOMÍNGUEZ  
LEONARDO MILETO HERNÁNDEZ GALDAMEZ  
DOUGLAS VLADIMIR MEZQUITA SALAZAR

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

15100768

5173



CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2002

*Recibido el 7 de Marzo 2002*

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA

:  
Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARÍA GENERAL :

Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO

:  
Ing. Álvaro Antonio Aguilar Orantes

SECRETARIO

:  
Ing. Saúl Alfonso Granados

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR

:  
Ing. José Francisco Zuleta Morataya



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:  
INGENIERO MECÁNICO

Título :  
“ELABORACIÓN DE UN MANUAL PARA LA SELECCIÓN DE  
VARIABLES DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN SÓLIDA”

Presentado por :  
JUAN CARLOS ARTIGA DOMÍNGUEZ  
LEONARDO MILETO HERNÁNDEZ GALDAMEZ  
DOUGLAS VLADIMIR MEZQUITA SALAZAR

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Coordinador: :  
M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

Asesores :  
Ing. Saturnino Gámez Guadrón  
Ing. Rigoberto Velásquez Paz

San Salvador, marzo de 2002

Trabajo de Graduación Aprobado por:



Coordinador:

:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jonathan Antonio Berríos Ortiz'.

M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

Asesor

:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Saturnino Gámez Guadrón'.

Ing. Saturnino Gámez Guadrón

Asesor

:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rigoberto Velásquez Paz'.

Ing. Rigoberto Velásquez Paz

## AGRADECIMIENTOS

Extendemos nuestros agradecimientos al coordinador M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz y a los asesores Ing. Saturnino Gàmez Guadròn e Ing. Rigoberto Velásquez Paz, por su inmenso aporte para la realización de este trabajo de graduación; también a nuestros compañeros que nos colaboraron, a los compañeros de la unidad productiva, quienes nos ayudaron en gran medida en forma desinteresada.

Juan Carlos, Leonardo Mileto y  
Douglas Vladimir

## DEDICATORIA

Este triunfo alcanzado lo dedico especialmente:

A DIOS TODO PODEROSO: Por darme la sabiduría y las fuerzas necesarias para alcanzar los objetivos propuestos.

A MIS PADRES: Roberto Mezquita y Blanca Aracely de Mezquita, que con tanto esfuerzo y sacrificio me brindaron su apoyo y amor en cada momento a lo largo de mi carrera para alcanzar mi más anhelado sueño.

A MIS HERMANOS: Roberto Waldemar, Xiomara y Andrea, por haber creído en mí y por estar siempre a mi lado dándome su comprensión, así como también a mis primos y demás familia que estuvieron con mí y que forman parte de este logro alcanzado.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS: A mis compañeros de tesis por comprenderme y por mantenerse firmes en propósitos durante el desarrollo de esta tesis, a mis demás compañeros quienes de una u otra forma colaboraron sin interés alguno y son parte de este logro; también a los compañeros de la unidad productiva, quienes dieron su apoyo en forma desinteresada.

DOUGLAS MEZQUITA

## DEDICATORIA

Este triunfo logrado se lo dedico a:

DIOS TODO PODEROSO: Por haberme dado la vida, la sabiduría y permitirme culminar esta meta tan difícil e importante.

A MIS PADRES: Emilio Hernández Mira y Carmen Galdamez que con tanto sacrificio y esfuerzo me apoyaron y me dieron fuerzas y fortaleza en los momentos difíciles para poder culminar mi carrera.

A MIS HERMANOS: Emilio, Héctor y Jorge por haberme apoyado en todo momento.

A MI HIJO: Diego Emilio que con su nacimiento y presencia en mi hogar me dio fuerzas para culminar mi carrera.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS: Especialmente a mis amigos de tesis que me comprendieron y apoyaron y nunca se dieron por vencidos para cumplir esta meta, además a Edwin, Pepe, Gabriel, la SEIM, y a todos los que colaboraron para que fuese posible este triunfo. GRACIAS A TODOS.

LEONARDO MILETO HERNÁNDEZ

## DEDICATORIA

Este triunfo logrado se lo dedico de todo corazón a:

**DIOS TODO PODEROSO:** Por haberme iluminado con paciencia y sabiduría durante todo el desarrollo de mi trabajo.

**A MIS PADRES:** José Carlos y Ana Basilia por haberme apoyado en los momentos más difíciles de mi carrera, por haberme dado toda su comprensión y hacerme el camino menos difícil.

**A MIS HERMANOS:** Ana Marcela, Karla Lorena, Flor de María y José Carlos por haberme dado aliento cuando siempre lo necesité.

**A MIS SOBRINOS:** Luis, Alfredo, Emilio, Mercedes y a todas mis primas por haberme aguantado todos mis malos ratos gracias.

**A MIS ABUELOS:** María Pedrina, por haberme aconsejado siempre para que yo siguiera adelante y a Don Jesús que dios en gloria lo tenga por haberme guiado desde el cielo para que yo hiciera posibles este sueño.

**A LOS QUE YA NO ESTÁN:** A Guillermo Menjivar y toda su familia por haber sido como un padre para mí, quien en todo momento permaneció dándome aliento para seguir mi carrera, gracias donde quiera que estés.



A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS: A todos aquellos que hicieron posible este sueño, a todos los miembros de la SEIM especialmente a Edwin, Marvin, Efrain, Nelson Santos, Oscar Ayala, Elmer Cisneros, Julio Escalante, Alex Alfonso, Juan Carlos, Leonel, Misael y José Luis Sanabria y también a los compañeros de la unidad productiva especialmente a Julio Quintanilla, Simeón Navarrete, Sr. Peralta, Don Vásquez, Juan y al Licenciado por haberme apoyado incondicionalmente en todo momento quienes nunca me dejaron caer, gracias a todos.

JUAN CARLOS ARTIGA

# ÍNDICE

	Página
Introducción.....	i
CAPÍTULO I	
1.0 Marco Teórico.....	1
1.1 Diagrama hierro carburo de hierro.....	1
1.2 Criterios de selección entre cementación y temple superficial.....	12
1.3 Tratamientos termoquímicos.....	13
1.3.1 Cementación del acero.....	13
1.3.1.1 Tipos de cementación.....	15
1.3.1.2 Mecanismo fisico-químico de difusión del carbono en el proceso de cementación.....	25
1.3.1.3 Mecanismo de formación, estructuras y propiedades de la capa cementada.....	30
1.3.1.4 Características que deben cumplir los aceros para cementación .....	37
1.3.1.5 Selección de los aceros para cementación.....	45
1.3.1.6 Crecimiento del grano de los aceros en el proceso de cementación.....	46
1.3.1.7 Influencia de los elemento de aleación en los aceros para cementación.....	50
1.3.1.8 Características mecánicas de la capa cementada.....	56
1.3.1.9 Medición del espesor de la capa efectiva cementada.....	59
1.3.1.10 Tratamientos térmicos posteriores a la cementación.....	61
CAPÍTULO II.	
2.0 Procedimiento experimental.....	66
2.1 Diseño del proceso de cementación .....	66
2.1.1 Tipos de aceros.....	66
2.1.2 Distancia entre probetas.....	67
2.1.3 Descripción de las probetas.....	67
2.1.4 Tipos de mezclas.....	68
2.1.5 Tiempo de cementación.....	68
2.1.6 Determinación del numero de probetas.....	69

2.1.7 Diseño de caja para cementación.....	70
2.2 Realización de la cementación de prueba.....	72
2.2.1 Determinación del consumo de mezcla carburante.....	73
2.2.2 Calibración del horno.....	74
2.3 Realización de la cementación.....	77
2.3.1 Limpieza de probetas.....	77
2.3.2 preparación de mezclas.....	77
2.3.3 Distribución de probetas dentro de la caja.....	78
2.3.4 proceso post-cementación.....	78
2.4 Preparación de probetas para estudio metalografico.....	78
2.4.1 Marcado de probetas.....	78
2.4.2 Corte de probetas.....	79
2.4.3 Embutido.....	80
2.4.4 Pulido.....	81
2.4.5 Ataque químico.....	83
2.5 Medición de capa cementada.....	84
2.5.1 Patrones de comparación.....	85
2.6 Estudio metalografico.....	88
2.7 Resultados del acero AISI 1020.....	113
2.8 Resultados del acero AISI 3115.....	120
2.9 Ecuaciones características de cada curva.....	128
2.10 Análisis de resultados.....	129
CAPÍTULO III	
3.0 Manual del usuario.....	131
3.1 Indicaciones de cómo acceder a la información.....	131
Costos estimados del trabajo de graduación.....	143
Conclusiones.....	145
Recomendaciones.....	147
Bibliografía.....	148
Anexos	

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de los elementos de maquina están sometidos a condiciones críticas de funcionamiento, como condiciones de esfuerzos estáticos y/o dinámicos, desgaste, corrosión, etc. Todas estas condiciones generan un deterioro en la superficie de dichos elementos mecánicos, hasta llegar al punto de falla de estos. En la actualidad se utilizan diferentes procesos para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros, entre ellos están los tratamientos termoquímicos, mediante los cuales se enriquecen las capas superficiales de las piezas de acero con diferentes tipos de elementos (entre otros carbono y/o nitrógeno) para mejorar la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión, etc. Dentro de los tratamientos termoquímicos se pueden mencionar la nitruración cianuración, nitro cementación y cementación. Existen otros tratamientos superficiales para mejorar las propiedades del acero los cuales son: endurecimiento por inducción y por llama.

La cementación es el procedimiento mas antiguo que se utiliza para la saturación con carbono de la superficie de los aceros de bajo carbono y se hace con el fin de obtener mayor dureza y una buena resistencia al desgaste de la capa superficial, conservando al mismo tiempo el núcleo suave y tenaz. Según sea el tipo de material que se utilice en la cementación se distinguen tres tipos: líquida, gaseosa y sólida.

En este trabajo de graduación se diseñara y se realizara el tratamiento termoquímico de cementación sólida, bajo diferentes condiciones.

# CAPÍTULO I

## 1.0 MARCO TEORICO

### 1.1 DIAGRAMA HIERRO-CARBURO DE HIERRO

“El hierro es un constituyente fundamental de algunas de las más importantes aleaciones de ingeniería. En una forma casi pura, conocida como hierro dulce, se utiliza en alcantarillas, material para techos, en refrigeradores, estufas, lavadoras etc.

El hierro es un metal alotrópico lo cual significa que dependiendo de la temperatura puede existir en mas de un tipo de estructura reticular, tal como se representa en la figura 1.1.

Cuando el hierro solidifica a  $2800^{\circ}\text{F}$  está en la forma de estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc) conocido como hierro  $\delta$ . Al disminuir la temperatura a  $2554^{\circ}\text{F}$  ocurre un cambio de fase, y los átomos se acomodan por si mismos en la forma de hierro  $\gamma$ , el cual tiene una estructura cúbica centrada en la cara (fcc), conocido como austenita. Cuando la temperatura alcanza  $1666^{\circ}\text{F}$  ocurre otro cambio de fase a hierro  $\alpha$ , el cual tiene una estructura bcc conocido como ferrita. Todos los cambios alotrópicos ceden calor (reacción exotérmica) cuando el hierro se enfría y absorben calor (reacción endotérmica) cuando el mismo se calienta.

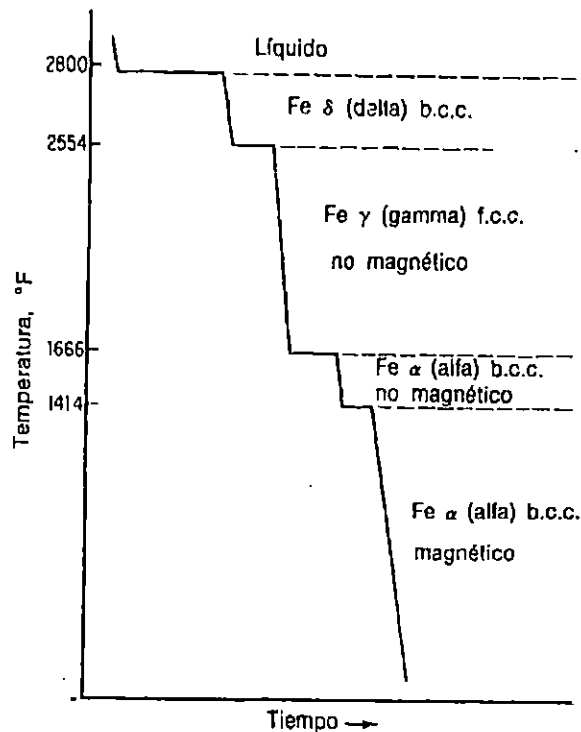
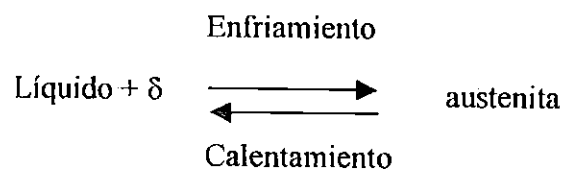


FIGURA 1.1 Curva de enfriamiento para hierro puro

La temperatura a la que ocurren los cambios alotrópicos en el hierro está influida por los elementos de aleación, de los cuales el más importante es el carbono. En la figura 1.2 se presenta la porción de interés del sistema de aleación hierro carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), que contiene 6.67% en peso de carbono. Por lo tanto, a esta porción se llama diagrama de equilibrio hierro- carburo de hierro. Antes de estudiar el diagrama presentado en la figura 1.2 es importante que se entienda que este no es un verdadero diagrama de equilibrio, pues equilibrio implica que no se produce cambio de fase con el transcurrir del tiempo; sin embargo, es un hecho que el compuesto carburo de hierro se descomponga en hierro y carbono (grafito), tomará un tiempo muy largo a temperatura ambiente y aun a  $1300^\circ\text{F}$  tarda varios años. Así, el carburo de hierro es una fase metaestable; por lo tanto el diagrama hierro-carburo de hierro, aunque técnicamente representa condiciones metaestables y puede considerarse como diagrama de equilibrio.

El diagrama presenta tres líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas. En la figura 1.2 las soluciones sólidas se han marcado con letras griegas; sin embargo es práctica común dar nombres especiales a la mayoría de las estructuras que aparecen en el diagrama. En la figura 1.2 se presenta en la esquina superior izquierda una región de solución sólida  $\delta$ , se debe reconocer la línea horizontal a  $2720^\circ\text{F}$  la cuál es una reacción peritética. La ecuación de la reacción peritética se escribe como:



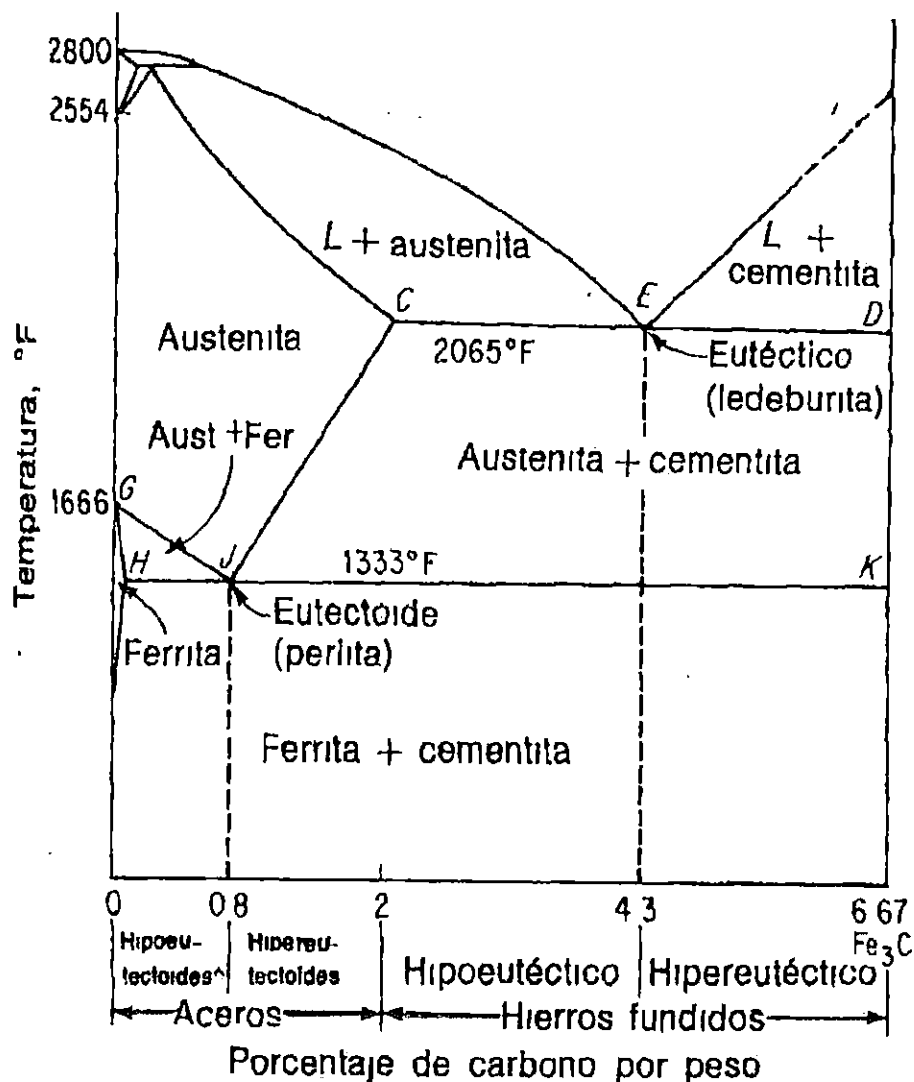
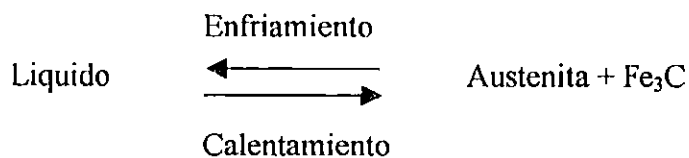


FIGURA 1.2. Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro

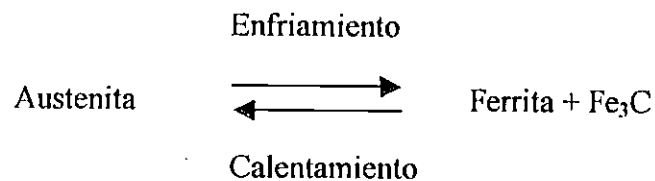
En la figura 1.2 el punto E representa el punto eutético el cuál se ubica a 2065 °F y a 4.3 % en peso de C, la línea horizontal CED representa la reacción eutética, y siempre que una aleación cruce esta línea, la reacción deberá ocurrir. Así cualquier líquido que esté presente cuando esta línea se alcanza debe ahora solidificar en una mezcla muy fina constituida por austenita y Fe<sub>3</sub>C. Esta mezcla eutética se llama ledeburita, y la ecuación se escribe como:





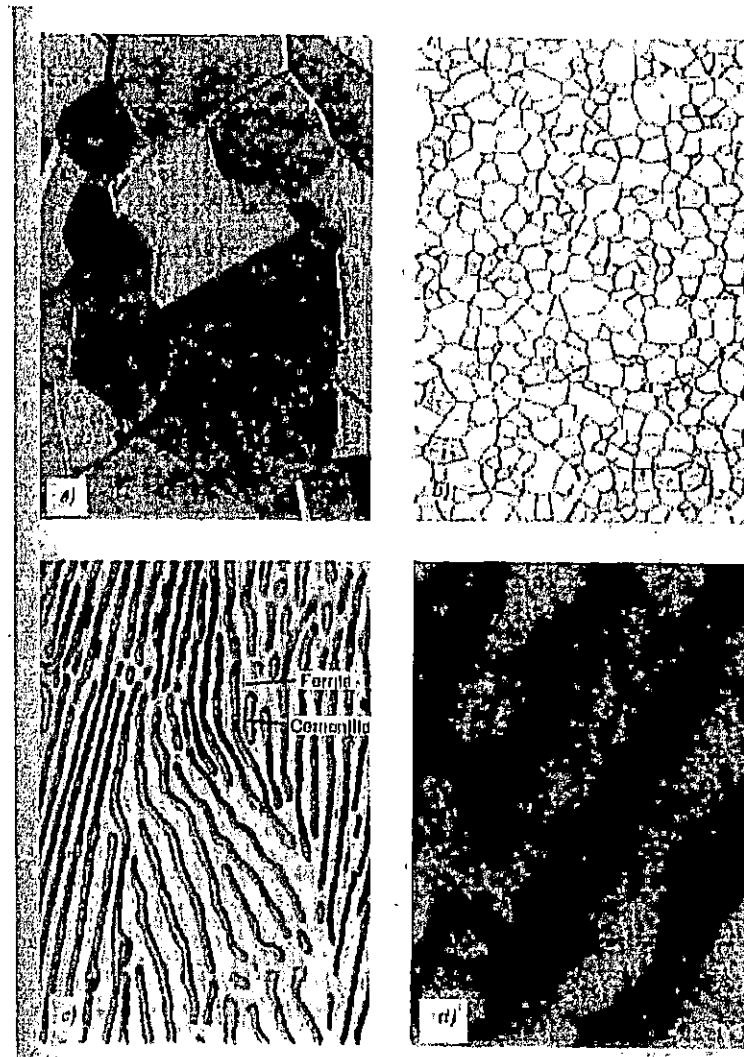
La mezcla eutéctica generalmente no se ve en la microestructura a temperatura ambiente, ya que la austenita es inestable a temperatura ambiente y debe sufrir otra reacción durante su enfriamiento.

Hay una pequeña área de solución sólida a la izquierda de la línea GH. Se sabe que a 1666°F se presenta el cambio en estructura cristalina de hierro puro  $\gamma$  a  $\alpha$ . Esa área es una solución sólida de una pequeña cantidad de carbono disuelto en Fe  $\alpha$  y se llama ferrita. El diagrama muestra una tercera línea horizontal HJK, que representa una reacción eutéctica. El punto eutéctico J está a 0.80% de C y a 1333°F. Así, la austenita presente se transforma en una muy fina mezcla eutéctica de ferrita y cementita llamada perlita. La ecuación se escribe como:



Si se toma como base el contenido de carbono, es práctica común dividir el diagrama hierro- carburo de hierro en dos partes. Aquellas aleaciones que contienen menos del 2% de C, se conocen como aceros y aquellas que contienen más del 2% de C se conocen como hierros fundidos. El intervalo que corresponde al acero se subdivide aun más en base al punto eutéctico, los aceros que contienen menos de 0.8% de C se llaman aceros hipoeutécticos, y los que contienen de 0.8% a 2.0% de C se llaman aceros hipereutécticos. El intervalo de hierro fundido también puede subdividirse por el punto eutéctico(4.3% de C), los hierros fundidos que contienen menos del 4.3% de C se conocen como hierros fundidos hipoeutécticos, en tanto que los que contienen mas del 4.3% de C se llaman hierros fundidos hipereutécticos” (AVNER, 1974).

## DEFINICIÓN DE ESTRUCTURAS



**FIGURA 1.3.** Diferentes estructuras cristalinas.

“El carburo de hierro o cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), contiene 6.67% en peso de C. Este es un compuesto intersticial duro y frágil de baja resistencia ténsil de  $\approx 5000 \text{ lb/pulg}^2$ , pero de alta resistencia a la compresión. Es la estructura más dura que aparece en el diagrama. Su estructura cristalina es ortorrómbica.

La austenita es el nombre dado a la solución sólida intersticial hierro  $\gamma$  fcc. La máxima solubilidad es del 2% de C a  $2065^\circ\text{F}$ . Las propiedades promedios son: resistencia ténsil de  $150000 \text{ lb/pulg}^2$ ; elongación 10% en 50.8 mm (2 pulg); dureza Rockwell C  $\approx 40$  y

tenacidad alta. Generalmente no es estable a la temperatura ambiente, bajo ciertas condiciones, es posible obtener austenita a la temperatura ambiente y su microestructura se presenta en la figura 1.3a.

La ledeburita es la mezcla eutéctica de austenita más cementita, contiene 4.3% de C y se forma a 2065°F.

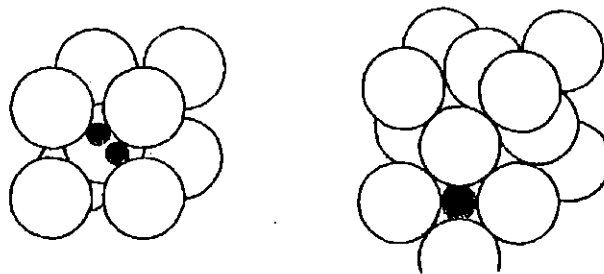
La ferrita es el nombre dado a la solución sólida  $\alpha$ . Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de C disuelto en hierro  $\alpha$  bcc (figura 1.3b). La máxima solubilidad es de 0.025% de C a 1333°F (punto H) y disuelve sólo 0.008% de C a temperatura ambiente. Es la estructura más suave que aparece en el diagrama. Las propiedades promedio son: resistencia ténsil: 40000 lb/pulg<sup>2</sup>, elongación, 40% en 2 pulg; dureza menor que la de Rockwell C o que la de Rockwell B 90.

La perlita es la mezcla eutectoide que contiene 0.80% de C (Punto J) y se forma a 1333°F durante un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita más Fe<sub>3</sub>C. La figura 1.3c muestra la mezcla fina tipo huella dactilar llamada perlita. La base o matriz ferrítica blanca que forma la mayoría de la mezcla eutectoide, contiene delgadas placas de cementita. La figura 1.3d muestra la misma estructura amplificada 17000 veces. Las propiedades promedio son: resistencia ténsil, 120000 lb/pulg<sup>2</sup>; elongación 20% en 50.8 mm (2 pulg); dureza Rockwell C 20, Rockwell B 95-100 o BHN 250-300” (AVNER, 1974).

#### *SOLUBILIDAD DEL CARBONO EN EL HIERRO*

“La austenita que es fcc con cuatro átomos por celda unitaria, representa un empaquetamiento de átomos mucho más denso que la ferrita, que es bcc con dos átomos por celda unitaria, esto se presenta por la expansión que tiene lugar cuando la austenita cambia a ferrita durante un enfriamiento lento. Si se supone que los átomos de hierro son esferas, es posible, de las dimensiones reticulares y suponiendo que la distancia de mayor aproximación es igual al diámetro atómico, calcular la cantidad de espacio vacío en ambas estructuras cristalinas. El cálculo presenta que el porcentaje de espacios sin llenar en la red fcc es del 25 % y en la red bcc es del 32%. Tanto en la austenita como en la ferrita, los átomos de carbono se disuelven intersticialmente. Dado lo anterior, podría parecer extraño

que la solubilidad de carbono en austenita es mucho mayor que en la ferrita. Este comportamiento aparentemente no común, se puede explicar al estudiar la figura 1.4. En la cuál el orificio más grande en la ferrita está a la mitad del centro de la cara y el espacio entre los dos átomos de las esquinas. Además en la figura 1.4 se presenta dos de las cuatro posibles posiciones para un átomo de carbono en la cara frontal de una estructura bcc. La mayor esfera intersticial que mejor se ajusta tiene un radio de  $0.36 \times 10^{-8}$  cm. El orificio mayor en austenita fcc está en la mitad del camino a lo largo de la orilla entre dos átomos colocados en esquinas. En la figura 1.4 se presenta la posible posición para un átomo de carbono en la cara frontal de una estructura fcc. La mayor esfera intersticial que se ajusta tiene un radio de  $\approx 0.52 \times 10^{-8}$  cm; por lo tanto la austenita tendrá mayor solubilidad de carbono que la ferrita; así, como el átomo de carbono tiene un radio de  $0.70 \times 10^{-8}$  cm, la máxima solubilidad será de 2% en peso de C y sólo el 10% de los orificios se llenan, la distorsión de la red ferrítica por el átomo de carbono es mucho mayor que en el caso de la austenita; por lo tanto, la solubilidad de carbono es más grande” (AVNER,; 1974).



**FIGURA 1.4.** Intersticios de las estructuras bcc (izquierda) y fcc (derecha)

#### *ENFRIAMIENTO LENTO DEL ACERO*

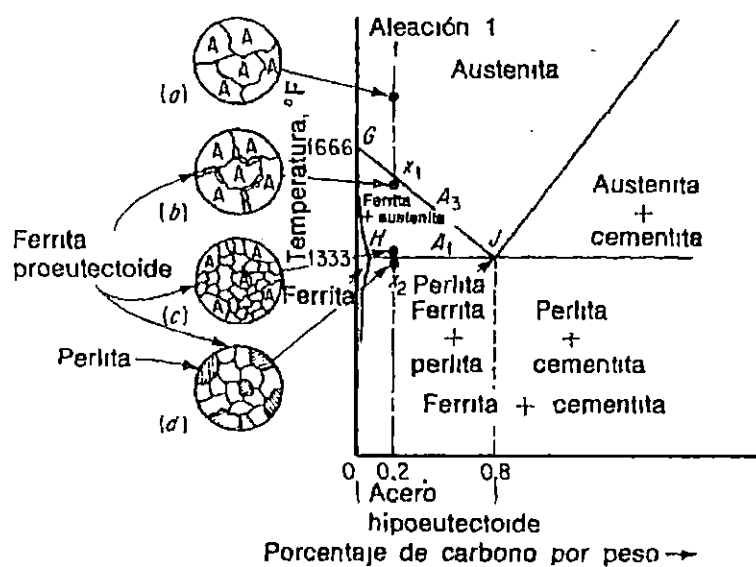
“En la figura 1.5 se presenta una aleación de acero hipoeutectoide que contiene 0.20% de carbono. En el intervalo de austenita, esta aleación consta de una sólo solución sólida intersticial uniforme. Cada grano contiene 0.20% de carbono disuelto en los espacios de la estructura reticular de hierro fcc (figura 1.5a). Al enfriarse lentamente no sucede nada hasta

que la línea GJ se cruza en el punto  $x_1$ . Esta línea se conoce como línea de temperatura crítica superior del lado hipoeutectoide y se designa como  $A_3$ .

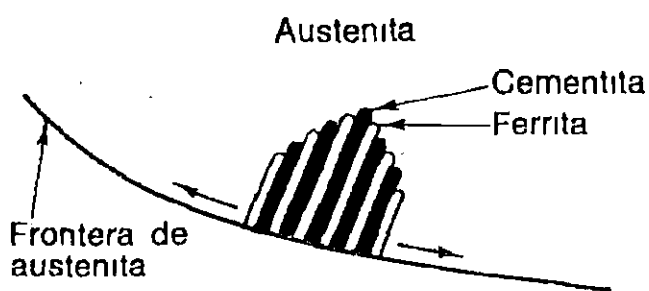
El cambio alotrópico del hierro fcc a hierro bcc tiene lugar a  $1666^\circ\text{F}$  para hierro puro y disminuye en temperatura con el aumento del contenido de carbono como lo muestra la línea  $A_3$ ; por tanto en  $x_1$ , la ferrita debe empezar a formarse en las fronteras de grano de la austenita (figura 1.5b). Como la ferrita puede disolver muy poco carbono, en aquellas áreas que cambian a ferrita, el carbono debe salir de la solución antes que los átomos se rearreglen por si mismos a bcc. El carbono que sale de solución es disuelto en la austenita restante, así que, conforme el enfriamiento avanza y la cantidad de ferrita aumenta, la austenita restante se hace más rica en carbono. Su contenido de carbono se mueve gradualmente hacia abajo y a la derecha a lo largo de la línea  $A_3$ . Finalmente, la línea HJ se alcanza en el punto  $x_2$ . Esta línea se conoce como línea de temperatura crítica inferior en el lado hipoeutectoide y se designa como  $A_1$ . La línea  $A_1$  es la de temperatura eutectoide y constituye la mínima temperatura a la que el hierro fcc puede existir bajo condiciones de equilibrio. Precisamente por arriba de la línea  $A_1$ , la microestructura consta de  $\approx 25\%$  de austenita y  $75\%$  de ferrita (figura 1.5c). Así, la austenita a la temperatura de la línea  $A_1$  que contiene  $0.8\%$  de carbono, experimenta la reacción eutectoide.

Nótese que la austenita cambia en la línea  $A_1$ ; por tanto, cuando la reacción se haya completado, la microestructura presentará  $\approx 25\%$  de perlita y  $75\%$  de ferrita (figura 1.5d).

La austenita cambia a ferrita y es una solución sólida intersticial en la que cada grano restante disuelve  $0.8\%$  de C en Fe fcc; sin embargo, la ferrita bcc disuelve muy poco carbono, de modo que el cambio en estructura cristalina no puede ocurrir hasta que los átomos de carbono salgan de la solución. Por lo tanto, el primer paso es precipitar los átomos de carbono para formar placas de cementita (carburo de hierro). En el área adyacente a la placa de cementita, el hierro pierde carbono y los átomos pueden ahora rearreglarse por si mismos para formar la ferrita bcc. De cada lado de la placa de cementita se forman delgadas capas de ferrita. El proceso continúa con la formación de capas alternas de cementita y ferrita para dar la fina mezcla tipo huella dactilar conocida como perlita. La reacción generalmente empieza en la frontera de grano de austenita, con la perlita creciendo a lo largo de la frontera y dentro del grano (véase la figura 1.6).



**FIGURA 1.5.** Representación esquemática de los cambios en la microestructura durante el enfriamiento lento de acero al 0.20% C. a) Austenita; b) Formación de granos de ferrita en la frontera de grano de austenita; c) Crecimiento de granos de ferrita; d) La austenita se transforma a perlita a 1333°F



**FIGURA 1.6.** Esquema de la formación y crecimiento de la perlita

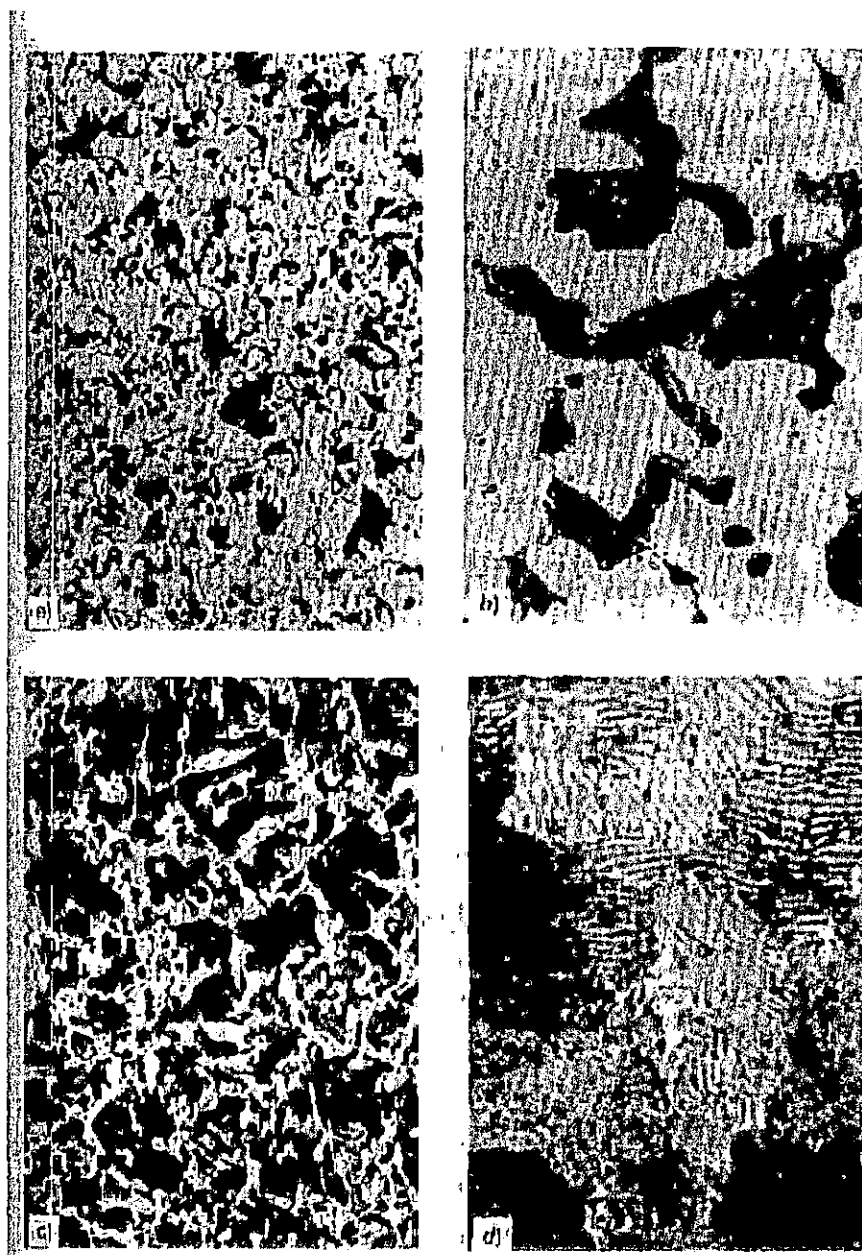
Como la ferrita y la perlita son estructuras estables a esta temperatura, la microestructura permanece hasta llegar a la temperatura ambiente y consta  $\approx 75\%$  de ferrita proeutectoide (formada entre las líneas  $A_3$  y  $A_1$ ) y  $25\%$  de perlita (formada de austenita en la línea  $A_1$ ). La figura 1.7 muestra la microestructura de un acero al  $0.2\%$  de C el cuál ha sido enfriado lentamente. Según lo previsto, consta de  $75\%$  de ferrita proeutectoide (áreas claras) y  $25\%$  de perlita (áreas oscuras).

Las áreas oscuras en esta microestructura no parecen ciertamente una mezcla, por lo que se supone que es perlita; Sin embargo, a una mayor amplificación (figura 1.7b) se revela la fina mezcla tipo huella dactilar de perlita.

Los cambios descritos son los mismos para cualquier acero hipoeutectoide. La única diferencia estaría en la relativa cantidad de ferrita y perlita. A mayor proximidad del contenido de carbono a la composición eutectoide ( $0.8\%$  de C), más perlita estará presente en la microestructura.

Las propiedades mecánicas de una aleación dependen de las propiedades de las fases y de la forma en que estas últimas estén ordenadas para formar la estructura.

La ferrita es relativamente suave, con baja resistencia a la tracción en tanto que la cementita es dura, con muy baja resistencia ténsil. La combinación de estas dos fases en forma de perlita produce una aleación de resistencia ténsil mucho mayor que la de cualquiera de las fases. Como la cantidad de perlita aumenta con un incremento en el contenido de carbono para aceros hipoeutectoides, la resistencia y la dureza Brinell también aumentarán hasta la composición eutectoide de  $0.80\%$  de carbono. La ductilidad, expresada por el porcentaje de elongación y reducción en área, y la resistencia al impacto disminuyen al aumentar el contenido de carbono. A valores mayores de la composición eutectoide, la resistencia se nivela y aun puede presentar un decremento, debido a la frágil red de cementita; sin embargo, la dureza Brinell continua aumentando, debido a la mayor cantidad de cementita” (AVNER, 1974).



**FIGURA 1.7.** Fotomicrografía de: a) Acero al 0.20% C, enfriado lentamente, 100x; b) Lo mismo que en a; pero a 500x; c) Acero al 0.40% C, enfriado lentamente, al 100x; d) Acero eutectoide ( 0.80% C), enfriado lentamente, 500x.



## 1.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN ENTRE LA CEMENTACIÓN Y EL TEMPLE SUPERFICIAL

“En primer lugar, para establecer un criterio de selección entre un proceso y otro, se debe puntualizar dos aspectos primordiales como el tecnológico y el económico, los cuales son muy importantes y no pueden analizarse por separado.

Tomando en cuenta el primer criterio de selección, los factores que contribuyen en la realización de un tratamiento correcto son:

- Templabilidad que, depende esencialmente de los elementos de aleación.
- Tamaño de grano, que deberá ser fino y regular entre 6 y 8 ASTM.
- Máxima dureza al temple, que depende del contenido de carbono
- Homogeneidad en la estructura del acero en estado de entrega antes del temple superficial, la estructura deberá ser ferrita-perlita, cuando se parte de aceros normalizados y martensita revenida cuando son previamente bonificados.
- Regularidad en su composición, principalmente que se mantenga el contenido de carbono y de los elementos de aleación dentro de límites predefinidos por la norma correspondiente.
- Ausencia de descarbonaciones, grietas y microgrietas superficiales. Esto se consigue, cuando se parte de barras de espesor sobre dimensionado. Así, algunos talleres han pretendido construir piezas partiendo de barras calibradas por estirado en frío, con el fin de eliminar operaciones de mecanizado, debiendo realizar al final un temple superficial. De este modo, en la superficie sometida a temple superficial persistirán y se propagarán las pequeñas grietas existentes en la barra, lo que conduce al fracaso.
- Impurezas, suciedad (inclusiones). Es esencial que el acero sea lo más limpio posible, ya que inclusiones no metálicas situadas en la zona templada superficialmente suelen producir grietas de temple.

Tecnológicamente hay dos aspectos desfavorable en los aceros que se utilizan para la fabricación de piezas a tratar por temple superficial, el medio de temple y su contenido de carbono (tabla 1.1), que se fija entre 0.37 y 0.50%, lo hace muy susceptible al agrietamiento, no siendo este el caso cuando se efectúa la cementación.

**TABLA 1.1.** Comparación entre los tipos de aceros de cementación y de temple superficial.

<b>a) Aceros para Cementación</b>						
<b>Tipo</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
F-1510	0.08/0.13	0.40/0.70	0.15/0.40	-	-	-
F-1523	0.18/0.23	0.60/0.90	0.15/0.40	-	0.30/0.50	0.40/0.50
F-1525	0.18/0.23	0.60/0.80	0.15/0.40	1.40/1.70	0.40/0.60	0.30/0.40
<b>b) Aceros de Resistencia para Temple Superficial</b>						
<b>Tipo</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
F-1140	0.4/0.5	0.5/0.80	0.15/0.40	-	-	-
F-1252	0.37/0.43	0.60/0.90	0.15/0.40	-	0.85/1.15	0.15/0.25
F-1282	0.37/0.43	0.50/0.80	0.15/0.40	0.70/1.00	0.60/0.90	0.15/0.0

### 1.3 TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

El tratamiento termoquímico o químicotérmico combina las acciones térmica y química con el fin de cambiar la composición química, estructura y cualidades de la capa superficial de un metal o una aleación. El tratamiento termoquímico se realiza como resultado de la saturación por difusión de un metal o una aleación con no metales (C, N, B y otros) o metales (Al, Cr, Zn, etc), en un medio activo saturante a una temperatura determinada.

Los tratamientos termoquímicos más utilizados son la cementación, nitrocementación y nitruración. A una escala menor se emplea la saturación superficial con Boro, Silicio y metales.

#### 1.3.1 CEMENTACIÓN DEL ACERO

Se denomina cementación o carburación al tratamiento termoquímico que consiste en la saturación por difusión de la capa superficial del acero con átomos de carbono calentándolo a una temperatura entre 900 y 950°C en un medio carburante. Las piezas cementadas adquieren las propiedades definitivas después del temple y del revenido a bajas temperaturas. La cementación y el tratamiento térmico posterior tienen como objetivo dar a la capa superficial una alta dureza, incrementar el límite de resistencia al desgaste y el límite de fatiga para carga flexionante, conservando dúctil el núcleo.

La cementación se emplea frecuentemente para endurecer ruedas dentadas de dimensiones medias, ejes de cajas de velocidades para automóviles, piezas de dirección, husillos y muchas otras piezas de máquinas. Las piezas se someten a la cementación después del mecanizado con un sobreespesor para el rectificado final definitivo hasta de 0.25 mm y con más frecuencia, con un sobreespesor para dicho rectificado final de 15 a 25  $\mu\text{m}$ . El sobre espesor para el rectificado no debe superar un 25 a 30% del grosor de la capa cementada. Algunas piezas son sometidas a la cementación después del mecanizado definitivo.

Así por ejemplo, los piñones de automóvil después de la cementación no se someten al rectificado de los dientes. En muchos casos la pieza sólo parcialmente se somete a la cementación y entonces las partes no sujetas a la cementación se protegen con una capa delgada de cobre (de 0.02 a 0.05 mm) que se deposita por procedimiento electrolítico o se aíslan con baños especiales que contienen polvo de cuarzo, bórax, talco, caolín o polvo de amianto diluidos con vidrio líquido.

Para asegurar la estabilidad dimensional y calidad superficial, se recomienda que las piezas sean lavadas antes de la cementación o nitro cementación con una solución de soda cáustica de uso industrial del 3 al 5%; introduciendo las piezas en un depósito para un baño de unos cinco minutos, luego se secan; todo el procedimiento deberá hacerse con guantes para evitar tocar las piezas con las manos y así no se contaminarán de nuevo.

Durante la cementación, al igual que cualquier otro caso de tratamiento termoquímico, tiene lugar la interacción entre el medio que lo rodea y la pieza a tratar y, se desarrolla así la difusión del carbono en la pieza. Las características de la transferencia de masa dentro de los medios sólidos, líquidos y gaseosos, así como las transformaciones físicas en el proceso de formación de la capa de transición, son parámetros de importancia de la cementación del acero. Después de la cementación y el tratamiento térmico posterior, para incrementar la resistencia a los esfuerzos de flexión y cortantes, se emplea el endurecimiento superficial por medio de granallado o por laminación. El endurecimiento superficial aumenta considerablemente la durabilidad del acero cementado.

La cementación es el proceso más antiguo de saturación de la superficie de los aceros con carbono y se aplica para obtener mayor dureza y alta resistencia al desgaste en la superficie, conservando el núcleo blando y tenaz.

La cementación del acero se realiza mediante la difusión del carbono a elevada temperatura y por periodos de tiempos prolongados, seguido de un tratamiento de temple y revenido. Las piezas a cementar tienen por lo general bajo contenido de carbono, ya que durante el temple a realizar después de la cementación, el núcleo no experimentará un considerable aumento de resistencia y conserva su ductilidad. Las temperaturas aplicadas actualmente oscilan alrededor de la línea  $A_{C3}$  de la figura 1.5 (Temperatura de transformación de la ferrita en Austenita en el calentamiento) o ligeramente por encima de esta, pero siempre son superiores a la línea  $A_{C1}$  de la figura 1.5 (temperatura de inicio de transformación de la Perlita en Austenita y comienzo de la transformación de Ferrita en Austenita en el calentamiento).

De lo anterior se puede decir que los resultados de la cementación dependen de los siguientes factores:

1. Composición del acero
2. Composición del medio carburante
3. Régimen de cementación (temperatura de calentamiento y tiempo de permanencia)
4. Tratamiento térmico posterior a la cementación

La cementación se desarrolla siempre, no por un carbono en estado molecular, sino por carbono en estado atómico, debido a que este último es el único capaz de difundir dentro de la red del hierro".(LAJTIN & ARZAMÁSOV, 1987)

### **1.3.1.1 TIPOS DE CEMENTACION**

En el proceso de cementación se utilizan diferentes medios carburantes para difundir el carbono en la capa superficial del acero, de acuerdo a lo anterior, la cementación puede clasificarse en tres tipos:

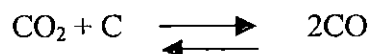
- a) Cementación sólida
- b) Cementación Líquida
- c) Cementación Gaseosa.

### a) CEMENTACIÓN CON CARBURANTES SÓLIDOS

Como cementantes sólidos se emplea principalmente el carbón vegetal seco de abedul o de roble en granos pequeños con la adición de un agente activador. A veces se utiliza también carbón de cuero cuyo efecto cementante es algo más intenso, debido a que en los aceros penetran átomos de carbono y nitrógeno. A los cementantes se les agregan los denominados agentes de activación cuya misión es la de acelerar el proceso. Entre los agentes activadores interesan principalmente los carbonatos y, el más utilizado, es el carbonato de Bario ( $\text{BaCO}_3$ ). El carbón vegetal se mezcla con el carbonato de Bario en una relación que corrientemente oscila entre 60:40 (60 partes de carbón vegetal) hasta 90:20. La mayor proporción de carbonato de Bario se emplea preferentemente cuando se tiene que alcanzar grandes profundidades de capa cementada. La acción del agente activador puede ser debido a su influencia en la formación de óxidos de carbono. Al comienzo del calentamiento o carburación los activadores, tales como carbonatos u óxidos, suministran, mediante su descomposición el óxido necesario para la formación del monóxido de carbono (CO).

En el proceso de cementación tiene gran importancia los porcentajes de los distintos compuestos gaseosos de carbono que existen en el medio que rodea al acero. Los gases procedentes de cementantes sólidos son principalmente monóxido de carbono (CO) y anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ). El primero actúa a altas temperaturas por cesión de carbono, que se difunde en el hierro, mientras que el anhídrido carbónico cede oxígeno que se combina con el carbono del acero, por lo que se descarburan la superficie. Con una determinada relación de óxido de carbono a anhídrido carbónico en el medio que rodea al acero se tiene un comportamiento neutro de los gases, es decir que no se produce carburación ni descarburación. La proporción de monóxido de carbono y anhídrido carbónico con la que se consigue este comportamiento neutro depende primeramente de la temperatura y luego del contenido en carbono del acero. Si el efecto sobre el acero entre el monóxido de carbono, el anhídrido carbónico y el carbón incandescente en la caja cerrada no se considera, se establece un equilibrio llamado Equilibrio de Boudouard que es función de la temperatura.

La reacción química se desarrolla como sigue:



Esto significa que existiendo gran porcentaje de  $\text{CO}_2$ , éste reacciona con el carbón incandescente y una parte de  $\text{CO}_2$  se transforma con el carbono en  $\text{CO}$ . Si se trabaja partiendo de las temperaturas comunes para la carburación resultan, los contenidos en  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  (ver tabla 1.2).

**TABLA 1.2.** Contenidos de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  en la fase gaseosa, en función de la temperatura con un cementante sólido (Sin considerar la cementación del acero).

TEMPERATURA	Contenidos aprox.	
	%CO	% $\text{CO}_2$
800°C	88	12
900°C	97	3
1000°C	99.96	0.04

Por la presencia del acero se tiende a formar un equilibrio entre la atmósfera gaseosa y el contenido de carbono del acero. En la tabla 1.3 se ilustran las condiciones de equilibrio en varios casos.

**TABLA 1.3.** Condición de equilibrio entre  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  y el contenido de carbono superficial del acero a dos temperaturas diferentes.

TEMPERATURA	Contenidos		
	%C del acero	%CO aprox.	% $\text{CO}_2$ aprox.
800°C	0.4	70	30
800 °C	1.2	88	12
900°C	0.4	92	8
900°C	1.2	96	4

Asumiendo que el equilibrio no se altera no son alterados por condiciones externas, como por ejemplo cambio de presiones, resulta de estas condiciones una relación entre el contenido de carbono de la superficie del acero y la atmósfera gaseosa. Así  $\approx 900^{\circ}\text{C}$  de temperatura puede existir un equilibrio entre este medio y un acero con  $\approx 1.2\%$  de carbono, en cuyo caso no tendrá lugar una carburación ni una descarburación; es decir, que no se produce ninguna reacción en absoluto. Aunque, si a esta temperatura se tratase un acero que contiene menos del  $1.2\%$  de carbono, se produciría entonces una carburación. En cambio, en un acero para herramientas conteniendo por ejemplo  $1.4\%$  de carbono, durante su tratamiento no tendrá lugar una carburación sino una descarburación, hasta que su superficie llegue a un contenido del  $1.2\%$  C. La influencia del contenido de CO y  $\text{CO}_2$  de los gases, la temperatura y el contenido de carbono del acero, se han presentado en la figura 1.8, en la que se indica con una curva a trazos en forma de S el equilibrio Boudouard; así, como los equilibrios de la atmósfera cementante con el contenido de carbono del acero (líneas continuas de la parte superior derecha del gráfico de la figura 1.10).

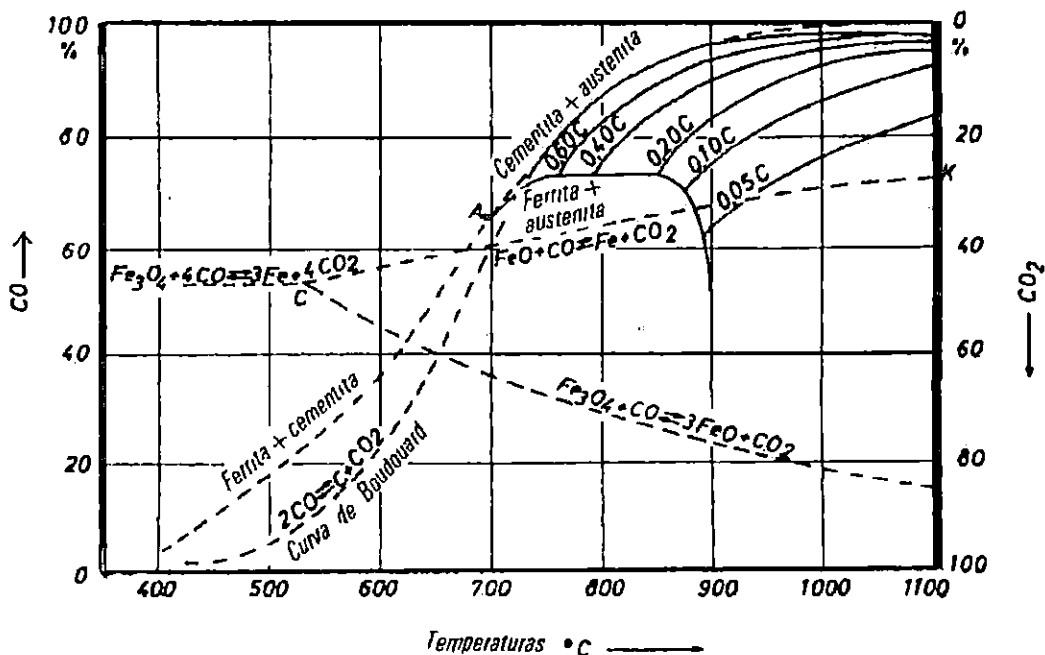


FIGURA 1. 8. Relación entre el contenido de CO de la atmósfera carburante, la temperatura y contenido de carbono del acero.

Con el ejemplo de un acero que contiene 0.1% de carbono se explicará el uso de este diagrama para una apreciación práctica de los procesos de cementación:

Un acero de cementación con 0.1% de carbono está, por ejemplo, a una temperatura de 900°C, en equilibrio con gas cementante que contiene un 75% de CO. Esto se desprende de la intersección de la línea de 0.10 %C con la línea de temperatura para 900 °C.

La altura del punto de intersección, medida en la ordenada, indica el contenido de CO (izquierda) y CO<sub>2</sub> (derecha). Si se aumenta, por ejemplo, hasta un 90% el contenido CO de los gases y a 900°C el acero admitirá hasta  $\approx 0.4\%$  de C (línea 0.4 de C). Con el mismo medio del horno la absorción de carbono por el acero deberá ser mayor a temperatura baja, y menor a una temperatura más alta. Así, a 800°C y 90% de CO en el medio, la absorción de carbono en la superficie de la pieza podrá aumentar, hasta 0.60% de C y a 820°C, hasta  $\approx 0.9\%$  de C.

En cambio, a una temperatura de 1060 °C, la absorción de carbono disminuye hasta un 0.1% de C; es decir, que a esta temperatura y con el medio del horno no se produce una cementación en un acero con 0.1% de C. Si se aumentase más la temperatura, descendería entonces el equilibrio hasta menos del 0.1% de C en el acero, es decir, el acero cede carbono y se descarburará. A medida que va disminuyendo el porcentaje de CO en el medio del horno, la descarburación se inicia a una temperatura sensiblemente baja. Así, con un 80% de CO, un acero con 0.1% de C se descarburará por encima de unos 940 °C.

La línea C-K (figura 1.8) representa la transición entre la descarburación y la oxidación. Esto significa que el acero que contiene 0.1% de C a 900°C, en el medio del horno con más de  $\approx 75\%$  de CO lo carbura, de CO hasta  $\approx 67\%$  (corte de la línea C-K con la línea de 900°C, ver figura 1.8) lo descarburará, y por debajo de aproximadamente el 67% de CO lo oxida.

Para la cementación es importante, en primer lugar la velocidad a la que el carbono es suministrado por el agente generador de carbono, y en segundo por lugar la velocidad a la que el carbono es transferido en el acero por difusión desde la superficie hasta el interior de la pieza. Si el suministro de carbono es muy alto (gran contenido de CO) y la velocidad de difusión en el acero es reducida, se produce, una alta concentración de carbono en la capa



superficial de la pieza y las transiciones en el contenido de carbono desde la superficie hasta el núcleo son bruscas.

Es deseable evitar concentraciones de carbono mayor a 0.86%C, porque se forma cementita libre en el acero. La cementita formada se deposita en los límites de grano, lo cual disminuye considerablemente la tenacidad de la capa superficial; por lo que, después de haber realizado el temple puede producirse un desprendimiento de la capa cementada delgada. Con pequeñas profundidades de cementación, décimas de milímetros y haciendo uso de los aceros corrientes bajos en carbono, no se puede contar normalmente con un incremento de contenido de carbono por encima de 0.86% de C, aunque se apliquen productos muy carburantes; es decir, que suministren rápidamente carbono esto se debe a que la superficie está saturada de carbono. Por otro lado, si se requiere una cementación de mayor profundidad, la velocidad de difusión del carbono en la superficie exterior es amortiguada por el hecho de que el gradiente de concentración disminuye hacia el interior de la pieza a causa del carbono absorbido. Se producen así fuertes concentraciones de carbono en la superficie exterior, lo cual es cementita. Hasta aproximadamente 1 mm de profundidad de cementación será siempre posible evitar contenidos de carbono por encima de 0.86%C. A mayores profundidades de cementación habrá que adoptar cementantes de efecto más suave. Aunque, a profundidades mayores de unos 3 mm, incluso empleando cementantes suaves, no habrá modo de impedir que se forme cementita en la capa superficial, prescindiendo de que apenas se emplean ya cementantes de acción suave, porque en este caso se necesitarían tiempos demasiado largos.

Los tiempos de cementación están condicionados principalmente por la temperatura de operación y, en menor medida, por el cementante. Con los polvos cementantes de carbón vegetal y carbonato de bario, para una profundidad de cementación de 1 mm y a  $\approx 900^\circ\text{C}$  de temperatura, se tiene que contar con una duración de 4 h. En la primera hora la zona cementada llegará a una profundidad de 0.35 mm, aumentando luego más despacio con el tiempo. Cuando se trata de grandes profundidades los tiempos aumentan considerablemente. Así, para 1.5 mm de profundidad de cementación el tiempo necesario es aproximadamente el doble que el que precisa para llegar a 1 mm. Así, junto al encarecimiento del proceso debido a los largos tiempos de operación debe tenerse presente

también el crecimiento del grano que aumenta con el tiempo, lo cual origina una reducción de la tenacidad. En vista del crecimiento de grano, que aumenta cada vez más con la temperatura, antes se aplicaban temperaturas de carburación relativamente bajas ( $830^{\circ}\text{C}$  a  $850^{\circ}\text{C}$ ). Pero los tiempos más largos que se requieren a bajas temperaturas conducen prácticamente a los mismos resultados respecto al tamaño de grano, que si se trabaja con temperaturas más altas y tiempos más cortos para obtener iguales profundidades de carburación. Dado que esto último reporta mayores economías, actualmente se trabaja normalmente a temperaturas superiores en el orden de  $900^{\circ}\text{C}$  a  $950^{\circ}\text{C}$ , y para mayores profundidades de cementación se llega incluso a  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Aparte de esto, la temperatura puede alterar la pendiente de la disminución de carbono en la zona de transición desde la capa superficial cementada hasta el núcleo de la pieza.

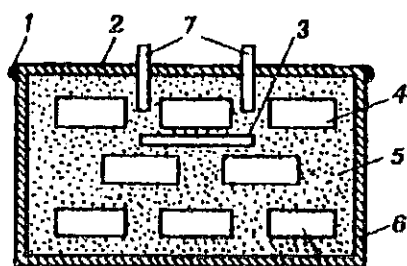
En cuanto la temperatura sea más alta y mayor sea la velocidad de difusión, más suave es el paso de contenido de carbono desde la superficie hasta el núcleo. De este modo, aplicando temperaturas de cementación más altas resultarán mucho más pequeñas las tensiones entre capas superficiales y núcleo durante el temple posterior. La indicación del tiempo, utilizando cementantes sólidos, se refiere corrientemente al tiempo de permanencia propiamente dicho durante el cuál las piezas están a la temperatura de cementación. Dado que los cementantes sólidos son muy malos conductores de calor y el material a cementar tiene que estar bien rodeado por los cementantes con el fin de evitar irregularidades se necesitan entonces tiempos de calentamientos largos hasta que las piezas lleguen verdaderamente a la temperatura necesaria.

#### *EJECUCIÓN DE LA CEMENTACIÓN CON CARBURANTE SÓLIDO*

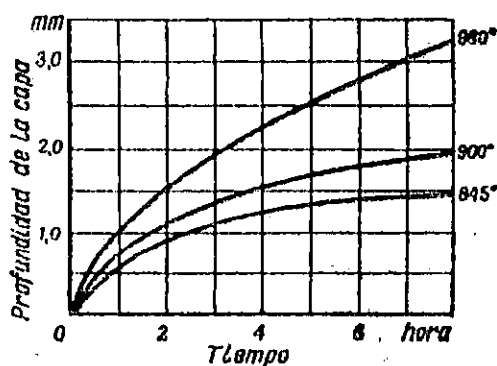
Los polvos cementantes tienen que estar bien secos, ya que si se emplean cementantes húmedos pueden producirse corrosión en las superficies de las piezas. En caso preciso habrá que calentar los cementantes al aire, por ejemplo en tambores de chapa dejando libre una pequeña abertura. El contenido de azufre de los cementantes debe ser lo más bajo posible. También, se tiene que procurar que el carbón vegetal no este en trozos demasiado grandes, pues cuanto menor es el tamaño de grano tanto mayor puede ser la superficie de reacción y mayor la velocidad a que se desarrolla. Dado que al calentar en cajas no se conoce la temperatura exacta a de la pieza y las reacciones empiezan antes de alcanzar las

temperaturas de carburación elegidas, es conveniente incorporar dos a tres muestras de alambre grueso del mismo grueso u otro de composición parecida en el centro de la caja, de tal modo de que los alambres puedan volver a sacarse durante la cementación. Estos alambres se retiran a distintos intervalos de tiempo, se enfrían bruscamente y se parten. A base de la muestra rota puede determinarse entonces la profundidad de cementación. Por medio de estas pruebas se puede conseguir con bastante exactitud la profundidad de temple deseada. El empaquetado de las piezas tiene que hacerse de manera que, por una parte, todas las piezas estén rodeadas de mezcla cementantes y entre ellas exista suficiente cantidad de mezcla y, por otra, las piezas y la mezcla tengan un descenso uniforme al consumirse el cementante. Para lograr mayores profundidades de cementación debe procurarse que exista la suficiente cantidad de agente cementante. Las partes de las piezas que no tienen que carburarse se cubrirán con una pasta o con barro. Sin embargo, para tener mayor protección contra la cementación (no tratándose de tiempos demasiado largos) es más ventajoso un recubrimiento de cobre. Después del empaquetado se coloca una tapa sobre las cajas de cementación y las juntas se cierran con barro.

En la figura 1.9a y 1.9b se muestra un esquema de empaquetado de piezas en la caja de cementación.



**FIGURA 1.9a.** Empaquetado de piezas en la caja de cementación  
1) Sello, 2) Tapadera de caja,  
3) Muestra de material, 4) Probetas,  
5) Mezcla carburante, 6) Caja,  
7) Probetas de muestra.



**FIGURA 1.9b.** Efecto de la temperatura y del tiempo de permanencia sobre la profundidad de cementación con carburante sólido (Carbón + 40% de  $BaCO_3$ ).

### b) CEMENTACIÓN CON CARBURANTES LÍQUIDOS

Debido a la alta temperatura necesaria para la difusión del carbono, se emplean como cementantes líquidos solamente sales fundidas de cianuro. No obstante, se pueden emplear a temperatura ambiente cementantes líquidos si sólo se calienta la pieza de acero (por ejemplo por inducción), sin embargo este procedimiento no ha tenido hasta ahora gran aceptación en la práctica. Los cianuros más corrientes son cianuro sódico y, en menor medida, el cianuro potásico. Sin embargo, los baños suelen contener además cloruros, por ejemplo de metales alcalinotérreos. Si los baños han de emplearse únicamente para la pequeña profundidad de cementación, se suele trabajar entonces con altos contenidos de cianuros. A mayores profundidades de carburación, y por lo tanto mayores tiempos, es conveniente contrarrestar la descomposición de las sales con mayores adiciones de cloruros.

**TABLA 1.4.** Profundidad de la capa cementada en función de la temperatura y tiempo en baño de cianuros (valores experimentales)

Temperaturas, °C	Tiempo, h	Profundidad de carburación, mm
840	1	0.25
	2	0.35
	4	0.46
	6	0.52
880	1	0.29
	2	0.40
	4	0.70
930	1	0.35
	2	0.67
	4	0.90

La cementación en baños de cianuros se efectúa por una descomposición del cianuro (cianuro sódico NaCN o cianuro potásico KCN) debida a la alta temperatura y la presencia del hierro, el carbono atómico que se libera penetra en el hierro. La velocidad de

cementación no se diferencia gran cosa de la de los cementantes sólidos, siempre que se trabaje a temperaturas de hasta 850°C. Pero, a temperaturas más altas, la velocidad de cementación en baños de sales será mayor que en los cementantes sólidos. La composición del baño es en todos los casos igual. En los valores experimentales señalados en la tabla 1.4 se ha calculado como tiempo de cementación, el tiempo desde el que las piezas ligeramente precalentadas, aproximadamente a 200°C, se introducen en el baño de sales, hasta que se sacan de éste.

Si se trabaja con baños de distintas composiciones, las profundidades de penetración pueden experimentar un cambio con respecto a los valores citados en la tabla 1.4. Por esta razón, en la misma tabla no se pretende mostrar más que la posible variación de las profundidades para penetración de diferentes temperaturas en función del tiempo de cementación.

### **c) CEMENTACIÓN CON CARBURANTES GASEOSOS**

Los gases que se desprenden de los cementantes en el curso de la cementación con medios sólidos, representan ya una cementación gaseosa. Por consiguiente, también pueden emplearse compuestos gaseosos de carbono, para llevar a cabo la cementación directamente. Con este fin suele emplearse gas natural o propano. Pero los gases de combustión normales, sobre todo el gas natural tan generalizado, requieren una preparación especial antes de poderlo destinar con éxito a operaciones de cementación.

Los hidrocarburos que existen en estos gases, por ejemplo metano  $\text{CH}_4$ , se disocian a alta temperatura y ceden carbono al hierro. Pero así se produce en parte una descomposición tan grande del metano que se precipita carbono en forma molecular y de hollín sobre el hierro, con lo que el gas carburante se mantiene apartado de la superficie del acero. El gas que se encuentra en estado descompuesto no puede ceder ya nada de carbono atómico al hierro. Por otra parte, el gas de alumbrado, al contrario del gas natural, contiene gran cantidad de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), el cual a altas temperaturas actúa con carácter descarburante. No obstante, el contenido de metano en los gases, tanto del natural como del procedente de fábrica, es reducido porque al incorporarle aire se descompone gran parte del metano existente y se oxida el carbono al estado de monóxido de carbono. Esto se hace en un

generador a unos 1000°C empleando níquel como catalizador. Después de pasar por el generador el gas contiene, además de pequeñas cantidades residuales de metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>). En el gas natural se tiene que disminuir también el contenido de anhídrido carbónico, lo cual se hace al circular el gas a través de una retorta llena de carbón vegetal y calentada a unos 1000°C; con ello, el anhídrido carbónico se reduce a monóxido de carbono. Con el fin de elevar y regular el efecto cementante, a estos gases portadores se les añaden pequeñas cantidades de hidrocarburos, por lo regular propano. En pequeños dispositivos de cementación se puede trabajar también directamente con propano y aire.

### 1.3.1.2 MECANISMO FISICOQUÍMICO DE TRANSFERENCIA DEL CARBONO EN EL PROCESO DE CEMENTACIÓN

“El carbono se disuelve en el hierro  $\alpha$  o  $\gamma$  sólo cuando su potencial químico  $\mu$  en el medio saturante es más alto que en el acero; es decir existe una diferencia de potencial  $\mu_{Fe}^C > 0$ .”

Al resolver los problemas tecnológicos surgen las preguntas:

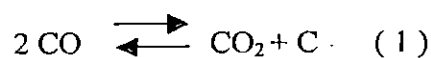
¿En qué dirección, en las condiciones indicadas, se produce la transferencia de masa o cual debe ser la composición del ambiente saturante para que la transferencia de masa se efectúe en dirección del ambiente saturante hacia el acero?

¿Hasta qué concentración crece el contenido de carbono en la superficie reactiva de saturación?

¿A qué velocidad transcurre el proceso de cementación?

Así, para dar respuestas a las preguntas relacionadas con la interacción entre la atmósfera saturante y la pieza a tratar, es preciso realizar el análisis de las reacciones posibles valiéndose de las leyes de la termodinámica y de la cinética química.

En el proceso de carburación del acero como fuente de carbono activo sirve el óxido de carbono. La interacción entre C y CO<sub>2</sub> se describe por la reacción.



la constante de equilibrio de esta reacción  $K_{eq}$  es igual a

$$K_{eq} = \frac{P_{CO_2} ac}{P_{CO}} \quad (2)$$

Donde  $P_{CO_2}$  y  $P_{CO}$  son las presiones parciales, respectivamente, para  $CO_2$  y  $CO$ ;  $ac$ , la actividad del carbono igual a 1 para la reacción (1).

En la figura 1.10 se presenta el diagrama de equilibrio para la reacción (1), del cual se deduce que con el aumento de la temperatura la relación entre  $CO$  y  $CO_2$  se desplaza en dirección del  $CO$ .

Como se ve de la ecuación de la reacción (1), en ella participa el carbono puro, cuya actividad es máxima e igual a la unidad.

La saturación del acero con carbono se produce a temperaturas correspondientes a la zona  $\gamma$ . Por lo tanto en la cementación también se debe considerar como participante de reacción la solución sólida de carbono en el hierro  $\gamma$  (austenita). Si el proceso transcurre en la zona de austenita  $Fe_\gamma(C)$  en el sistema  $Fe-Fe_3C$ , la reacción toma la forma:



La constante de equilibrio para este caso tendrá la forma:

$$K_{eq} = \frac{P_{CO} ac}{P_{CO_2}} \quad (4)$$

Donde  $ac$  es la actividad del carbono disuelto, que ya no es igual a la unidad. Por consiguiente, a temperaturas de cementación, cuando la difusión se realiza en la región de austenita, las condiciones de equilibrio de la reacción de cementación (3) se determinan no solo por la relación de las presiones parciales de los componentes que constituyen el medio ( $CO$  y  $CO_2$ ), sino que también por la actividad del carbono  $ac$  de acuerdo con la ecuación (4).

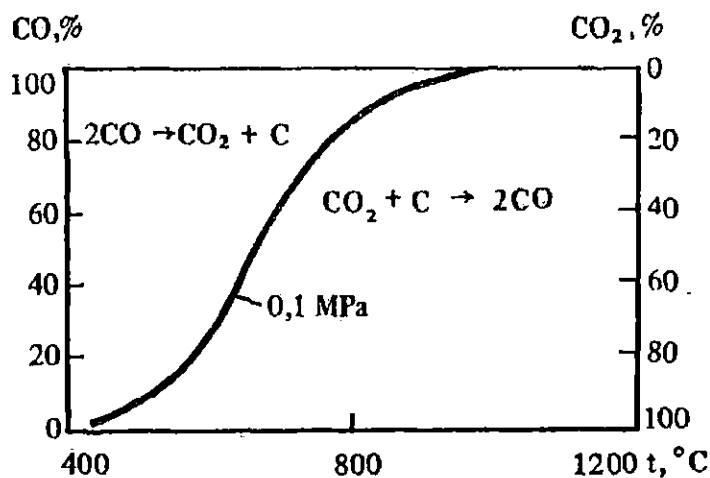
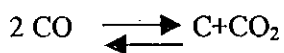


FIGURA 1.10. Diagrama de equilibrio para la reacción



Para determinar la actividad del carbono en la austenita se puede hacer uso de la siguiente ecuación:

$$\ln a_c = \text{Lg} \left( \frac{N_c}{1 - 5N_c} + 0.9N_c \right) + \frac{2105}{T} - 0.6735 \quad (5)$$

Donde  $N_c$  es la fracción del carbono y  $T$  es la temperatura en °K.

Como se observa en la figura 1.1, cuando más carbono hay en la austenita y más baja es la temperatura, tanto mayor es el valor de  $a_c$ .

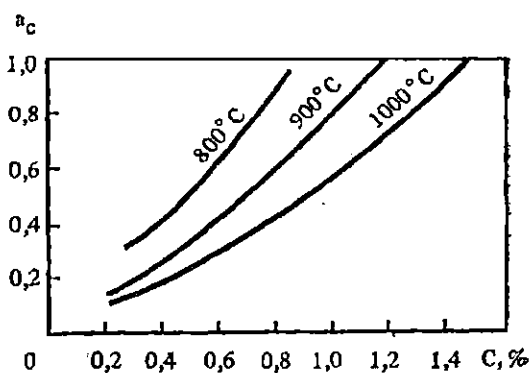


FIGURA 1.11 Dependencia entre la actividad  $a_c$  y la Temperatura y contenido de carbono en la austenita.



Cuando la línea de máxima solubilidad del carbono en la austenita alcanza la línea ES (fig. 1.2) en el sistema Fe- Fe<sub>3</sub>C, la magnitud de  $a_c = 1$ ; si  $a_c > 1$ , de la austenita precipita la cementita. Los datos citados permiten, en las condiciones de equilibrio, determinar las relaciones entre concentración de carbono en la austenita y la composición del ambiente saturante.

La acción carburante de la atmósfera durante la cementación se estima por el potencial de carbono  $\pi_c$ , el cual indica la concentración de carbono que puede ser alcanzada en la austenita, en un medio dado y a una temperatura determinada. El potencial de carbono es proporcional a su actividad  $a_c = K_{eq}\pi_c$ . La capacidad de cementación de la atmósfera también se caracteriza por la intensidad de carburación.

La medida de la intensidad de carburación es el coeficiente de transferencia de masa  $\beta$  (m/s). Sobre este coeficiente influye mucho la composición de la atmósfera carburante, en particular el hidrógeno, mientras que la temperatura ejerce un efecto relativamente pequeño.

La magnitud  $\beta$  en la mezcla CO-CO<sub>2</sub> no es grande ( $0.54 \times 10^{-9}$  m/s.), Pero aumenta considerablemente en el gas endotérmico ( $100-130 \times 10^{-9}$  m/s). Entre el coeficiente  $\beta$  y el producto  $P_{CO}P_{H_2}$ , existe una dependencia directa.

Los otros átomos de otros elementos diluidos en la austenita, debido al desarrollo de las interacciones interatómicas, ejercen influencia sobre  $a_c$ .

Según Wagner, la influencia de aleantes en la austenita sobre la actividad del elemento disuelto (C), puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$\ln \gamma_C^{\varepsilon^x} = \ln \gamma_C + N_3 \varepsilon_C^3 + \dots + N_n \varepsilon_C^n \quad (6)$$

Donde  $\gamma_C^{\varepsilon^x}$  es el coeficiente de actividad del elemento disuelto (carbono), debido a la influencia de los aleantes  $x_3, x_4, \dots, x_n$ ;  $N_3, N_4, \dots, N_n$  son las fracciones atómicas de los elementos aleantes;  $\varepsilon_C^x$  es el parámetro que refleja la interacción del elemento disuelto (carbono) con otros elementos aleantes, disueltos en la austenita:

$$\varepsilon_c^x = \left( \frac{\partial \ln \gamma_c}{\partial N_x} \right) \quad (7)$$

si los aceros de diversa composición se tratan en una atmósfera con una actividad determinada, entonces el contenido de carbono en la superficie será desigual. Los elementos aleantes disueltos ejercen influencia sobre la transferencia de masa (figura 1.12). En los aceros aleados con Ni, Si, Co, B y otros elementos, que incrementan el valor de  $a_c$  (figura 12), el contenido de carbono será inferior ( $c_1$ ) que en los aceros que contienen elementos formadores de carburos (Cr, Mo, W, Mn, Ti, V, etc.) y que disminuyen la actividad del carbono ( $c_3$ ).

Si hace falta obtener una concentración prefijada de carbono, entonces los aceros aleados con los elementos que influyen de modo diferente en la actividad del carbono, han de someterse a la cementación en un ambiente con diferente actividad.

Conforme a los principios considerados anteriormente del análisis termodinámico de las reacciones fundamentales que se desarrollan durante la cementación en la fase gaseosa y en la superficie de contacto gas-metal, se puede construir, un modelo matemático de cementación, teniendo en cuenta la ley cinética de las reacciones heterogéneas.

El modelo describe el proceso físico-químico de la cementación y establece los vínculos entre los parámetros tecnológicos del proceso (temperatura y composición de la atmósfera cementante) y la distribución de la concentración de carbono en el espesor de la capa cementada" (LAJTIN & ARZAMÁSOV, 1987).

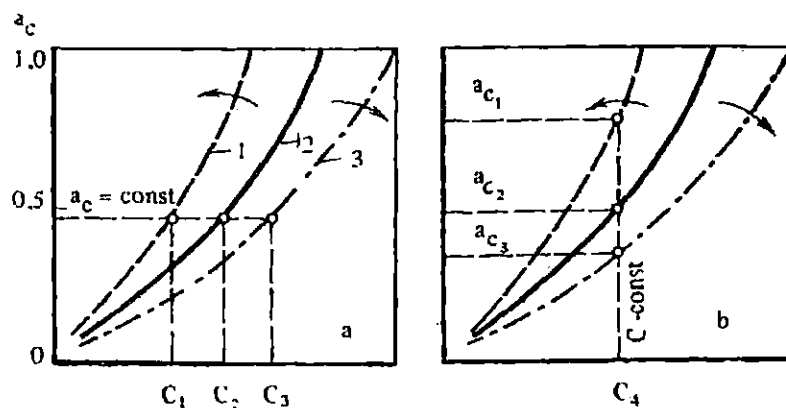
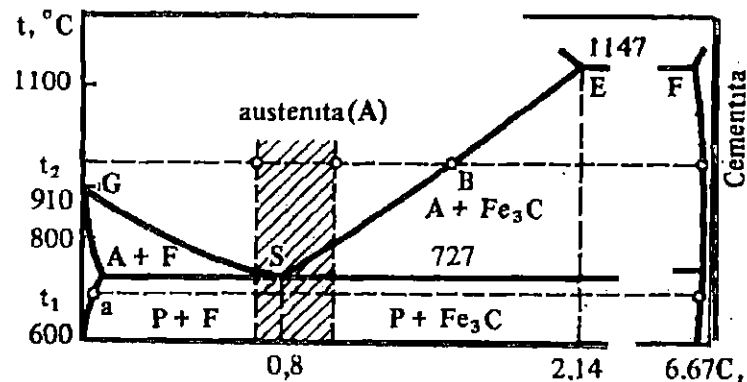


FIGURA 1.12. Esquema de la influencia de los elementos de aleación en la actividad del carbono en la austenita



**FIGURA 1.13.** Esquema del diagrama del estado Fe-Fe<sub>3</sub>C. La región sombreada corresponde a las concentraciones recomendables de carbono en la superficie de la capa cementada: A, austenita; F, ferrita; P, perlita.

### 1.3.1.3 MECANISMO DE FORMACIÓN, ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LA CAPA CEMENTADA

#### FORMACIÓN DE LA CAPA CEMENTADA

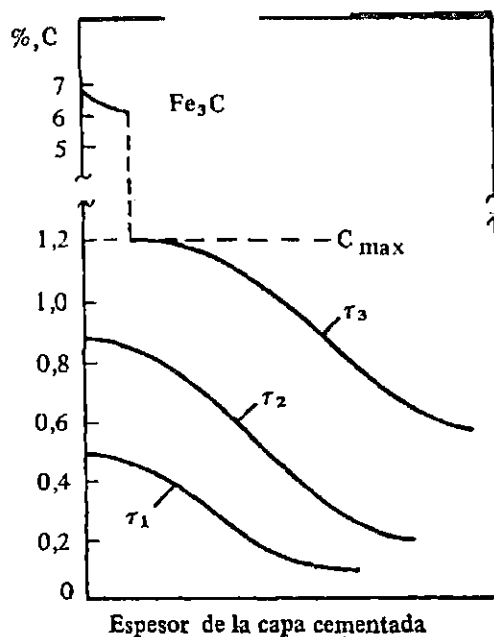
“La difusión del carbono en el acero solo es posible en estado elemental. El carbono atómico que se genera en la atmósfera gaseosa, es absorbido por la superficie del acero y se difunde hacia el interior del metal. Si la saturación se lleva a cabo a la temperatura  $t_1$  (figura 1.13), inferior a la eutectoide, entonces al principio se forma una solución sólida de carbono en el hierro  $\alpha$ . Después de alcanzar el límite de saturación del carbono en hierro  $\alpha$  (punto a, de la figura 1.13), en la superficie se forma cementita. A pesar de la gran movilidad difusiva del carbono, en el hierro  $\alpha$  ( $Q = 80.26$  kJ/átomo. g,  $D_0 = 0.62 \times 10^{-6}$  m/s) la cementación por debajo de la línea crítica inferior ( $A_1$ ) no se realiza, puesto que la ferrita disuelve muy poco carbono y la capa cementada prácticamente consta sólo de una capa muy delgada de cementita.

La cementación se realiza a temperaturas superiores a la línea crítica superior ( $A_3$ ). En este caso el carbono se difunde en la red de hierro  $\gamma$ . Cuando la austenita alcanza el límite de saturación con carbono (determinado por la línea SE), en este caso por el punto B, en la superficie se formarán núcleos de cementita. El crecimiento de los núcleos de carburos a lo largo de la superficie transcurre con mayor velocidad que en el interior del metal, a

consecuencia de lo cual en la superficie se forma una capa continua de carburo; a veces la cementita penetra hacia el interior en forma de cristales filiformes (bigotes) bordeando los límites de los granos austeníticos.

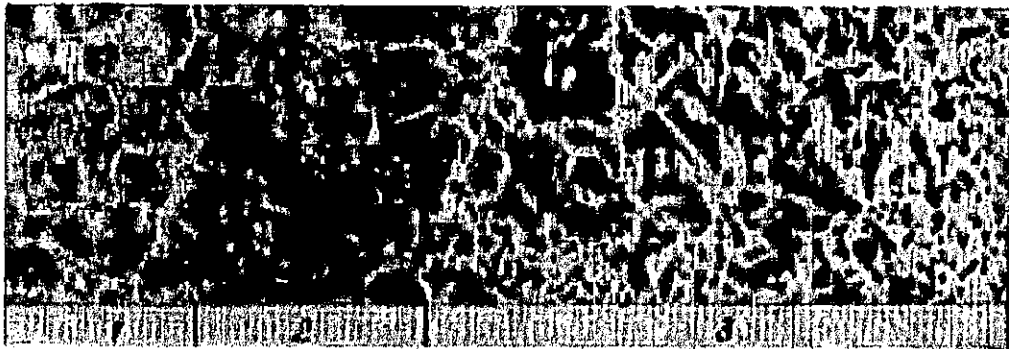
En la figura 1.14 se presenta el comportamiento de distribución de la concentración del carbono en el espesor de la capa difusiva después de la cementación en un carburante activo a distinto tiempo ( $t$ ). El punto  $C_{\text{máx}}$  corresponde a la solubilidad máxima del carbono en la austenita, determinada por la línea SE en el diagrama de estado Fe-C. Por ejemplo, a la temperatura  $t_2$ ,  $C_{\text{máx}}$  corresponde al punto B.

En la industria moderna en el proceso de cementación la capa de carburo, por lo general, no existe y la concentración de carbono en la zona superficial no supera su límite de solubilidad en la austenita para una temperatura dada (figura 1.14). En este caso la difusión se realiza sólo en la austenita, lo cual, en un posterior enfriamiento lento, sufre desintegración formando una estructura ferrito-cementita.



**FIGURA 1.14.** Esquema de variación de la concentración de carbono en el espesor de la capa cementada en función de la duración del proceso de saturación a 950°C

La capa cementada tiene una concentración variable de carbono, decreciendo desde la superficie al interior de la pieza (figura 14). Al respecto, después de un enfriamiento lento, en la estructura de la capa cementada pueden distinguirse (de la superficie hacia el interior) tres zonas (figura 15): la hipereutectoide 1, constituida por perlita y cementita proeutectoide secundaria que forma una red en el grano antiguo de austenita; la eutectoide 2, que consta, prácticamente, de solo perlita; y la hipoeutectoide 3, de perlita y ferrita.



**FIGURA 15.** Microestructura de la capa cementada en el acero, 200x

Cuando la concentración de carbono en la superficie de la capa es alta (entre 1.2 y 1.3%), se forma una red rica en cementita o ésta se desprende en forma de agujas, lo cual influye negativamente en la resistencia mecánica de la capa difusiva (zona de transición).

En lo que se refiere al tratamiento termoquímico de las aleaciones ferrosas, para describir la cinética de formación y la estructura de la capa difusiva no se pueden utilizar los diagramas binarios de fases. Para las aleaciones de dos componentes la secuencia de formación de fases y su composición en la primera aproximación (sin tener en cuenta la redistribución por difusión de los elementos de aleación, que se produce durante el tratamiento termoquímico) se pueden observar en el diagrama de equilibrio de fases o en sus cortes isotérmicos a la temperatura de saturación. Durante la saturación de las aleaciones ferrosas con carbono la difusión de este último transcurre a una velocidad que supera considerablemente la velocidad de difusión de los elementos de aleación de la composición inicial y cuya difusión influye, en la cinética de formación de la capa difusiva y en la composición de las fases que se forman.

La zona austenita-carburo de hierro surge, prácticamente, en la capa cementada sólo al alear el acero con elementos formadores de carburos, en primer lugar con cromo, los carburos empiezan a formarse en la superficie en los límites de los granos. Con el tiempo los carburos se precipitan también dentro del grano, la región bifásica se propaga a cierta profundidad y en la superficie, durante la cementación de los aceros de alta aleación, puede formarse una capa continua de carburos. Los carburos en exceso tienen forma globular. Al alear el acero con V (1-4%) o Ti (0.2- 2.0%), surgen los carburos de vanadio (VC) y carburos de titanio (TiC) puntuales o aciculares y una red cementítica. El manganeso no produce carburos granulares. En la superficie se forma una capa de cementita que se convierte en red. Durante la formación de la zona de austenita y carburo, la concentración media del carbono en la superficie de la capa cementada supera considerablemente el límite de solubilidad de éste en la austenita  $C_{m\acute{a}x}$ . La formación de carburos hace que la austenita se empobrezca de los elementos aleantes. Dentro de los límites de la zona austenita- carburo la concentración de los elementos aleantes en la austenita crece desde la superficie hasta el interior, por lo tanto la alta concentración de carbono en la capa produce que la templabilidad disminuya. Esto se debe a la acción que el carburo ejerce sobre la desintegración de la austenita y a la reducción de su estabilidad a costa de la transición de los elementos aleantes al carbono.

La movilidad difusiva del carbono en el hierro  $\gamma$  es considerablemente menor que en el hierro  $\alpha$ .

La dependencia entre el coeficiente eficaz de difusión  $D^{\gamma}_C$  (m/s) del carbono en la austenita y la temperatura (T) y concentración del carbono, se determina, según Blánter, por la ecuación:

$$D^{\gamma}_C = (0.04 + 0.08\%C) \exp\left(-\frac{131}{RT}\right) \cdot 10^{-4}, R = 8.314 \frac{J}{mol.K} \quad (7)$$

Y según los datos reportados por Wells y Mell, mediante la ecuación

$$D^{\gamma}_C = (0.07 + 0.06\%C') \exp\left(-\frac{134}{RT'}\right) \cdot 10^{-4} \quad (8)$$

Los resultados de la medición del coeficiente eficaz de difusión  $D^{\gamma}_C$ ,  $m^2/s$ , del carbono en la austenita, así para diferentes concentraciones de carbono se presentan en la figura 1.16. La movilidad difusiva del carbono depende de la composición de la austenita. La aleación del acero permite aumentar o disminuir el coeficiente de difusión.

Los otros elementos formadores de carburos (Si, W, Cr y otros) aumentan la energía de activación  $Q$  (figura 1.17a) y el factor  $D_0$ , disminuyen el coeficiente eficaz de difusión  $D^{\gamma}_C$  (figura 1.17b). La energía de activación crece tanto más, cuanto mayor es la fuerza de enlace entre el elemento y el carbono y cuanto menos elemento de aleación deforman la red de austenita.

La aleación del acero con elementos no formadores de carburos Ni y Co incrementa el coeficiente efectivo de difusión del carbono en la austenita y disminuye la energía de activación (figura 1.17a), siendo pequeña la variación de  $D_0$ . El silicio a temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 1050 °C) acelera la difusión del carbono, aumentando el coeficiente eficaz de difusión.

La fuerza de enlace de los elementos que no forman carburos es mayor con el hierro que con el carbono, por este motivo su difusión es mayor. Por otra parte, estos elementos no formadores de carburos deforman la red cristalina de la austenita, elevan su energía libre y también acortan el período de vida de los átomos de carbono atómico. Los elementos no formadores de carburos aceleran la difusión del carbono en el hierro, en la medida que más deforme la red de austenita.

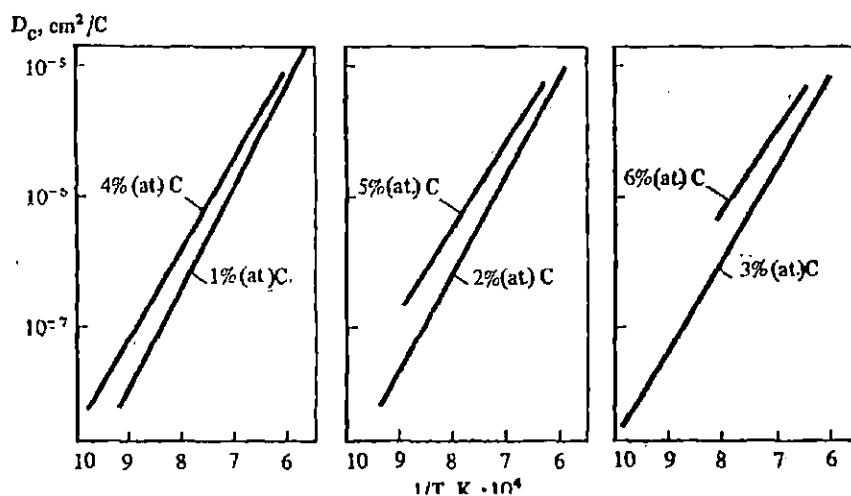


FIGURA 1.16. Dependencia de  $D = f(1/T)$  para la difusión de carbono

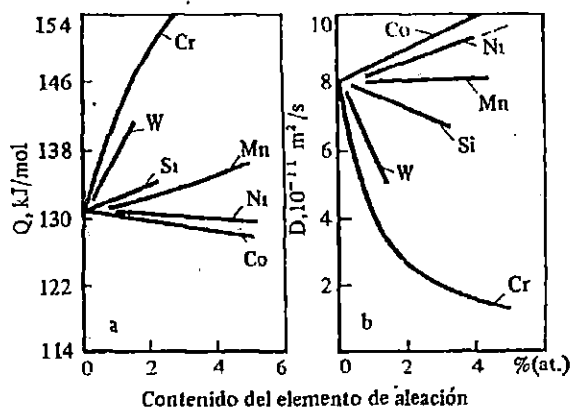


FIGURA 1.17 Influencia de los elementos de aleación en la energía de activación  $Q$  y en el coeficiente de difusión del carbono en la austenita a  $1100^{\circ}\text{C}$

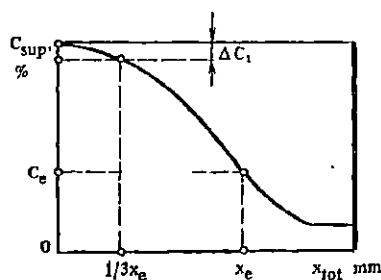
Los elementos aleantes no influyen de igual modo en el coeficiente eficaz de difusión y en la concentración del carbono en la capa superficial. Por eso, su influencia en el espesor de la capa depende de cual de estos dos factores es predominante. El cromo y el wolframio hacen que se reduzca  $D^{\vee}_C$ , pero elevan la concentración del carbono en la superficie  $C_{up}$ .



El níquel, contrario al cromo y el Volframio, hace que  $D^y_C$  aumente; pero disminuye la concentración de carbono en la superficie y por lo tanto se reduce el espesor de la capa cementada. Sin embargo, aquellos elementos aleantes que están en los aceros al carbono para cementación, influyen poco en el espesor de dicha capa.

Las propiedades de la capa cementada, dependen en gran medida de la curva de distribución del carbono en el espesor de la capa (figura 1.18). La curva de distribución del carbono en el espesor de la capa, se suele caracterizar por la concentración del carbono en la superficie ( $C_{sup}$ ), por la disminución del contenido del carbono  $\Delta C_1 = C_{sup} - C_{(x_{ef}/3)}$  a una distancia igual a  $1/3$  del grosor eficaz de la capa ( $x_{ef}/3$ ) y por la presencia de una zona descarburada en la superficie de la pieza, en función de las condiciones de funcionamiento, del material y dimensiones de las piezas de máquina se asignan los valores determinados de  $C_{sup}$ ,  $\Delta C_1$  y  $x_{ef}$  para garantizar la óptima resistencia constructiva.

En la mayoría de los casos para obtener una alta resistencia al desgaste, a la rotura frágil y al comportamiento a la fatiga. La concentración de carbono en la capa superficial tiene que estar dentro del intervalo de 0.8 a 1.0%. Para incrementar la resistencia a la fatiga por contacto, el contenido de carbono puede ser aumentando hasta un intervalo de 1.0 a 1.1%. Concentraciones más altas a 1.1 % de C de carbono en la superficie se obtiene una disminución de las propiedades mecánicas. La resistencia a la flexión estática se reduce cuando el contenido de carbono es mayor a 0.6%. Con un contenido de 1.0% de C, el  $\sigma_{flex}$  se reduce en un 10% a 15% y con un contenido de 1.4% de C se reduce de 4 a 3 veces. El valor máximo de esfuerzo corresponde a un intervalo de 0.8% a 1.0% de C; al seguir el aumento del carbono en la capa, este esfuerzo se reduce de 1.8 a 1.3 veces.



**FIGURA 1.18.** Distribución de carbono en el espesor de la capa cementada.

Cuanto más alto es el contenido de carbono, tanto más bajo es el valor de  $K_{eq}$ .

Para asegurar el sobre espesor dado para el rectificado, sin una pérdida de dureza considerable y las altas características mecánicas, el gradiente de carbono en el espesor de capa cementada no debe ser brusco, sobre todo en la región adyacente a la superficie de saturación.

El espesor de la capa cuyo contenido de carbono disminuye de modo significativo (tramo horizontal), se determina por el descenso de la concentración de carbono  $\Delta C_1$  en  $x_{ef}/3$  y debe satisfacer la desigualdad  $\Delta C_1 \leq (\alpha/100) \cdot C_{sup}$  (figura 1.18). El descenso admisible de la concentración de carbono en el espesor de la capa  $\alpha$  depende del carácter de funcionamiento de la pieza y está dentro de los límites  $\alpha = 5$  a 10%. Por ejemplo, para las fresas de múltiples discos de los trépanos de sondeo se hace que  $\alpha = 10\%$ , mientras que para las patillas de trépanos, hasta el 5.0%; es decir, en este último caso según las condiciones de desgaste se requiere un tramo menos pronunciado.

La descarburación superficial (descenso de la concentración del carbono) empeora las características mecánicas y no es admisible.

Para obtener la curva requerida de distribución de carbono en el espesor de la capa  $C(x)$  es necesario elegir correctamente y mantener con suficiente exactitud los parámetros tecnológicos principales del proceso de cementación (temperatura, tiempo de saturación, actividad del ambiente, etc). En la década de los ochenta, en países como la Ex-Unión Soviética y en otros países desarrollados, se han elaborado las metodologías de cálculo que permiten hallar las magnitudes de los parámetros tecnológicos del proceso de cementación, que aseguran la curva de distribución de carbono en el espesor de la capa y, por consiguiente, las características mecánicas óptimas” (LAJTIN; ARZAMÁSOF, 1987).

#### **1.3.1.4 CARACTERÍSTICAS QUE DEBEN CUMPLIR LOS ACEROS PARA CEMENTACIÓN**

“La tecnología ha propiciado grandes avances en los últimos años, fundamentalmente en lo que se refiere a materiales complejos, y no sólo en la consecución de determinadas propiedades, sino también en la combinación de propiedades extremas adecuadas para usos

muy específicos y las sollicitaciones más variadas. Se pueden tomar como ejemplo los materiales metálicos recubiertos con explosivos, los recubiertos a pistola, los aportes por soldadura, los materiales plásticos reforzados con fibra de vidrio o metálicas, etc. Así entre estos avances tecnológicos sigue destacándose la cementación de los aceros como una de los más geniales procesos, ya que se obtiene un núcleo tenaz y una capa superficial dura y resistente al desgaste. En estos se combinan idealmente la resistencia y la tenacidad de un acero débilmente aleado de 0.20% C en el núcleo, con la dureza y la resistencia al desgaste de un acero de herramienta (en la superficie).

En términos generales, las propiedades que debe cumplir un acero cementado son:

- 1) Una buena resistencia al desgaste y a la abrasión en la superficie, para lo cual se precisa una dureza elevada.
- 2) Soportar altas cargas superficiales (esfuerzos), necesitando para ello suficiente resistencia en la capa superficial, la cuál debe tener el espesor correcto.
- 3) Una resistencia a la fatiga conveniente para soportar una distribución adecuada de tensiones.
- 4) Resistencia y tenacidad de núcleo apropiadas para cumplir con las sollicitaciones a que está sometida la pieza en servicio.

Es bien conocido que la primera, la resistencia al desgaste, depende de la dureza máxima obtenida de acuerdo con el contenido en carbono y de elementos de aleación, de la austenita residual y de la cantidad, forma y distribución de los carburos; la segunda, de la profundidad de cementación y de la austenita residual, la tercera, de la distribución de tensiones que puede producirse durante el enfriamiento en transformaciones y de un adecuado tratamiento térmico, y la cuarta como consecuencia de la transformación correcta del núcleo en dicho tratamiento térmico.

Cualquiera de las normas conocidas y en uso, la ISO 683/XI, EURO-NORM 84-70, DIN 17210, AFNOR A35-552, UNI 5332-64, BS 970-55, AISI o SAE, dejan bien claro que para cementación deben cumplir unas exigencias de composición química, tempiabilidad, de dureza máxima después de la forja o de un recocido de ablandamiento, de dureza después de un tratamiento para mejorar la maquinabilidad, de características mecánicas sobre

probetas con un tratamiento de cementación en blanco (simulado) y del tamaño de grano. En algunos casos, se desea también la dureza máxima en estado de estirado en frío.

Es importante señalar algunas consideraciones metalúrgicas sobre las características más importantes como la templabilidad, tamaño de grano y propiedades mecánicas que pueden ser de utilidad para explicar resultados experimentales” (ACEROS DE LLODIO S.A, 1975).

### *TEMPLABILIDAD*

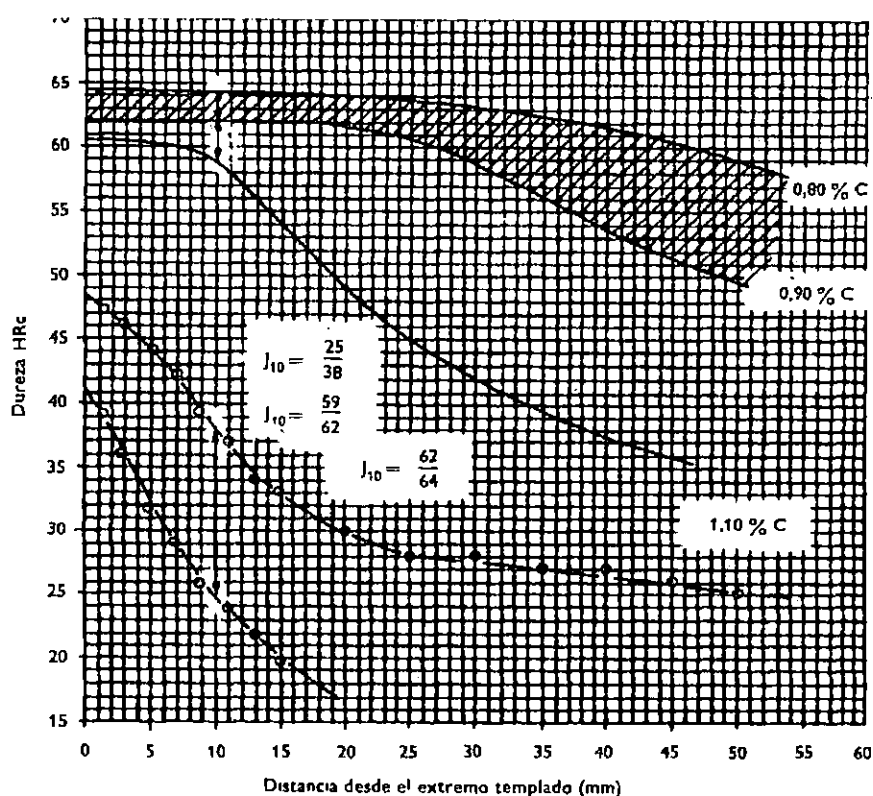
“Respecto a la templabilidad, no cabe duda, ya ha sido aceptado en todas las normas que tiene primordial importancia en las propiedades y en la clasificación de los aceros de cementación; los aceros deben cumplir con una banda de templabilidad normalizada. En las piezas cementadas por su propia forma de tratarlas, el contenido de carbono disminuye desde la superficie hasta el núcleo; así, hay una capa exterior cementada con 0.8 a 1.0% C y un núcleo con aproximadamente 0.20% C. En el tratamiento de cementación y temple directo toda la pieza se enfría al mismo tiempo por lo que hay que considerar entonces una templabilidad de núcleo y una templabilidad de la capa.

El ensayo Jominy tiene la gran ventaja de que las condiciones de temple pueden ser reproducidas con suficiente precisión y los resultados son siempre comparables; el cual es el ensayo normalizado para la templabilidad del núcleo. El ensayo Jominy – Meyer, determinando previamente la curva de cementación, tiene análogas ventajas para la determinación de la templabilidad de la capa cementada.

De una manera general, la templabilidad de capa o templabilidad superficial aumenta con el contenido en carbono, pero hay un contenido en carbono óptimo, porque al sobre pasar el límite de solubilidad a distintas profundidades aparecen carburos insolubles en cantidades tanto mayor cuanto menor sea la temperatura de temple, los cuales restan elementos de aleación y carbono al núcleo y, consecuentemente, disminuyen la templabilidad. Por otro lado, la tendencia a formar austenita residual aumenta también con los contenidos de carbono elevados y este constituyente es más blando, siendo ésta otra razón para elegir un contenido de carbono óptimo en superficie, usualmente este óptimo está entre 0.7 y 0.9%C.

En la figura 1.19 puede observarse este efecto para un acero 16MnCr5, donde un contenido alto en carbono tiene una influencia muy desfavorable, y en la figura 1.20 para un acero

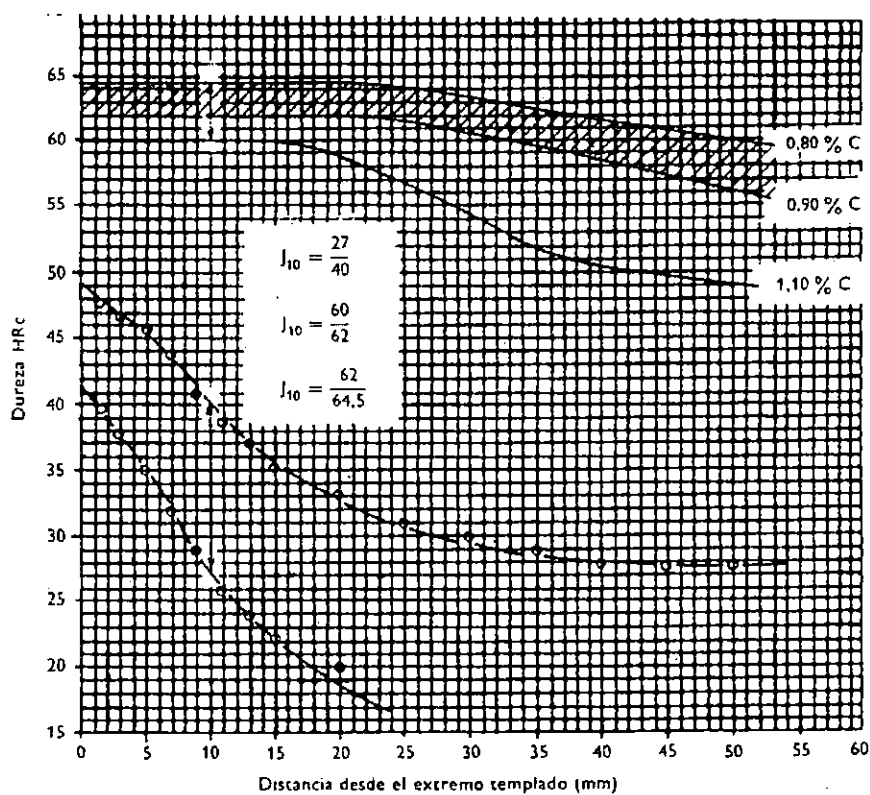
18CrMo4, donde es menos perjudicial; en las figuras 1.21 y 1.22, que corresponden a dos aceros NiCrMo, 20NiCrMo2 y 20NiCrMo6 de gran producción actualmente, se ve que con débiles contenidos de cromo, la capa superficial admite una proporción de carbono mayor. La tendencia a la formación de austenita residual y de carburos cuando se realiza el temple desde la temperatura de cementación también es mayor para contenidos de cromo altos y como además el cromo disminuye fuertemente la temperatura  $M_s$ , no conviene para estos



aceros en proporción elevada.

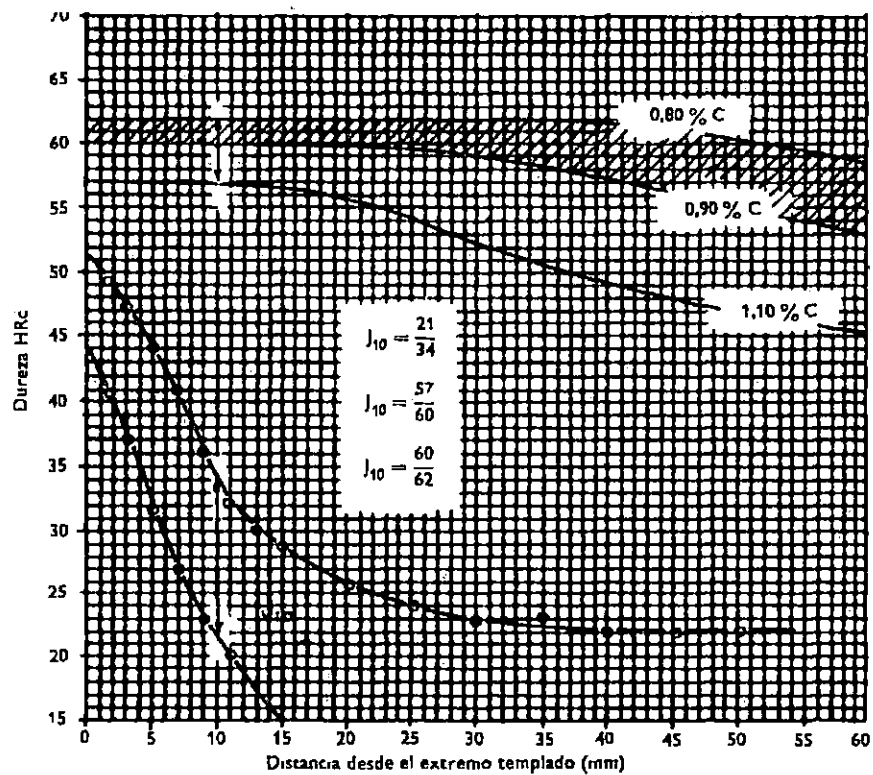
Análisis de la colada %							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0.13/0.19	1.00/1.30	0.15/0.40	≤ 0.035	≤ 0.035	0.80/1.10	-	-

FIGURA 1.19. Templabilidades de la capa y del núcleo en un acero F-1516 (16 Mn Cr5)



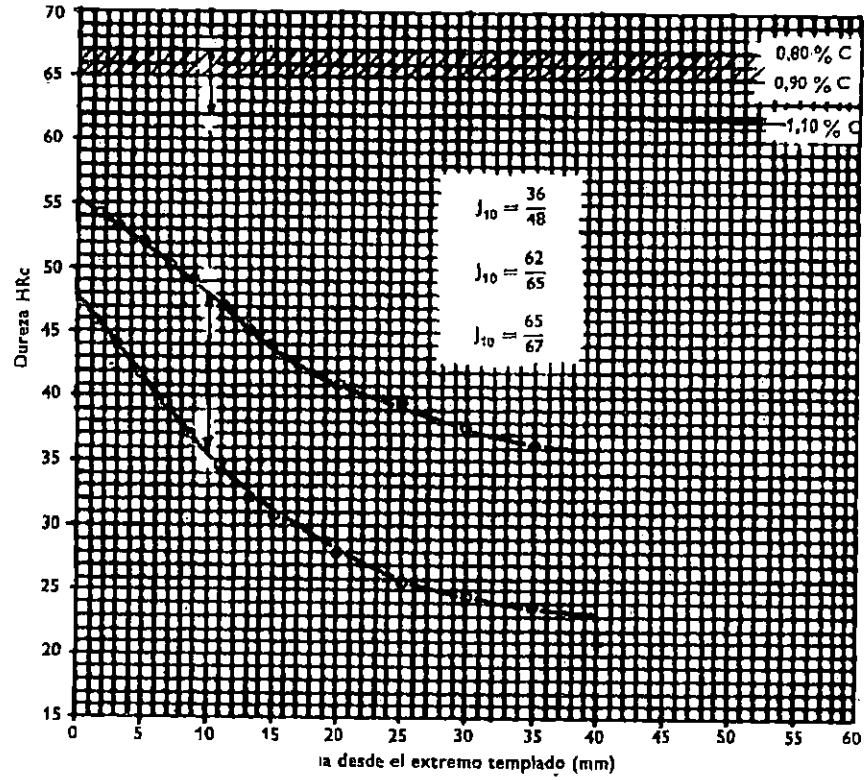
Análisis de la colada %							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0.15/0.21	0.60/0.90	0.15/0.40	≤0.035	≤0.035	0.85/1.15	-	0.15/0.25

FIGURA 1.20. Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1550 ( 18 Cr Mo 4)



Análisis de la colada %							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0.15/0.21	0.60/0.90	0.15/0.40	≤0.035	≤0.035	0.85/1.15	-	0.15/0.25

**FIGURA 1.21.** Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1522 ( 20 Ni Cr Mo 4)



Análisis de la colada %							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0.18/0.23	0.60/0.80	0.15/0.40	≤0.035	≤0.035	0.40/0.60	1.4/1.7	0.30/0.40

FIGURA 1.22. Templabilidades de capa y de núcleo en un acero F-1525 (20 Ni Cr Mo 6)



Siendo, según esto, esencial en un acero de cementación obtener una curva de dureza, también lo es, como se dijo anteriormente, obtener una capa superficial de espesor adecuado y con un estado de tensiones capaz de soportar altas presiones. Ello implica que la capa cementada debe estar sometida a compresión y para lograrlo es preciso una cantidad importante de martensita excluyendo la presencia de austenita residual o de carburos, cosa que no es difícil de lograr en los talleres de tratamientos térmicos actuales si están bien equipados. La profundidad de cementación útil, para las mismas condiciones de tratamiento y que corresponde a la dureza para 0.4% C, es también menor en los aceros débilmente aleados que tienen una templabilidad del núcleo mayor, circunstancia que tampoco debe olvidarse al elegir un acero de cementación determinado.

En las gráficas anteriores, donde se representa la templabilidad de núcleo y de capa cementada para contenidos de carbono entre 0.80 y 1.1% C puede señalarse como singularidad en todos los casos, si bien para distintos diámetros críticos, que aunque las bandas de templabilidad normalizadas admiten una dispersión perfectamente confirmada por la práctica, donde, por ejemplo, para el valor  $J_{10}$  los límites superior e inferior varían entre 10 y 12 unidades HRC, para la templabilidad de capa, a la misma distancia, esta variación es sólo de 3 a 4 unidades HRC. Expresado de otra forma, quiere decir que si la curva Jominy de un acero cumple con la banda de templabilidad normalizada, tanto si está cerca del límite superior como si lo está del inferior, parece probable que haya de cumplir también con las bandas señaladas en la templabilidad de capa y con dispersión mucho menor. En la misma figura se han señalado los valores límites de  $J_{10}$  en cada caso, que confirman cuanto se ha indicado”(*ACEROS DE LLODIO S.A, 1975*).

### 1.3.1.5 SELECCIÓN DE LOS ACEROS PARA CEMENTACIÓN

Es muy difícil dar reglas generales para la selección de aceros destinados a la fabricación de piezas cementadas, ya que es un procedimiento extraordinariamente complejo, por ser muchas las variables que intervienen en el mismo, así, a continuación se señalan en la tabla 1.5 algunos criterios o sugerencias que pueden servir de base para su selección.

**TABLA 1. 5.** Aceros que conviene emplear y métodos de enfriamiento recomendables para la fabricación de piezas cementadas. (JOSE APRAIZ).

Piezas a fabricar	Clase de acero	Tratamiento Térmico posterior
Piezas pequeñas de formas regulares, en las que no es probable que se presenten problemas de deformaciones, ni es de gran interés la resistencia ni tenacidad del núcleo.	Aceros al carbono	Temple en agua
Piezas de tamaño pequeño y mediano en las que deben cuidarse las deformaciones y en las que interesa buena tenacidad y resistencias en el núcleo desde 70 a 90 kg/mm <sup>2</sup>	Aceros de media aleación	Temple en aceite o en agua
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 desde 90 a 150 kg/mm <sup>2</sup>	Aceros de alta aleación	Temple en aceite

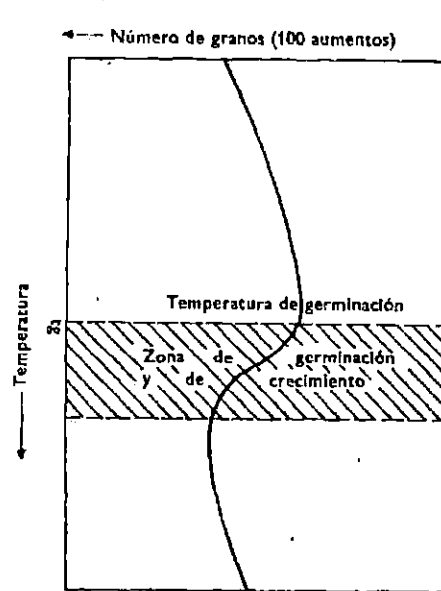
### 1.3.1.6 CRECIMIENTO DEL GRANO DE LOS ACEROS EN EL PROCESO DE CEMENTACIÓN

“Una de las características de calidad que con más frecuencia se exige a los aceros para cementación es su tamaño de grano, en la normalización se señala la exigencia de grano ASTM 5 o más fino para los aceros de grano fino y ASTM 5 o más grueso para los aceros de grano grueso. El grano del acero influye, como es bien conocido, en las propiedades mecánicas y fundamentalmente en las distorsiones y deformaciones que se producen como consecuencia del tratamiento. Conviene señalar, sin embargo, que se refiere casi siempre a un tamaño de grano potencial, el tamaño de grano austenítico, es decir, el grano de austenita que puede alcanzar el acero con un tratamiento determinado por encima de la temperatura de transformación. Este tamaño grano alcanzado depende de la temperatura y tiempo de mantenimiento y también de la distribución y cantidad de los elementos que convenientemente se adicionan al acero en el proceso de fabricación, tales como aluminio, titanio, vanadio entre otros.

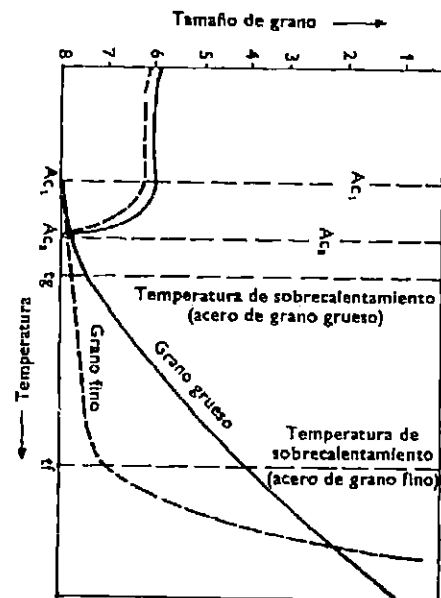
La ley de crecimiento de grano, definida por la curva que expresa el tamaño de grano alcanzado para cada temperatura y tiempos de mantenimiento, es distinta e influenciada por estos factores, mientras que para los aceros de grano grueso, éstos empiezan a crecer a una temperatura de unos  $50^{\circ}\text{C}$  por encima de  $A_{c3}$ , denominada temperatura de sobrecalentamiento, en los aceros de grano fino, esta temperatura se sitúa aproximadamente en  $125$  o  $150^{\circ}\text{C}$  por encima de  $A_{c3}$ . Esquemáticamente, en la parte superior de la figura 1.23 a, se han representado ambas leyes de crecimiento y en ellas puede observarse la importancia de la configuración de las curvas para cada caso. Inicialmente el tamaño de grano podría ser cualquiera; así, en los aceros de grano grueso, el crecimiento es continuo y constante en cuanto se rebasa la temperatura crítica  $A_{c3}$ ; en los aceros de grano fino tardan más en empezar el crecimiento, pero, una vez rebasada la temperatura de sobrecalentamiento, es muy rápido su crecimiento.

Frecuentemente, el crecimiento del grano no se realiza de una manera uniforme sino que a una temperatura determinada, normalmente cerca de la temperatura de sobrecalentamiento, unos cuantos granos comienzan a crecer desproporcionadamente a expensas de otros, es un fenómeno de germinación y coalescencia semejante al que ocurre en la recristalización y

aparecen consecuentemente granos finos y gruesos mezclados. En la parte inferior de la figura 1.23 b se representa esquemáticamente el crecimiento de grano. Así, una estructura que a temperaturas próximas a  $A_{c3}$  suelen tener un grano muy homogéneo, cuando se incrementa la temperatura, se presentan granos muy diversos que llegan a diferenciarse en dos y tres números ASTM y aún más si el fenómeno de crecimiento es completo. En estos casos, resulta difícil establecer un índice de tamaño de grano, conviene adoptar el criterio de tamaño de grano medio o mejor aún señalar el porcentaje de granos que han crecido por sobrecalentamiento respecto al inicial.



**FIGURA 1.23a.** Representación esquemática del crecimiento de grano en aceros de grano fino y grueso.

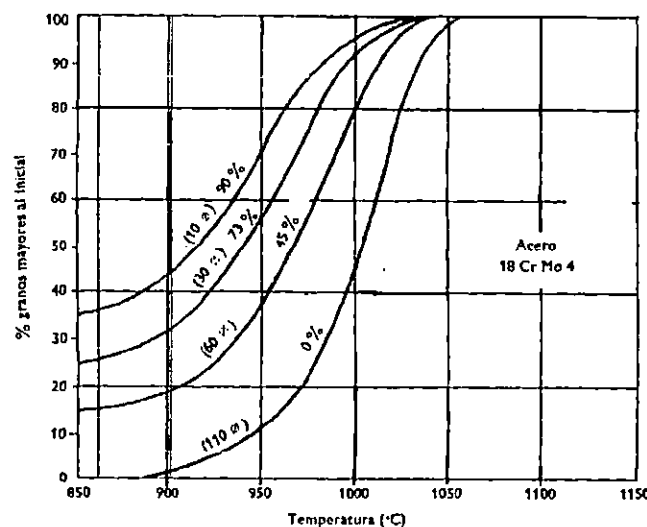


**FIGURA 1.23b.** Crecimiento de grano en aceros que presentan germinación.

Aunque con los procedimientos actuales de la fabricación de acero el tamaño del grano oscila generalmente entre los números 6 y 8 de la clasificación ASTM, la tendencia a realizar los tratamientos de cementación a temperaturas altas por encima de  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ , indudablemente, acorta el tiempo de cementación y mejoran los rendimientos en tonelajes de las instalaciones, lo cual produce un serio problema para los fabricantes de acero en cuanto a las exigencias de tamaño de grano.

Usualmente los aceros para cementación son para forja, esto no debe eliminar la posibilidad de que el propio proceso de forja, que supone ya un calentamiento a temperatura muy elevada y, por supuesto, muy por encima de la temperatura de sobrecalentamiento, tenga alguna influencia sobre la curva de crecimiento de grano, ya no sólo como simple consecuencia del calentamiento sino también por encima de las posibles variaciones sobre la solubilidad de los elementos que se añaden para impedir dicho crecimiento. Ensayos experimentales han demostrado que, al incrementar el trabajo de forja la susceptibilidad al sobrecalentamiento aumenta, tanto en aceros de grano grueso como en aceros de grano fino, aunque este efecto sea más acusado en los primeros. En la figura 1.24 se muestran unos resultados de laboratorio obtenidos sobre probetas de un acero al Cr-Mo de grano fino reducido por forja y para el cual se determinaron las curvas de crecimiento de grano”.

(ACEROS DE LLODIO S.A, 1975)



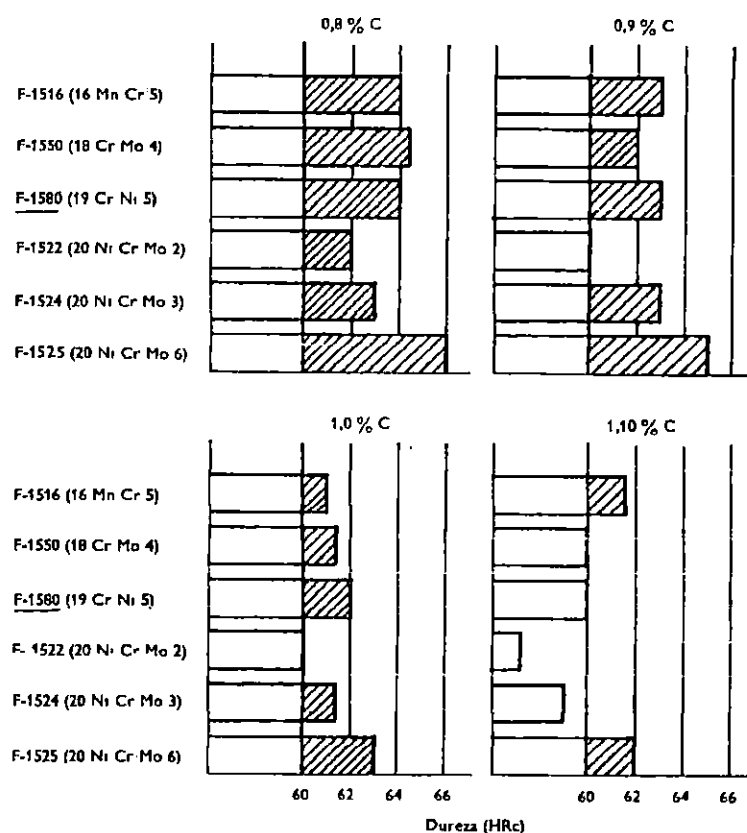
**FIGURA 1.24.** Sobrecalentamiento de un acero 18 Cr Mo 4, con distinta reducciones de forja.

### PROPIEDADES MECÁNICAS

“En estos tipos de aceros, las propiedades mecánicas tienen un carácter singular, puesto que, en definitiva, sólo les exige una resistencia y tenacidad de núcleo, como se ha indicado al principio, apropiadas para soportar las sollicitaciones de la pieza en servicio. En la

práctica, el tratamiento térmico a que fue sometido el núcleo, que se puede separar de la capa cementada es un simple temple en aceite seguido de un revenido a baja temperatura (180 °C a 200 °C) para eliminar las tensiones. Con tratamientos de recocido de ablandamiento para mejorar la maquinabilidad la propiedad exigible es la dureza máxima, a un valor, dentro de un amplio margen de magnitud, que ya figura en la norma correspondiente. Son exigibles, también, según norma, características mecánicas de resistencia, límite elástico, alargamiento y resiliencia sobre probetas, preparadas según la norma y sometidas a un tratamiento de cementación simulada. Aunque no es lo correcto, es habitual realizar un temple en una rodaja y medir la dureza de la superficie y del núcleo.

La dureza superficial necesaria para obtener una buena resistencia al desgaste se consigue con relativa facilidad si el tratamiento de cementación es correcto y el potencial de carbono se regula y mantiene en el valor adecuado durante todo el tiempo del mismo. En la industria se dispone de instalaciones de cementación gaseosa convenientemente equipadas para lograrlo. Los aceros desarrollados para aprovechar al máximo las ventajas de una buena regulación del potencial de carbono que evita la sobrecarburación y poder realizar el temple directo tienen como características su contenido de cromo limitado a 0.6%. La disminución de templabilidad se compensa con la adición de molibdeno y de níquel. La austenita retenida causa disminución de la templabilidad de la capa. En la figura 1.25 se resumen los valores máximos de dureza alcanzadas en la superficie para diferentes contenidos de carbono en distintos aceros, tomados a distancias 3-10 mm del extremo templado de probetas Jominy, que responden a velocidades de enfriamiento cercanas a las obtenidas en la práctica industrial. Para un contenido de carbono en superficie de 0.8%C en todos los aceros se alcanzan 62 HRc, pero disminuye marcadamente la dureza para 1.0 y 1.10%C. Estos valores son significativos en cuanto que ellos pueden indicarnos en una composición determinada y para un contenido de carbono dado en la capa endurecida, la influencia que puede tener la formación y presencia de austenita retenida y el efecto de los carburos". (*ACEROS DE LLODIO S.A, 1975*)



**FIGURA 1.25.** Valores máximos de dureza alcanzada en la superficie para los diferentes contenidos de carbono, tomados a una distancia de 3 a 10 mm del extremo templado de la probeta.

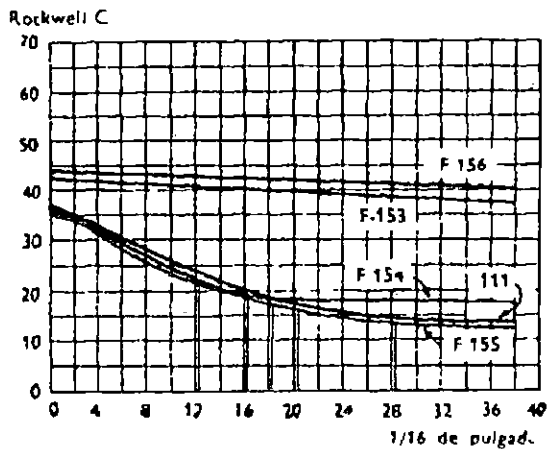
### 1.3.1.7 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LOS ACEROS PARA CEMENTACIÓN

“A continuación se presentan los detalles más importantes que los elementos de aleación ejercen en los aceros para cementación.

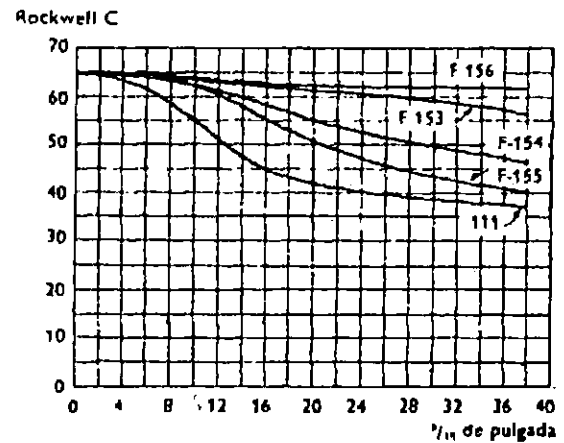
La templabilidad de la parte periférica y del núcleo central de las piezas cementadas queda muy modificadas por la presencia de elementos de aleación, circunstancia que modifica notablemente las características mecánicas que con cada acero se pueden obtener.

En las figuras 1.26 y 1.27 se pueden observar las curvas Jominy de diversos aceros de cementación, también las curvas Jominy que corresponden a las composiciones del acero de las capas cementadas. Observando estas curvas, se aprecian fácilmente diferencias

importantes entre ellas y se comprende por qué unos aceros deben ser templados en agua y otros en aceite.



**FIGURA 1.26.** Curvas Jominy de varios aceros de cementación de uso frecuente.



**FIGURA 1.27.** Curvas Jominy correspondiente a varios aceros de cementación de uso más frecuente.

Los elementos de aleación también tienen una influencia bastante importante sobre las temperaturas críticas del material, tanto en lo que corresponde a la parte cementada, como a la zona sin cementar, y también, influyen en las temperaturas de tratamiento que deben emplearse en cada caso.

El níquel y el manganeso hacen descender los puntos críticos y el cromo y el molibdeno los elevan. En la figura 1.28 se señalan las temperaturas  $Ac_3$ ,  $Ac_{32}$ ,  $Ac_{321}$ , de diversos aceros, por medio de las líneas AD, A'D', etc.



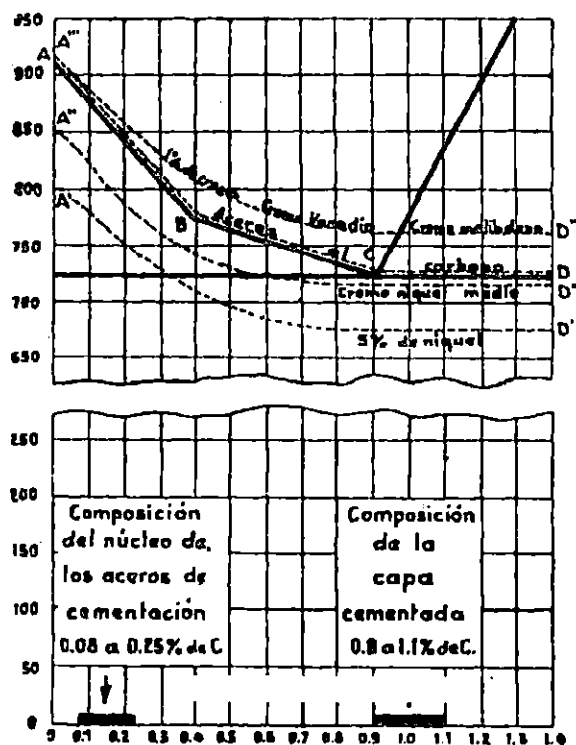


FIGURA 1.28. Temperaturas críticas de diversos aceros al carbono y aleados.

La línea A'D' corresponde a los aceros de 5% de Ni; la A''D'' a los aceros cromo-níquel y la A'''D''' a los aceros cromo molibdeno y cromo-vanadio con 1% de Cr. Las temperaturas críticas de un acero al carbono de 0.12% de C son:  $Ac_1 = 732\text{ °C}$  y  $Ac_3 = 870\text{ °C}$ . Las de un acero cromo-níquel de 0.10% de C, 0.60% de Cr. y 3% de Ni, son:  $Ac_1 = 715\text{ °C}$  y  $Ac_3 = 790\text{ °C}$ , y las de un acero cromo-molibdeno de 0.12% de C, 1% de Cr y 0.20% de Mo, son:  $Ac_1 = 775\text{ °C}$  y  $Ac_3 = 875\text{ °C}$ .

Teniendo en cuenta que la cementación debe hacerse a temperaturas superiores en 30 °C a 60 °C al punto  $Ac_3$ , pues así el acero se encuentra en estado austenítico, que disuelve con gran facilidad el carbono, las temperaturas de cementación serán:

- Acero al carbono. . . . . 900° - 950 °C
- Acero al cromo-níquel. . . . . 850° - 900 °C
- Acero al cromo molibdeno. . . . . 900° - 950 °C

En los procesos antes mencionados esas temperaturas son:

*Recocido de regeneración (pre o post-tratamiento térmico)*

Acero al carbono

Temple de núcleo central, 890°.

Temple de la periferia, 780°.

Acero cromo-níquel

Temple del núcleo central, 825°.

Temple de la periferia, 760°.

Acero cromo-molibdeno

Temple del núcleo central, 890°.

Temple de la periferia, 825°.

La velocidad de penetración y la distribución del carbono en el interior del acero no se modifica muy sensiblemente por la presencia de elementos de aleación en el acero. Sin embargo, se observa que el Ni y el Si tienden a retardar esa penetración, y en cambio los elementos formadores de carburos, como el Cr, Mo y Mn, incrementan la misma.

A continuación se indicará la influencia que ejercen aisladamente el Mn, Cr, Ni y Mo en los aceros para cementación.

El manganeso en general da lugar a aceros de grano grueso, pero este problema se resuelve en parte, haciendo durante el proceso de fabricación del acero adiciones especiales generalmente de aluminio para conseguir afinar el grano. Además el manganeso baja los puntos críticos de los aceros, por lo que el temple de los aceros al manganeso se realiza a temperaturas más bajas que lo normal, lo cual tiene ciertas ventajas, porque evita descarburaciones y deformaciones. El manganeso mejora notablemente la maquinabilidad, por lo que a veces es posible templar en aceite piezas que con bajo contenido de manganeso sería necesario templabilidad en agua.

El níquel mejora la tenacidad y la resistencia de los aceros para cementación. Baja los puntos críticos y al poderse utilizar (lo mismo que con los aceros al manganeso) temperaturas de tratamiento más bajas que lo normal, se disminuyen los peligros de

formación de cascarilla, y de aparición de descarburaciones y deformaciones. El níquel tiende a retrasar la transformación de la austenita en martensita. Si en los tratamientos se calienta el acero a temperatura demasiado elevada, en la zona periférica de las piezas cementadas de aceros altos en níquel aparece austenita retenida y el material no queda tan duro como le corresponde a su composición. Empleando las temperaturas de temple correctas (más bajas que las que corresponden a otros aceros) se resuelve fácilmente este problema.

El cromo aumenta en la zona central de las piezas cementadas, la resistencia y la dureza que se obtiene después del temple, así como la dureza y resistencia al desgaste de la capa periférica. A veces estos aceros son de grano grueso, frágiles y muy sensibles a pequeñas diferencias en las temperaturas de temple. Esas dificultades se pueden resolver lo mismo que en el caso de los aceros al manganeso, fabricando los aceros al cromo con grafito fino (adicionando aluminio en la cuchara de colada).

En los primeros años de empleo de los aceros al cromo, estos problemas impidieron que se difundiera rápidamente su empleo, pero posteriormente cuando se ha estudiado con detalle el tamaño de grano de los aceros y se ha llegado a regularlo, su empleo se ha extendido extraordinariamente.

El molibdeno mejora la templabilidad y la resistencia al desgaste. Además, mantiene endurecida la capa periférica a pesar de que durante el trabajo llegue por el roce a calentar la superficie de las piezas y se alcancen temperaturas relativamente elevadas.

Con la adición de níquel y cromo a la vez se ha conseguido en los aceros para cementación, alcanzar excelentes características mecánicas. El níquel da a los aceros gran tenacidad que precisamente les falta a los aceros al cromo y por otro lado imparte gran dureza y resistencia al desgaste que no tiene los aceros al níquel. Ambos aumentan la templabilidad y la resistencia del núcleo. Añadiendo, además, molibdeno a los aceros al níquel se mejora notablemente su templabilidad y con los aceros cromo-níquel-molibdeno ha sido posible fabricar piezas cementadas de gran tamaño con resistencias y durezas muy elevadas”.

*(JOSE APRAIZ)*

## *CAPA CEMENTADA*

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. Generalmente recibe el nombre de capa dura la zona superficial que después del último tratamiento queda con una dureza superior a 700 Vickers, y que suele corresponder a la zona cuyo porcentaje de carbono es superior a 0.50% C.

En algunas ocasiones se presentan dudas en la determinación de la capa dura, por que al emplearse diferentes máquinas para el ensayo de dureza y diferentes cargas de ensayo se obtienen también diferentes resultados. Más adelante se explicará los mejores resultados para determinar el espesor de la capa cementada.

Los espesores de las capas cementadas que normalmente se emplean en las piezas de máquinas y motores, se pueden clasificar en tres grupos:

1. Capas delgadas con menos de 0.50 mm de espesor de cementación. Estas profundidades de cementación se utilizan para pequeñas piezas de acero al carbono, endurecidas generalmente con sales de cianuro y templadas directamente desde la temperatura de cementación. Estas piezas deben utilizarse siempre sin rectificado posterior.
2. Capas de espesor medio de 0,50 a 1.50 mm. Estos espesores son los más corrientes para la mayoría de las piezas que se utilizan en la fabricación de máquinas y motores. Se pueden obtener empleando cementantes sólidos o gaseosos, con aceros al carbono, débilmente aleados o de alta aleación.
3. Capas de gran espesor, superiores a 1.50 mm. Son obtenidas generalmente por cementantes gaseosos y algunas veces, aunque más raramente, con cementantes líquidos. Las chapas de blindaje, que suelen fabricarse con chapas cementadas superiores a 3 mm, suelen ser cementadas con gas.

Cualquiera que sea el proceso que se emplee, no conviene en general que el contenido de carbono la capa cementada pase de 1% y debe procurarse que la parte periférica de la pieza, después de rectificada, quede aproximadamente con 0,80 a 0,90% de carbono, con lo que se obtienen en el temple durezas de 62 a 65 Rockwell-C, que es aproximadamente el límite de dureza por el cual la lima ya no marca el acero.

Cuando el contenido en carbono de la zona periférica es superior a la composición eutectoide de 0,90% de carbono, suelen aparecer redes de cementita o de carburos muy marcadas, que pueden hacer frágil a la capa cementada y con tendencia a descascararse. En estos casos conviene dar a las piezas después de la cementación un recocido de difusión a 800 °C a 900 °C en un medio apropiado para disminuir el porcentaje de carbono de la periferia. Con este tratamiento se uniformiza bastante el contenido de carbono en la capa periférica y se evitan posibles fracturas en las piezas cementadas.

#### **1.3.1.8 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA CAPA CEMENTADA**

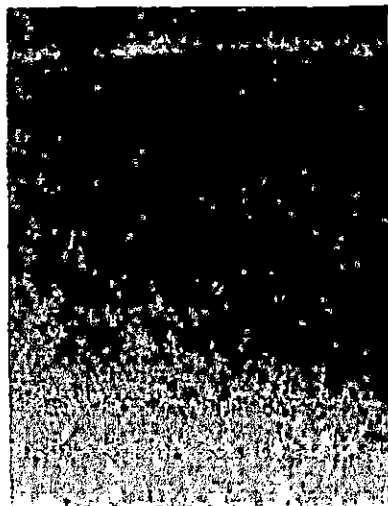
Las características mecánicas de la capa cementada, son casi siempre independientes de las del núcleo. Generalmente interesa que la dureza superficial sea superior a 60 Rockwell-C, aunque para algunas piezas que sufren poco rozamiento, son suficientes durezas comprendidas entre 52 y 60 Rockwell-C.

Se consideran durezas muy buenas las mayores de 63 Rockwell-C; buenas las comprendidas entre 62 y 63 Rockwell-C y aceptables entre 60 y 62 Rockwell-C.

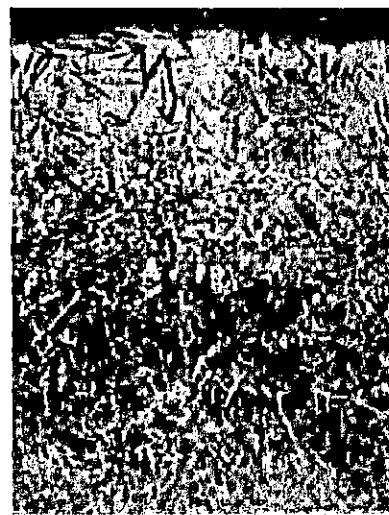
En piezas pequeñas estas durezas se consiguen lo mismo con aceros al carbono (templados en agua) que con los aceros aleados (templados en aceite), siendo ventajosa la utilización de estos últimos, porque al templar en aceite disminuyen las deformaciones y se obtiene una gran uniformidad en los resultados. Con los aceros aleados con cromo y molibdeno, se obtienen durezas ligeramente superiores a las que se consiguen con otros aceros y mayor resistencia al desgaste, debido a la formación de carburos complejos en la zona periférica.

Para comprobar la dureza de la capa cementada, además de las máquinas de dureza Rockwell-C y Vickers, es muy útil el uso de la lima, que, empleada con precaución y cuidado, rinde muy buenos resultados. Utilizando una lima fina y nueva, se pueden

distinguir las piezas que tienen una dureza inferior a 60 Rockwell, que son rayadas con la lima, y las de mayor dureza que no son rayadas. Empleando este procedimiento, se puede controlar rápida y eficazmente la marcha de la fabricación de piezas que por su forma complicada, no pueden ser ensayadas con las máquinas de dureza. En algunas ocasiones, generalmente no muy frecuentes, no se llega a alcanzar en el temple de la pieza cementadas la dureza adecuada, debido a que en el calentamiento realizado para templar las piezas se descarbura la capa periférica y entonces la zona superficial queda con dureza baja (figura 1.29).



**FIGURA 1.29.** Capa exterior descarbada (color blanco) de una pieza que se ha cementado (100x).

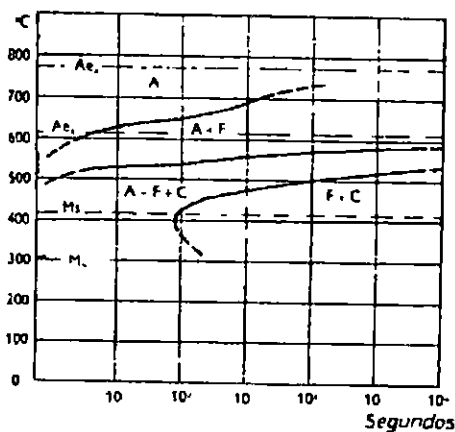


**FIGURA 1.30.** Capa periférica de una pieza cementada y templada de un acero Cromo-Níquel (200x)

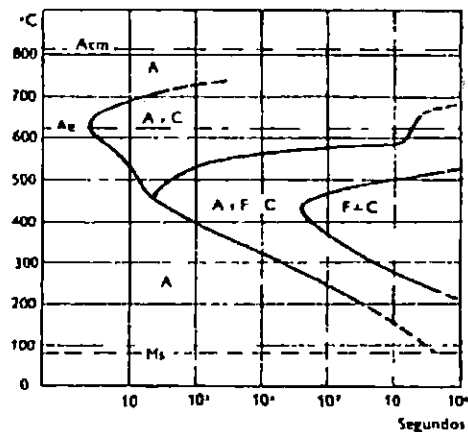


**FIGURA 1.31.** Agujas de martensita sobre un fondo blanco de austenita retenida, correspondientes a la zona periférica del acero de la figura 30 (1000x).

También, suele ocurrir a veces en los aceros de alta aleación al cromo-níquel o al cromo-níquel-molibdeno que después del temple de las piezas cementadas se obtienen durezas relativamente bajas de 60 a 61 Rockwell-C, inferiores a las que normalmente interesa obtener (62 a 65 Rockwell- C) e inferiores también a las que suelen obtener sin dificultad cuando esas piezas se fabrican con aceros de cementación al carbono o de baja aleación. Esta baja dureza suele ser debida a la presencia de austenita retenida en la capa cementada como consecuencia del empleo de temperaturas de temple demasiado elevadas (Figura 1.30 y Figura 1.31). En estos casos, la presencia de un elevado porcentaje de níquel en un acero de alto porcentaje de carbono y el empleo de altas temperaturas de temple, bajan las temperaturas  $M_s$  y  $M_f$  correspondientes al comienzo y al fin de las transformaciones de austenita martensita (figuras 1.32 y 1.33). Este problema se suele solucionar fácilmente templando a temperaturas inferiores a las que dieron durezas bajas. El problema se suele presentar también en parte porque a pesar de ser las temperaturas de temple de la capa cementada de estos aceros relativamente bajas 740 °C a 770 °C, son inferiores a las que normalmente se emplean para los demás aceros de cementación, hay casi siempre tendencia en todos los talleres a emplear temperaturas de temple más altas que esas que acabamos de señalar.



**FIGURA 1.32.** Curva de la S de un acero para cementación al níquel de la siguiente composición: C=0.10%; Mn=0.52%; Ni=5%.



**FIGURA 1.33.** Curva S correspondiente a la capa cementada (1% de C aprox.) del mismo acero al níquel al que hace referencia la figura 1.32.

### 1.3.1.9 MEDICION DEL ESPESOR DE LA CAPA EFECTIVACEMENTADA

Para conocer en los procesos de cementación, la penetración del carbono, se pueden emplear varios procedimientos. Así, el más sencillo consiste en cementar junto con las piezas, dos o tres varillas, del mismo material de 6 a 12 mm de diámetro. Después de cementadas se templen a 800 °C en agua y se rompen, pudiendo observarse en la fractura una capa periférica dura, que presenta un grano mucho más fino que el núcleo central y que señala con bastante aproximación la penetración del carbono. Al mismo tiempo se puede conocer si ha crecido o no el grano del núcleo central durante la cementación.

Otro método consiste en cortar las varillas después de cementadas, pulir las secciones transversales y atacarlas durante treinta segundos con ácidos nítricos al 5%. Las zonas cementadas se ennegrecen y se puede medir con más precisión que en el caso anterior el espesor de esas zonas, que tienen un contenido en carbono superior a 0.50%.

El examen microscópico sirve para estudiar en detalle el avance de la cementación. Un procedimiento muy empleado, consiste en cortar las piezas o probetas cementadas, después de la cementación y antes del temple final, rectificando y puliendo la sección transversal. Se ataca con Nital-5 y se mide el espesor del anillo periférico de color negro, que corresponde a la capa cementada, con un microscopio de retícula graduada, empleando 10 a 50 aumentos. Las estructuras recocidas de los aceros cementados, que son de tipo perlíticas, son las que dan mejor idea del proceso y son también las más claras y más fáciles de observar. Para estudiar el avance de la cementación, basta generalmente con pocos aumentos (es suficiente con 10 a 100 aumentos).

El análisis químico da también una idea muy exacta de la operación. Para realizarlo, conviene utilizar cilindros fabricados con el acero que se quiere estudiar de 15 a 20 mm de diámetro y 100 a 200 mm de longitud, que después de cementados con el resto de las piezas, son torneados con pasadas de profundidad de corte de 1/10 de mm. Recogiendo y analizando la viruta de cada uno de los escalones, se conoce perfectamente la distribución del carbono en el acero.

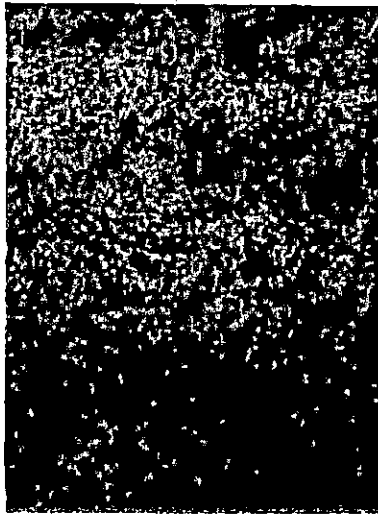
A continuación se presenta un método para determinar a profundidad de la capa cementada. Este ensayo se hace cementando y templando una varilla cilíndrica de 100 mm de longitud



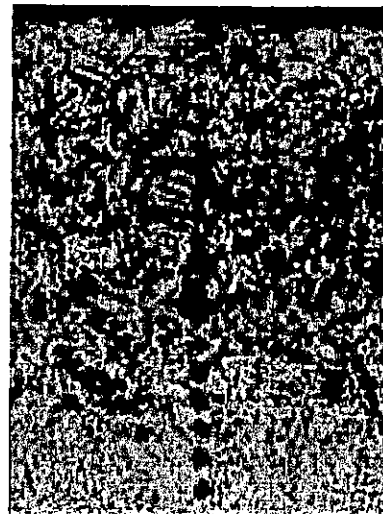
y de 10 a 30 mm de diámetro, de la misma clase de acero con que se han fabricado las piezas, a la que se le hace un rectificado ligeramente cónico, de forma que en uno de los extremos se conserve el diámetro inicial, y en el otro desaparezca completamente la capa cementada. Se hacen durezas a lo largo de toda la generatriz, y se anotan los resultados. Se observará que la dureza varía de un extremo a otro, existiendo una zona de máxima dureza, en la que los resultados son casi constantes. El espesor de esa zona señala la profundidad de la capa cementada.

Los resultados que se obtienen al hacer el ensayo en la forma señalada varían según sean las máquinas de dureza empleadas. Si se emplea máquina Vickers el espesor que se obtiene para la capa, con dureza superior a 700 Vickers por ejemplo, será mayor cuanto menor sea la carga empleada. Esto es debido a que al emplear las mayores cargas la punta del diamante llega hasta la zona blanda, no así cuando se emplean cargas pequeñas. Para piezas cementadas destinadas a la fabricación de automóviles y máquinas ligeras, es muy utilizada la dureza Rockwell-C y se consideran aceptables los espesores que con la carga de 150 Kg. dan cifras Rockwell-C superiores a 62.

Otro método para determinar el espesor de la capa dura es mediante el microscopio. Para ello se cortan transversalmente las piezas y se hacen mediciones de microdureza (figura 1.34 y 1.35), observando a partir de que punto de la dureza del material es inferior a 700 o 750 Vickers por ejemplo en los ensayos de micro dureza suelen emplearse cargas variables de 10 a 150 g.



**FIGURA 1.34.** Ensayo de microdureza vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado (100x).



**FIGURA 1.35.** Ensayo de microdureza vickers en la sección transversal de un acero cementado y templado (500x).

### 1.3.10 TRATAMIENTOS TÉRMICOS POSTERIORES A LA CEMENTACIÓN

“Las piezas cementadas pueden templarse directamente desde la temperatura de cementación. Pero esto sólo es posible generalmente en el caso de piezas sometidas a esfuerzos no excesivos o piezas pequeñas, pues el grano del acero se vuelve demasiado grueso y la superficie contiene cementita libre. En la carburación gaseosa, puede evitarse esto último. En los aceros aleados para cementación que contienen formadores de carburos, por ejemplo el cromo como elemento de aleación, puede llegarse a la formación de carburos especiales y, por consiguiente, a una considerable concentración de carbono en la zona superficial.

La cementita intergranular de los aceros no aleados puede separarse de dichos límites por un recocido de difusión o por calentamiento a través de la línea de formación E-S del diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C. En el caso de carburos aleados sólo es posible llevar a cabo un recocido de difusión, puesto que los carburos tienen muy poca capacidad de disolución y el carbono verdaderamente disuelto hace que subsista la sobresaturación de la zona superficial, y por consiguiente la nueva formación de carburos de aleación, si no hay tiempo para una difusión mas intensa. Con el enfriamiento al aire, la cementita disuelta en los aceros no

aleados volverá a precipitarse en forma de red en los límites intergranulares. En estos aceros puede, no obstante, evitarse esta formación reticular mediante un enfriamiento rápido, por ejemplo en aceite. Pero esto, sólo puede hacerse si es admisible la mayor deformación originada por el enfriamiento rápido, o si las piezas, debido a su forma, son insensibles a la deformación. Pero muchas veces se suele calentar no muy por encima de la línea E-S, llegando por tanto sólo por encima de la línea de transformación del núcleo, pobre en carbono. En los aceros corrientes de cementación, con aproximadamente 0.1% de carbono, esto suele ser aproximadamente 900 °C. A esta temperatura se disuelve una gran parte de cementita intergranular (en contenidos no muy altos de carbono superficial, toda la cementita) y el resto se reúne en forma globular por tensión superficial. El enfriamiento rápido que se hace inmediatamente después actúa al mismo tiempo afinando también el grano del núcleo. En el recocido de difusión hay que cuidar que éste se haga en atmósfera neutra, al abrigo del aire, por que de lo contrario se descarbura la zona superficial.

### *TEMPLE*

Los distintos procesos de temple empleados después de la cementación, así como la cementación propiamente dicha, están representados en diagramas temperatura-tiempo en la figura 36 y son:

1. Temple directo desde la temperatura de cementación.
2. Temple después de un enfriamiento lento.
3. Temple con recocido intermedio.
4. Doble temple.

#### *1) Temple directo desde la temperatura de cementación*

El temple rápido se hace en agua (c) desde la temperatura de cementación, o en aceite si se trata de aceros aleados. Como agente de temple se emplean soluciones salinas y emulsiones. Algunas veces también se enfría el acero en baños calientes a unos 200 a 250<sup>0</sup>C (e). Esta clase de temple puede aplicarse a aceros poco sometidos a esfuerzos o también cuando hay que cementar aceros que son insensibles a altas temperaturas en lo que respecta a la formación de granos gruesos. Este proceso de temple suele emplearse, además, para piezas fabricadas en forma masiva con poca profundidad de cementación y también

esta perfectamente indicado para temple después de la cementación en baños de cianuros o después de la cementación gaseosa.

### 2) *Temple después de un enfriamiento lento*

- a) Las piezas se enfrían despacio en la caja (1a). Por esto las tensiones que existen en la pieza antes del propio temple son pequeños. Sin embargo, la estructura del núcleo del material resultará relativamente basta, puesto que la ferrita tiene tiempo suficiente para depositarse en los límites intergranulares primarios y formar así una red gruesa. Después del enfriamiento lento se vuelve a calentar el acero para su temple (2). Al contrario que en el temple directo, se aplica, no obstante, sólo una temperatura de temple que corresponde a la correcta temperatura para la zona superficial rica en carbono, o sea, más o menos la temperatura de temple de aceros eutectoides. El enfriamiento se hace en agua (2c) o aceite (2d) y líquidos parecidos o en baños calientes a aproximadamente  $200^{\circ}\text{C}$  (2e).
- b) En el enfriamiento lento desde los baños de sales, y también con retirada del material del horno de cementación gaseosa, se utilizará aire en reposo (1b) como agente de enfriamiento. Este se hace entonces de manera que responda a un enfriamiento de normalizado. En este caso, sobre todo en secciones no demasiado gruesas, se obtendrá en el núcleo una estructura secundaria mucho más fina que con el enfriamiento en cajas. Las características tecnológicas en el núcleo serán mejores. El temple siguiente se efectúa con arreglo al literal 2). Esta clase de temple (2a y 2b) da por resultado una deformación menor, junto a una alta dureza superficial, la cual es en este caso con frecuencia mayor que en el temple directo, pues debido a la temperatura más elevada en el temple directo se da fácilmente mayor cantidad de austenita residual junta a la martensita.

### 3) *Temple con recocido intermedio*

El temple se hace igual que en 2a y 2b, sólo que entre el enfriamiento desde la temperatura de cementación y el calentamiento hasta la temperatura de temple se intercala un recocido por debajo de  $A_{c1}$  con enfriamiento en horno (f). Con este recocido intermedio se consigue una reducción de tensiones, y en parte una

conformación de la cementita, tanto de la cementita intergranular como la cementita laminar de la perlita. Esto tiene particular importancia cuando después de la carburación hay que hacer un maquinado de la pieza.

#### 4) *Doble temple*

El temple se hace aquí en forma de enfriamiento rápido repetido durante dos veces. El primer temple, que se hace desde una temperatura por encima de  $A_{r3}$  del material del núcleo, se realiza a partir de la cementación o después de un nuevo calentamiento. En este último caso el enfriamiento precedente a partir de la cementación se hace de modo análogo al numeral 2), lentamente, enfriamiento en cajas 1a) o en el aire 1b). En el temple directo desde la cementación, la temperatura de ésta, si es inferior a la de temple del núcleo, tiene que aumentarse hasta llegar a dicha temperatura de temple. Este primer temple es aplicado al núcleo y da por resultado una estructura muy fina en este último e impide que aparezca cementita intergranular (1c) o la elimina por completo. Si sólo hay que templar directamente desde la temperatura de cementación el grano tiene que resultar algo más grueso, dado que aquí llega a desaparecer el afino de la estructura del núcleo, que de ordinario se produce por el enfriamiento y luego calentamiento. El enfriamiento desde altas temperaturas da lugar casi siempre a tensiones considerables que no obstante se puede reducir por temple isotérmico cuando se trata de secciones pequeñas. Después del enfriamiento hasta temperatura ambiente (2c) es conveniente intercalar un recocido por debajo de  $A_{c1}$ . Esto permite después del recocido intermedio se lleva a cabo el temple de la zona superficial es decir; desde temperatura  $A_{c1}$ . También en este caso se hace muchas veces el enfriamiento rápido en baños de sales con el fin de disminuir las tensiones. El calentamiento hasta la temperatura de temple de la superficie significa para el núcleo un revenido algo excesivo. Siempre que el núcleo sea pobre en carbono, como sucede en la mayoría de los aceros de cementación, generalmente sólo se disuelve entonces el escaso contenido de perlita y algo de ferrita, pero el tamaño del grano se conserva más o menos invariable. A pesar de esto, es conveniente que el tiempo de permanencia durante el calentamiento sea breve. Cuando el núcleo tiene gran tenacidad, el tratamiento de doble temple produce un granomás

fino en la capa superficial y, por consiguiente, la óptima tenacidad en la zona templada, la cual mejora al evitar la aparición de cementita intergranular.

Un doble temple por el que se logra una estructura francamente fina en el núcleo y también en la capa superficial, descartando tensiones demasiado altas originadas por enfriamiento, consiste en enfriar rápidamente desde el baño de sales en un baño caliente seguido de otro calentamiento y temple a la temperatura adecuada para la capa rica en carbono de la pieza" (JOSE APRAIZ).

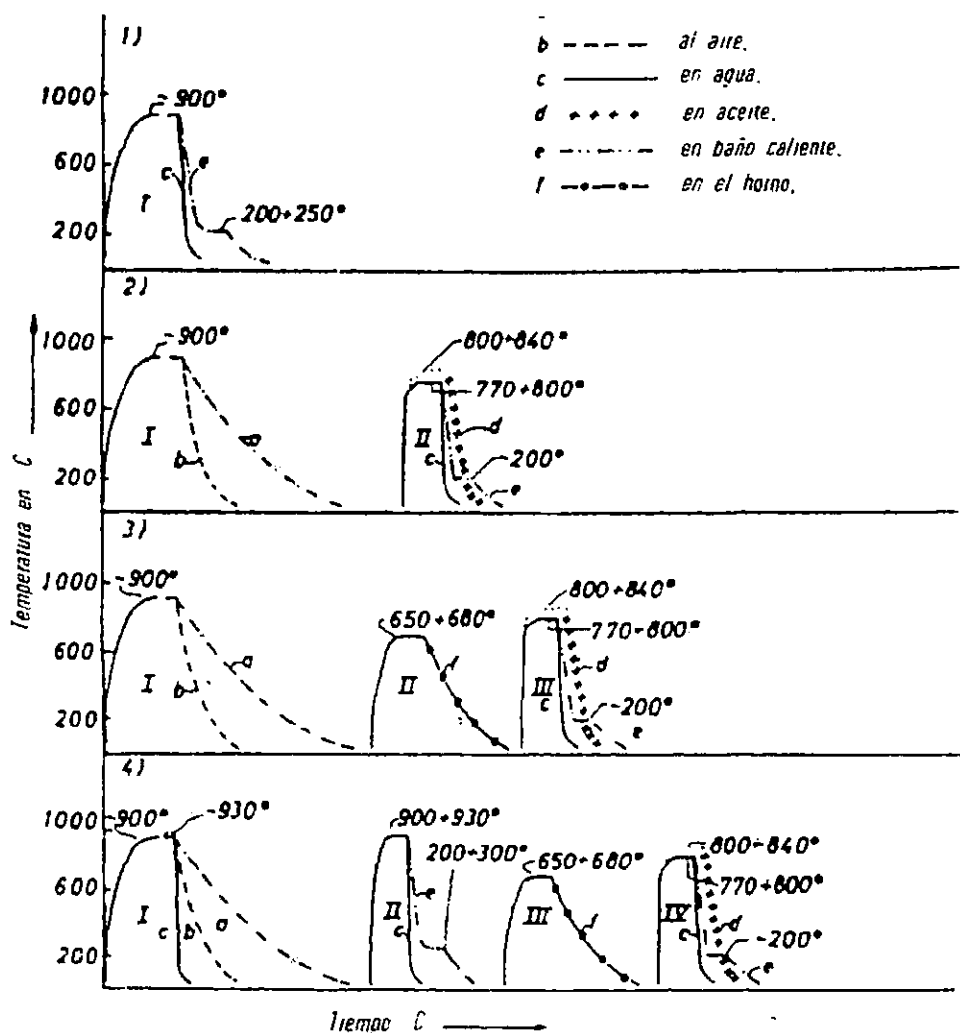


FIGURA 1.36. Distintos tratamientos térmicos en la cementación de los aceros. Esquema de la variación de la temperatura-tiempo.

# CAPÍTULO II

## **2.0 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

En este capítulo se presenta el análisis de dos tipos de aceros en particular, AISI 1020 y 3115 después de un tratamiento termoquímico de cementación sólida.

### **2.1 DISEÑO DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN**

El experimento consiste en la realización del proceso de cementación sólida, en el cual se ven involucrados diferentes factores que permitirán obtener datos experimentales de tiempo versus espesor de capa cementada para 2 tipos de aceros.

Para el diseño del experimento se estudiarán las siguientes variables:

- a) Tipos de aceros
- b) Tipos de mezcla
- c) Tiempo de cementación
- d) Distancia entre probetas

#### **2.1.1 Tipos de aceros**

En la industria se utilizan aceros comerciales de bajo, medio y alto porcentaje de carbono, así como también aceros aleados. Dependiendo de su aplicación así será la selección de estos.

Los aceros con los que se ha experimentado son comunes y de amplia utilidad a nivel industrial en nuestro país, también tienen que cumplir con la característica que sean de bajo contenido de carbono.

Dos aceros que cumplen con estas características son los aceros AISI 1020 y el 3115, que son los aceros que se utilizarán para el experimento.



### 2.1.2 Distancia entre probetas

Uno de los objetivos de esta investigación es determinar la influencia de la distancia entre probetas en el espesor de la capa cementada. Para lograrlo se utilizarán 5 probetas separadas por 4 distancias entre sí, que serán las que se estudiarán, estas distancias son: 5, 7.5, 10 y 12.5mm.

### 2.1.3 Descripción de probetas

Las probetas que se ensayaran serán de forma cilíndrica, ya que su maquinado es más fácil, además por ser de sección uniforme la diferencia en los espesores de capa cementada serán diferentes esencialmente por la influencia de la distancia entre las probetas y las paredes de la caja. Las piezas que se pueden cementar tienen muchas formas geométricas, pero para fines experimentales se seleccionó la geometría antes mencionada. (fig 2.1)

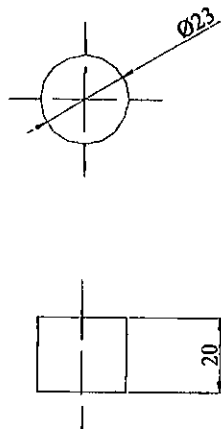


Fig. 2.1. Probeta para realización de cementación sólida

### 2.1.4 Tipos de mezclas

En el apartado 1.3.1.1 literal a1, se menciona que la mezcla carburante esta compuesta por carbón vegetal de abedul o roble y un agente activador donde los principales son los carbonatos y los más utilizados son el carbonato de bario y carbonato de calcio. Aunque en esta investigación se utilizará carbón vegetal de bálsamo que posee características semejantes al abedul y roble, además en nuestro país es más fácil encontrar bálsamo que los antes mencionados, como activador se utilizará carbonato de bario ( $\text{BaCO}_3$ ).

Los granos de carbón serán triturados y tamizados hasta obtener un tamaño de grano de entre 4 mm y 5 mm, luego el carbón pasa por un proceso de secado que consiste en poner dentro del horno el carbón a una temperatura de  $150^\circ\text{C}$  durante 4 horas.

Los porcentajes de mezclas a utilizar en el experimento son:

- 1- Mezcla 90:10 (mezcla M1): Esta mezcla estará compuesta de un 90% en peso de carbón vegetal y un 10% en peso de Carbonato de Bario. A esta mezcla se le llamara mezcla pobre, por el poco contenido de Carbonato de Bario.
- 2- Mezcla 80:20 (mezcla M2): La mezcla M2 estará compuesta de un 80% en peso de carbón vegetal y un 20% en peso de Carbonato de Bario. A M2 se le llamara mezcla intermedia.
- 3- Mezcla 70:30 (mezcla M3): La mezcla M3 estará compuesta de un 70% en peso de carbón vegetal y un 30% en peso de Carbonato de Bario. A M3 se le llamara mezcla rica por ser la que tendrá mayor cantidad de Carbonato de Bario.

### 2.1.5 Tiempo de cementación.

Otra de las variables consideradas en el proceso de cementación solida es el tiempo de cementación, para este proceso en particular se consideraron cuatro tiempos diferentes, los cuales son:

$$t_1 = 4 \text{ h}, t_2 = 6 \text{ h}, t_3 = 8 \text{ h} \text{ y } t_4 = 10 \text{ h}.$$

Es importante mencionar que para todas las variables antes mencionadas, la cementación se hace a temperatura constante, la cual será a 900° C.

### 2.1.6 Determinación del número de Probetas.

Para determinar la cantidad de probetas para la realización del experimento, se debe de tomar en cuenta la cantidad de aceros a estudiar, los tipos de porcentajes de mezclas, tiempos de cementación y distancias entre probetas, a continuación se presenta la cantidad de variables a utilizar y su respectivo simbolo.

A<sub>1</sub>: Acero AISI 1020

A<sub>2</sub>: Acero AISI 3115

M<sub>1</sub>: mezcla 90:10

M<sub>2</sub>: mezcla 80:20

M<sub>3</sub>: mezcla 70:30

d<sub>1</sub>: distancia 1 ( 5 mm)

d<sub>2</sub>: distancia 2 ( 7.5 mm)

d<sub>3</sub>: distancia 3 ( 10 mm)

d<sub>4</sub>: distancia 4 ( 12.5 mm)

En la tabla 1 se presentan las variables a utilizar.

**Tabla 1. Variables del proceso de cementación**

VARIABLES	CANTIDAD
Aceros	2
Mezclas	3
Tiempos	4
Distancia entre probetas	4

Tomando como base el acero A<sub>1</sub> se puede observar que resultan 48 combinaciones diferentes, pero como se tienen dos aceros, será un total de 96 probetas efectivas, el total de probetas para la realización del experimento es de 120, ya que para obtener cuatro distancias entre probetas se necesita una quinta probeta adicional, lo que equivale a 24 probetas más.

### 2.1.7 Diseño de caja para la cementación.

El diseño de la caja para cementación depende, básicamente, de las dimensiones y distribución de las probetas dentro de la caja.

La distribución de las probetas dentro de la caja vistas desde la parte superior será la que se presenta en la figura 2.2.

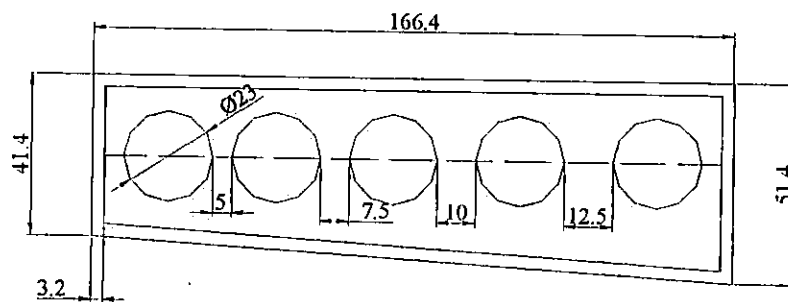


Fig. 2.2 Vista superior de la distribución de las probetas dentro de la caja

Para optimizar los recursos, entre ellos el tiempo de uso del horno, se diseñó la caja de tal forma que dentro de la misma se distribuyan dos filas de probetas (ver fig.2.3), separadas entre ellas por una capa de mezcla carburante.

### Calculo del largo de la caja.

Para calcular el largo de la caja se tomó en cuenta las cuatro distancias entre cada probeta, lo cual constituye un parámetro de diseño y la distancia entre la superficie de la caja y las probetas de los extremos. Considerando que serán cinco probetas con un diámetro (D) de 23 mm, se obtiene una longitud de 115 mm, adicionando los 35 mm como el total de las cuatro distancias de diseño ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ ) más 10 mm de capa de mezcla carburante (E), sumado todo lo anterior se obtiene un total de:

$$L = (D * 5) + (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) + E = 160 \text{ mm}$$

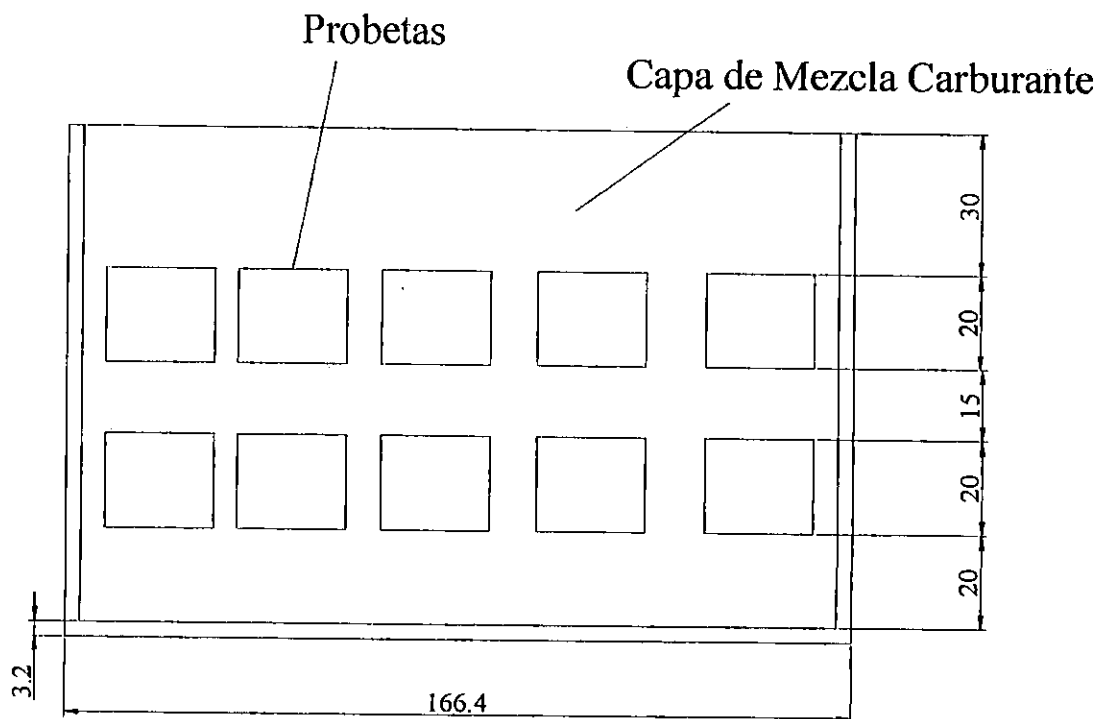


Fig. 2.3 Vista lateral de las probetas dentro de la caja de cementación

### Calculo del ancho de la caja.

La forma de la caja para cementación vista de planta, tiene forma trapecial, ya que uno de sus lados tiene una inclinación respecto a las tangentes de las probetas,

mientras que el lado opuesto es paralelo a las mismas ( ver figura 2.2). El lado más corto se calcula tomando en cuenta el diámetro de la probeta, el cual es de 23 mm más 12 mm entre las paredes laterales de la caja, resultando un ancho total de 35 mm, el lado más grande será de 23 mm más 20 mm entre los laterales de la caja, resultando un total de 45 mm.

### **Calculo del alto de la caja.**

Para el cálculo de la altura se tomará en cuenta el alto de las probetas y los espesores de mezcla carburante, los cuales se describen a continuación:

En el fondo de la caja se coloca una capa de mezcla carburante compactada entre 20 mm y 30 mm, sobre la cual se coloca una fila de probetas, luego sobre ésta se coloca otra capa de mezcla carburante de 35 mm a 45 mm de espesor para compensar su consumo. Considerando estos parámetros, la altura total de la caja fue de 65 mm.

## **2.2 REALIZACIÓN DE LA CEMENTACIÓN DE PRUEBA.**

El objetivo de realizar la cementación de prueba fue para determinar como varían las diferentes variables involucradas en el proceso y el consumo de mezcla carburante que se tendrá en cada Tratamiento Termoquímico de Cementación (TTQ-C).

La mezcla utilizada en la cementación de prueba fue de 90:10 con tiempo de 10 h, se procedió a colocar las piezas dentro de la caja en el dispositivo de fijación para evitar que se desplazaran o que se giraran y así asegurase de que los lados de la probeta a analizar eran los que realmente estaban frente a la otra probeta, luego se procedió a rellenar la caja con carbón, se obtuvo un volumen de carbón a utilizar, el cual es el 90% en peso de la mezcla carburante total. Los datos obtenidos son los siguientes:

$P_{\text{carbón}} = 109.6 \text{ g}$ , este corresponde al 90% del peso de la mezcla, por regla de tres se obtiene el valor para el 100% el cuál es  $X = 121.77 \text{ g}$ .

El porcentaje de carbonato de bario ( $\text{BaCO}_3$ ) será el 10% de este peso calculado.

$$121.77 * 0.1 = 12.17 \text{ g de } \text{BaCO}_3$$

Después de realizada la prueba, se pesó la mezcla carburante, obteniéndose un valor de:  $P = 103 \text{ g}$ .

Con estos valores se determinó el consumo de mezcla carburante de la siguiente forma.

$$\rho_{\text{mezcla}} = 118 \times 10^4 \text{ g/m}^3$$

$$\rho = m / v$$

$$v = m / \rho$$

$$v_1 = 121.77 \text{ g} / 118 \times 10^4 \text{ g/m}^3 = 1.031 \times 10^{-4} \text{ m}^3; \quad v_1: \text{ volumen inicial}$$

$$v_2 = 103 \text{ g} / 118 \times 10^4 \text{ g/m}^3 = 8.72 \times 10^{-5} \text{ m}^3; \quad v_2: \text{ volumen final}$$

### 2.2.1 Determinación del consumo de la mezcla carburante.

El volumen consumido es:

$$V_{\text{cons}} = v_1 - v_2 = 1.031 \times 10^{-4} \text{ m}^3 - 8.72 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 15.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$15.9 \times 10^{-6} = AY \quad \text{donde } A = \text{area de la base de la caja}$$

$$Y = \text{consumo de mezcla en función de la altura}$$

Calculo del área:

$$A = (160)(35) + \frac{1}{2}(10)(160) = 6.4 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$A = 6.4 \times 10^3 \text{ mm}^2 = 6.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Y = 15.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / 6.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Y = 2.48 \approx 2.5 \text{ mm}$$

Asumiendo que el consumo en la parte superior y en la parte inferior, son iguales y que el volumen de las probetas se mantiene constante, el espesor de la capa carburante total que se consumió es de 2.5 mm; por lo que se determina que los espesores utilizados en la parte inferior y superior de las probetas, garantiza que éstas permanecerán inmersas en la mezcla carburante.

Entre las probetas se colocó una capa de mezcla carburante, por lo que las dimensiones de la caja de cementación se mantendrán iguales a las de la figura 2.3, a excepción de su altura, la cual será incrementada 40 mm, teniendo una altura total de 105 mm. Además, la caja debe llevar su respectiva tapadera, cuyos bordes se cubren con arcilla refractaria o arena de río, para este caso se utilizó arena de río. El material utilizado para la construcción de la caja es una lámina de hierro de 3.175 mm de espesor.

#### *Sujeción de probetas.*

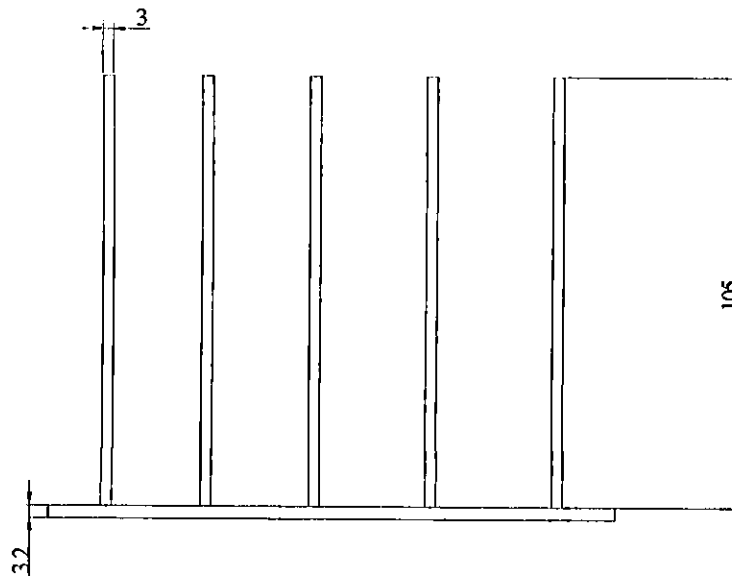
Es determinante para un apropiado análisis, mantener la misma ubicación de las probetas, esto se logra colocando grapas entre ellas para evitar que éstas giren pero sin impedir su movimiento axial ó vertical simultaneo con el consumo de mezcla carburante, este consumo genera que el desplazamiento de las probetas no sea paralelo al consumo de carburante, para evitar este efecto y garantizar las distancias entre las probetas, se coloca una base con pines dentro de la caja ( ver figura 2.4)

#### **2.2.2 Calibración del horno**

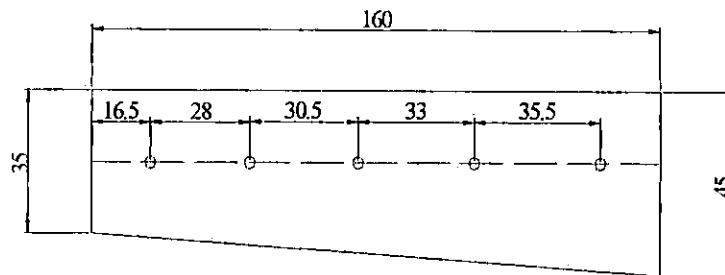
En todo proceso experimental los instrumentos y equipos a utilizar deben ser calibrados a fin de reducir el margen de error en la lectura y obtención de datos.

El horno utilizado en el experimento se calibró con una termocupla, obteniéndose los resultados de la tabla 2, la grafica de estos resultados se muestra en la figura 2.5.





(a)



(b)

Fig. 2.4. a) Vista lateral de la base con sus respectivas espigas de sujeción.  
b) Vista superior de la base.

**Tabla 2. Resultados de calibración del horno con termocupla**

Tiempo, min.	$T_s$ , °C	$T_T$ , °C
30	100	120
60	200	203.89
90	300	305
115	400	401.11
137	500	502.78
156	600	600.6
181	700	702.78
211	800	801.67
241	900	900.6
246	903	901.12
251	910	910.6
261	930	930.6
276	955	955.55

Donde:

$T_s$ : Temperatura leída en el horno.

$T_T$ : Temperatura de termocupla.

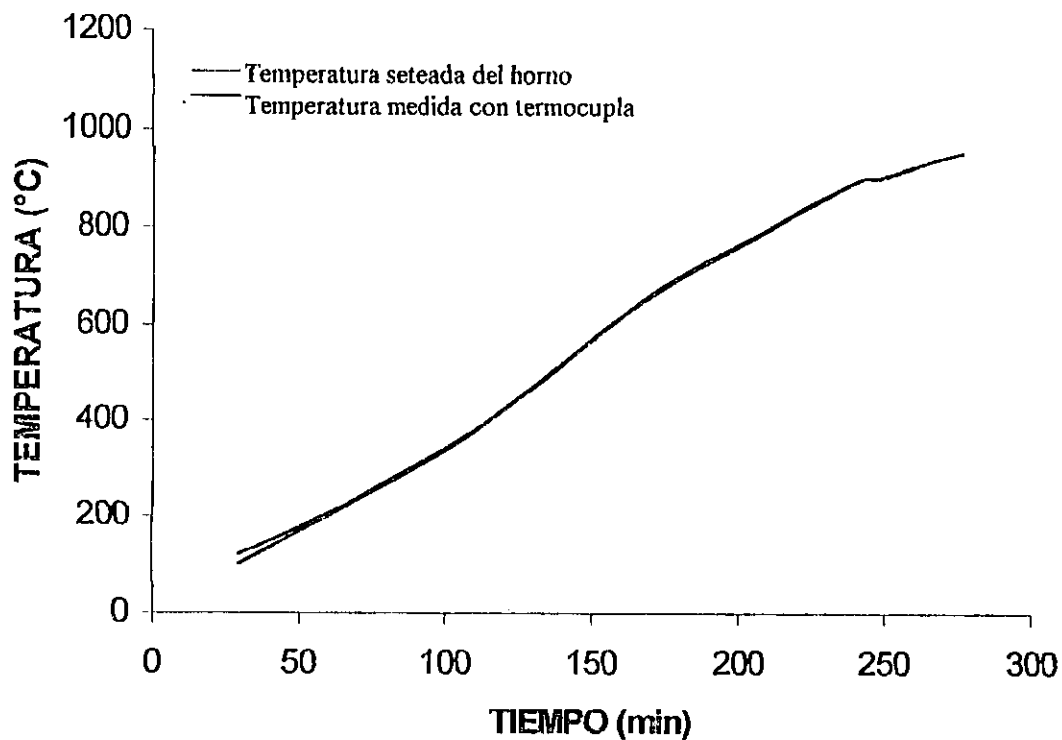


Fig. 2.5. Gráfica de comparación entre temperatura de horno y termocupla

## 2.3 REALIZACIÓN DE LA CEMENTACIÓN.

El proceso que se siguió en el experimento consta de los siguientes pasos:

- Limpieza de probetas
- Preparación de mezclas carburantes
- Distribución de probetas dentro de la caja
- TTQ-C de probetas
- Proceso post-cementación

### 2.3.1 Limpieza de probetas.

Previo a la cementación, es necesario eliminar cualquier tipo de impureza que se encuentre presente en la superficie de las piezas; el proceso que se siguió para eliminar las impurezas es un lavado con soda cáustica al 5%.

### 2.3.2 Preparación de mezclas.

Los diferentes pesos de carbón vegetal y carbonato de bario son los que se dan en la tabla 3:

**Tabla 3. Peso del carbón vegetal y el carbonato de bario para cada mezcla.**

MEZCLA	CARBON (g)	CARBONATO DE BARIO(g)
M <sub>1</sub>	152.25	16.9
M <sub>2</sub>	152.25	38.1
M <sub>3</sub>	152.25	65.3

El carbón vegetal y el carbonato de bario se mezclan uniformemente.



### **2.3.3 Distribución de probetas dentro de la caja.**

Se colocó una capa de mezcla carburante de 20 mm de espesor y sobre esta la primera fila de probetas, luego otra capa de carburante de 15 mm de espesor y la segunda fila de probetas, finalmente una capa de 30 mm de mezcla carburante.

#### *TTQ-C de probetas.*

La caja de cementación fue ubicada exactamente al centro de la cámara del horno, a una temperatura de 900 °C. Los tiempos de permanencia dentro del horno están predefinidos por los parámetros de diseño del experimento.

### **2.3.4 Proceso post-cementación.**

Todas las probetas se llevaron desde la temperatura de cementación hasta la temperatura ambiente, por un enfriamiento al aire libre (normalizado).

## **2.4 PREPARACIÓN DE PROBETAS PARA ANÁLISIS METALOGRÁFICO**

En el proceso de preparación de probetas se involucran los siguientes pasos:

- Marcado de probetas
- Corte de probetas
- Embutido
- Pulido
- Ataque químico

### **2.4.1 Marcado de probetas**

Las probetas se marcaron utilizando punzones con una numeración del 1 hasta el número 5, identificando estos la ubicación de las probetas y el tipo de acero.

Para identificar los dos tipos de aceros se marcó con doble numeración en la parte superior e inferior de la probeta del acero AISI 3115 y con un sólo dígito el acero AISI 1020.

Para poder identificar los puntos de análisis se tomó como referencia los agujeros utilizados como parte del mecanismo de sujeción, representando estos los puntos perpendiculares a las distancias entre cada probeta.

#### **2.4.2 Corte de probetas**

Las probetas fueron cortadas en una máquina cortadora de disco abrasivo destinada especialmente para este objetivo (ver figura 2.6), el espesor de corte fue de aproximadamente de 5 mm. El total de cortes por cada probetas fue de cuatro. Durante el corte en la máquina el avance fue muy lento acompañado simultáneamente de abundante refrigerante (taladrina), esto con el fin de que la probeta no se calentara y no alterara la micro estructura del acero cementado, lo cual llevaría a la obtención de resultados erróneos.

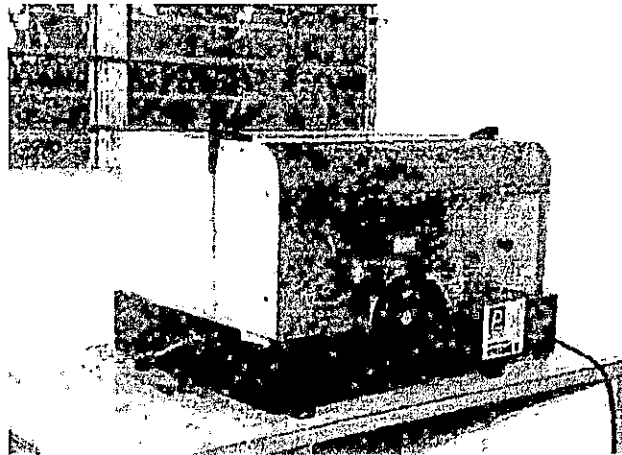


Fig. 2.6 Máquina cortadora de probetas con disco abrasivo.

### 2.4.3 Embutido

Una vez cortada las probetas se procedio con el embutido de éstas. Con este propósito se utilizó resina poliester transparente que facilitó además la identificación de las probetas.

La resina poliester se encuentra en estado líquido y se le agrega un catalizador para acelerar el endurecimiento, la mezcla resina catalizador es vertida en un molde cilíndrico que contiene en el fondo las probetas que se embutirán.

El tiempo de solidificación es de aproximadamente de 12 horas, lo cual depende de la cantidad de catalizador utilizado.

Algunas de las probetas se embutieron con resina fenolica utilizando una máquina embutidora, que consiste en un cilindro de diámetro definido y un embolo que se desplaza dentro de este, comprimiendo a altas presiones la resina fenolica junto con la probeta a embutir, calentando además el material por medio de una resistencia eléctrica a temperaturas superiores a los 130 °C y enfriando el sistema luego con agua a temperatura ambiente, después de un tiempo prefijado por un controlador de tiempo instalado en la máquina como se puede observar en la figura 2.7.



Fig. 2.7 Máquina embutidora de probetas.

Para identificar las probetas embutidas se utilizó una nomenclatura de cinco variables las cuales son:  $H_n A_n M_n X_n t_n$  donde:

$H_n$ : TTQ-C donde n es el correlativo

$A_n$ : Acero tipo n

$M_n$ : Mezcla n utilizada

$X_n$ : Número de probeta

$t_n$ : Tiempo de TTQ-C.

De las cinco probetas que se tenían por cada TTQ-C, se embutieron solamente la probeta número 2 y la probeta número 4, ya que al analizar la primera se estaría determinando la influencia en el espesor de la capa cementada de las distancias  $d_1$  y  $d_2$ , y al analizar la segunda la influencia de las distancias  $d_3$  y  $d_4$ .

#### **2.4.4 Pulido**

El pulido mecánico se realiza por la abrasión de la superficial de las probetas con partículas más duras, de tamaños sucesivamente decrecientes, este comprende tres etapas, las cuales son:

- a) Desbastado
- b) Pulido grueso
- c) Pulido final

*Desbastado.* Posteriormente al embutido de las probetas se procede al desbaste mecánico con una serie papeles de carburo de silicio (lija) bajo agua, el número de dichas lijas utilizadas para este desbaste son: 100, 200, 220, 320, 400, 500 y 600.

*Pulido grueso.* El pulido grueso se realiza con papeles de carburo de silicio número 1200 y 1500 sucesivamente.

Estas dos operaciones se realizaron en una mesa de lijado, la cual gira a altas revoluciones, durante este proceso se utilizó abundante agua para evacuar las partículas de metal y de lija que se desprenden durante el proceso de pulido y así evitar que estas mismas rayen la superficie pulida.

La mesa de lijado en la que se realizan estas operaciones se presenta en la figura 2.8. *Pulido final.* El pulido final de la superficie (pulido de espejo), se logra utilizando alúmina ( $Al_2O_3$ ) de un tamaño de partícula entre 0 a 1  $\mu m$  sobre un paño afelpado.

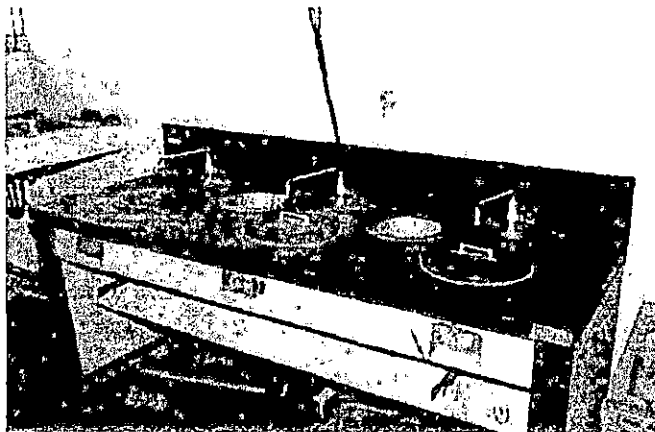


Fig. 2.8 Mesa lijadora de probetas.

El pulido final se realizó en la máquina pulidora vibradora que se puede observar en la figura 2.9. En dicha máquina se colocaron las probetas en grupos de ocho, sujetas a un contra peso que ejercen presión sobre las probetas y después de cierto tiempo (2 horas para este caso) se obtiene un pulido de espejo como acabado final.



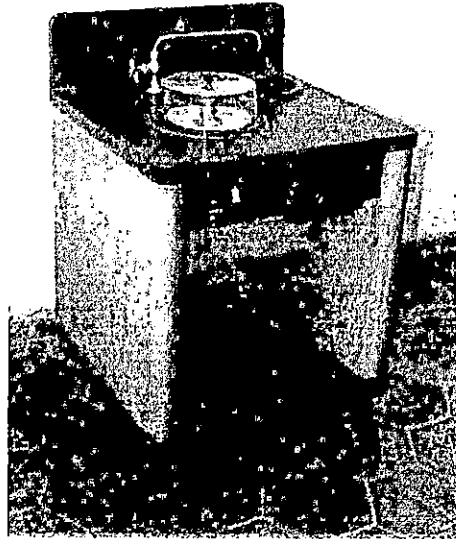


Fig. 2.9 Máquina pulidora vibradora.

**2.4.5 Ataque químico.** Después de dar un pulido de espejo a las probetas es necesario un ataque químico con el propósito de revelar las fases presentes después del tratamiento termoquímico del acero.

El reactivo utilizado para el ataque químico fue nital al 3% de concentración que es un compuesto de ácido nítrico (3%) diluido en alcohol que compone el 97% restante.

Después de esto las probetas están listas para analizarlas metalográficamente, esto se hace en un microscopio óptico. Figura 2.10.

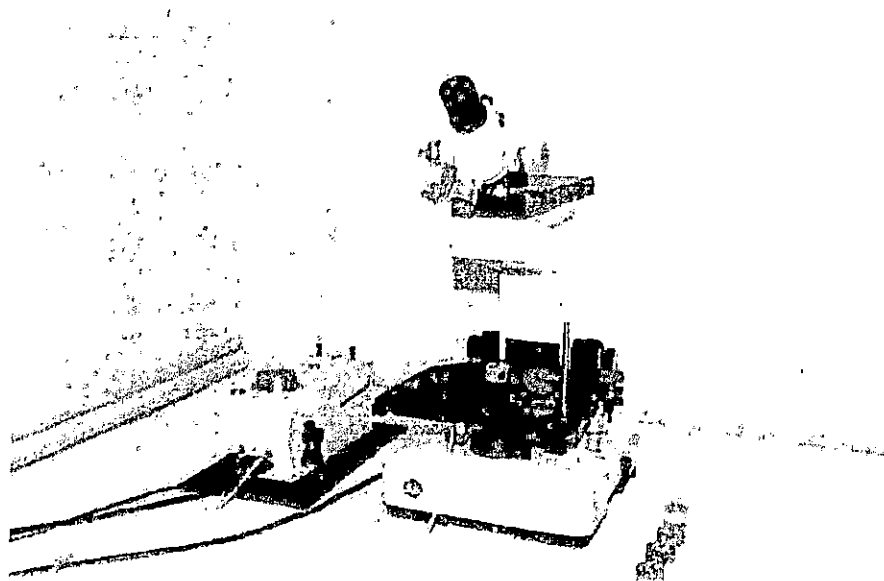


Fig. 2.10 Microscopio para análisis metalográfico

## **2.5 MEDICIÓN DE LA CAPA CEMENTADA**

En el apartado 1.3.1.9 se presentaron los diferentes métodos para medir el espesor de capa cementada, considerando los recursos con que se cuentan para la realización del experimento, el método más factible es el de prueba de dureza.

Para utilizar este método es necesario que las probetas estén templadas, ya que así se obtiene la dureza máxima del acero; el procedimiento que se siguió para determinar los espesores de capa cementada es el siguiente:

Se llevaron dos probetas, una de cada acero, a la temperatura de 875 °C durante un tiempo de 45 minutos, luego se enfriaron en aceite ( temple en aceite ). Se procedió a realizar ensayos de micro dureza para determinar el espesor de la capa para la cual dicha dureza es 50 HRC (dureza intermedia de la zona de transición según se mencionó anteriormente), luego se ensayó otra probeta sin templar midiendo la

dureza para el mismo espesor encontrado en la pieza templada, los resultados fueron los siguientes.

**Tabla 4. Datos de espesores de capa cementada.**

Acero	Con TTQ-C y temple en aceite		Con TTQ-C y sin temple	
	Espesor, mm	Dureza, HRC	Espesor, mm	Dureza, HRC
AISI 1020	0.74	50	0.74	29.9
AISI 3115	1.11	50	1.11	22.3

Las durezas fueron obtenidas con un microdurómetro Vickers con una carga de 200g, utilizando después una tabla de conversión (anexo 1) para encontrar la dureza en HRC. Utilizando estos patrones el procedimiento seguido es el de buscar estas durezas en las probetas no templadas y luego medir el espesor para las mismas; para medir estos espesores se utilizó la escala graduada del microscopio previamente calibrada con una escala patrón de un milímetro, donde 10 unidades del ocular del microscopio, equivale a 0.233 mm en magnificación de 500x y 8.2 unidades del ocular del microscopio, equivale a 1 mm en magnificación de 100x. Se hizo un barrido de dureza en las probetas que se templaron, obteniéndose los siguientes resultados.

### 2.5.1 Patrones de comparación

A continuación se presentan los datos obtenidos para el acero AISI 1020 y AISI 3115 al hacer un barrido de dureza a los dos patrones que fueron templados en aceite.

#### Acero AISI 1020

Los valores de dureza y la distancia a la que fueron tomados se muestran en la tabla 5 y la grafica de la tendencia de todos estos puntos se puede ver en la figura 2.11.

**Tabla 5. Durezas y espesores obtenidos**

DUREZA(HRC)	ESPELOR DE CAPA(mm)
64.30	0.22
63.00	0.48
57.30	0.75
50.50	0.88
35.90	1.10
28.01	1.30
27.10	1.70
24.70	2.05
21.60	2.50
20.00	2.90
20.00	3.00

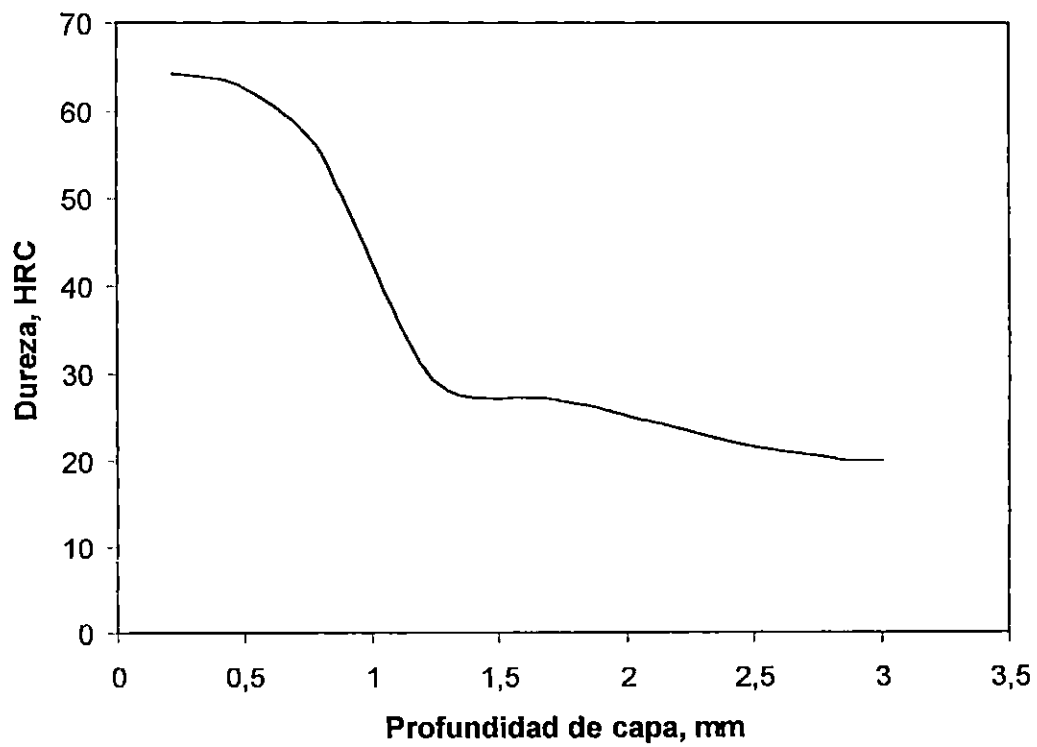


Fig. 2.11. Gráfica Dureza vs. Espesor de capa cementada.

### Para acero 3115

Los valores de dureza y la distancia a la que fueron tomados se muestran en la tabla 6 y la grafica de la tendencia de todos estos puntos se puede ver en la figura 2.12.

**Tabla 6. Durezas y espesores obtenidos.**

DUREZA(HRC)	ESPEJOR DE CAPA(mm)
67.67	0.60
62.50	0.85
49.10	1.06
43.50	1.25
29.80	1.59
24.83	1.82
22.67	2.10
19.80	2.40
19.80	3.00

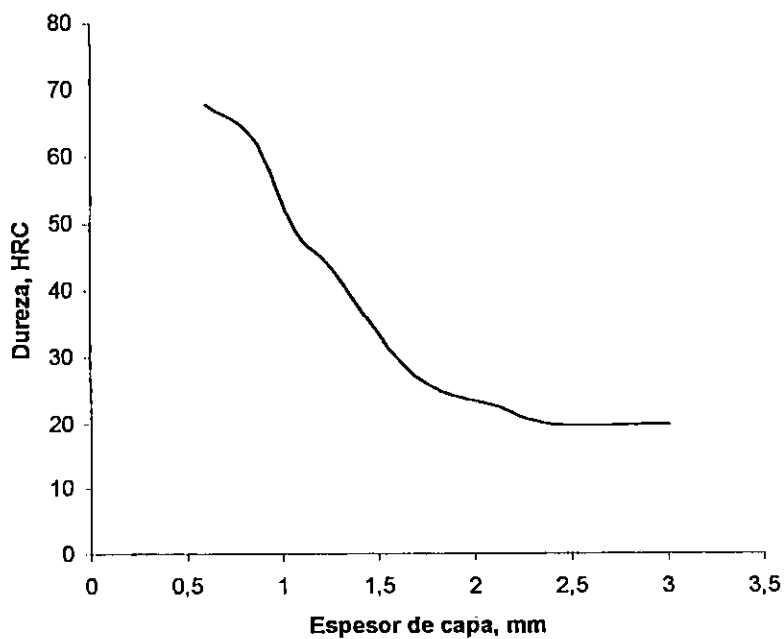


Fig. 2.12. Gráfica Dureza vrs. Espesor de capa cementada.

Para tener una idea de la forma de las indentaciones se muestra en el anexo 2, una foto micrografía, de un acero con la huella del rombo que se forma en la probeta al aplicar la carga de 200 g por el durometro Vickers.

## **2.6 ESTUDIO METALOGRAFICO**

A continuación se muestran una serie de foto micrografías de los aceros AISI 1020 y AISI 3115, con un aumento de 100X, donde se puede observar la capa cementada para las diferentes distancias entre probetas. La capa cementada puede observarse del lado derecho de cada una de las foto micrografías caracterizándose por una región oscura disminuyendo conforme se desplaza hacia la izquierda y haciéndose mas clara hasta llegar al material base ( lado izquierdo ). La zona oscura ( capa cementada ) se conoce como zona hipereutectoide, siguiendo después una zona de transición conocida como zona eutectoide y finalmente la zona del material base que es la zona hipoeutectoide. En las foto micrografías puede observarse una matriz ferrítica con granos de perlita para el acero AISI 1020 y una matriz ferrítica con granos de finos de perlita para el acero AISI 3115. Las foto micrografías se muestran para cada una de las mezclas y sus respectivos tiempos.

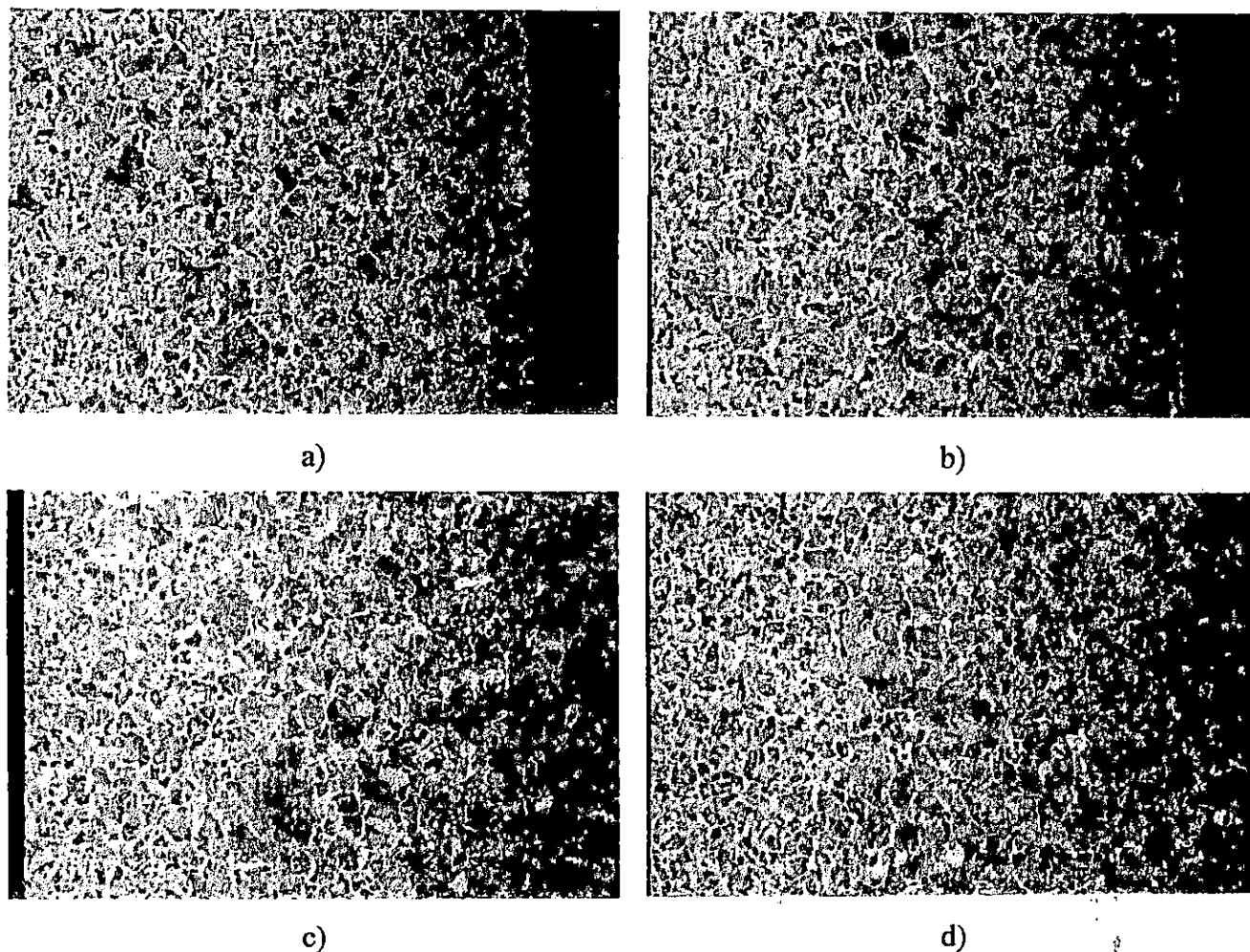


Fig. 2.13 Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 4 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 90:10. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

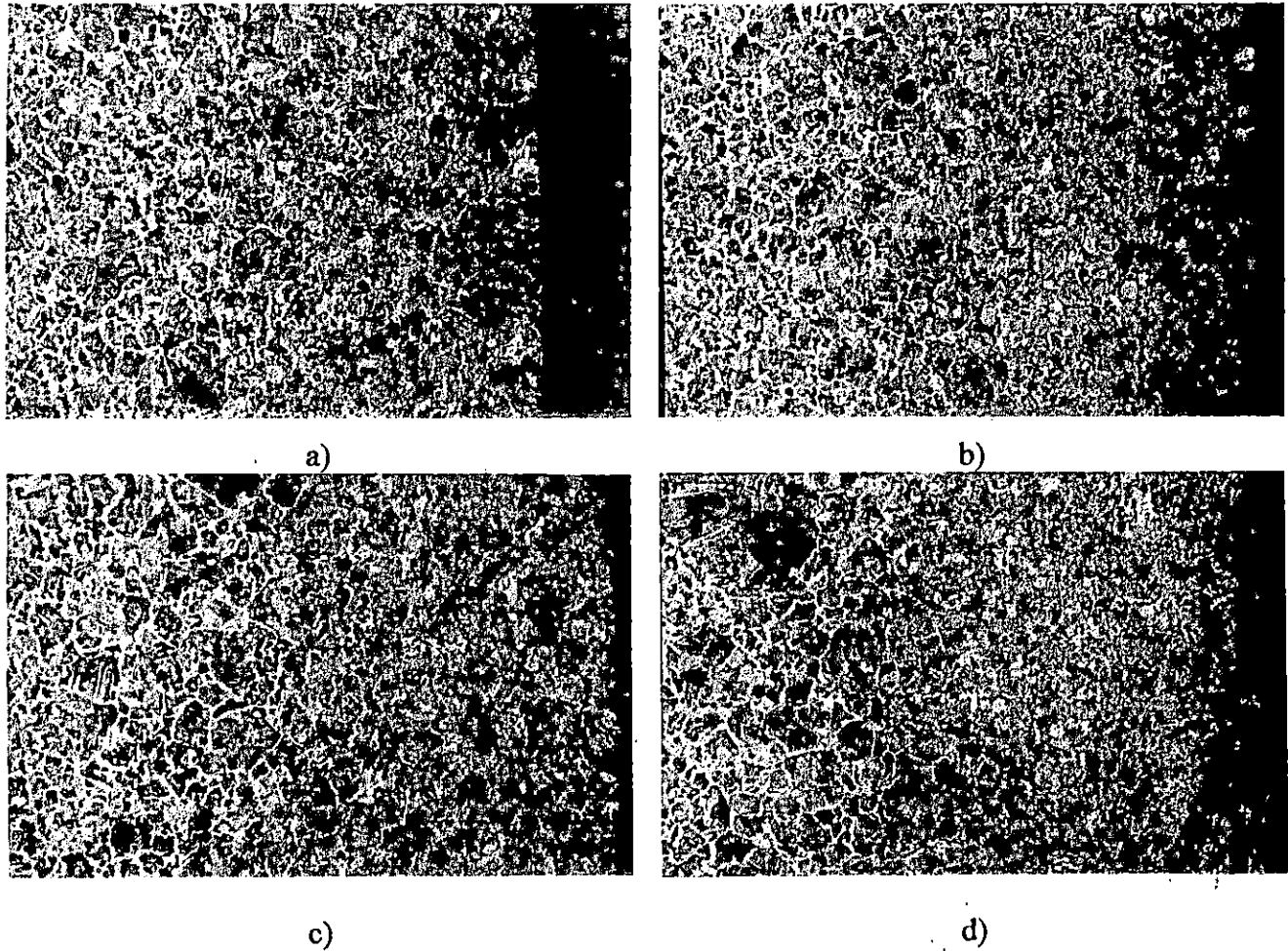


Fig. 2.14. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 6 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 90:10. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.



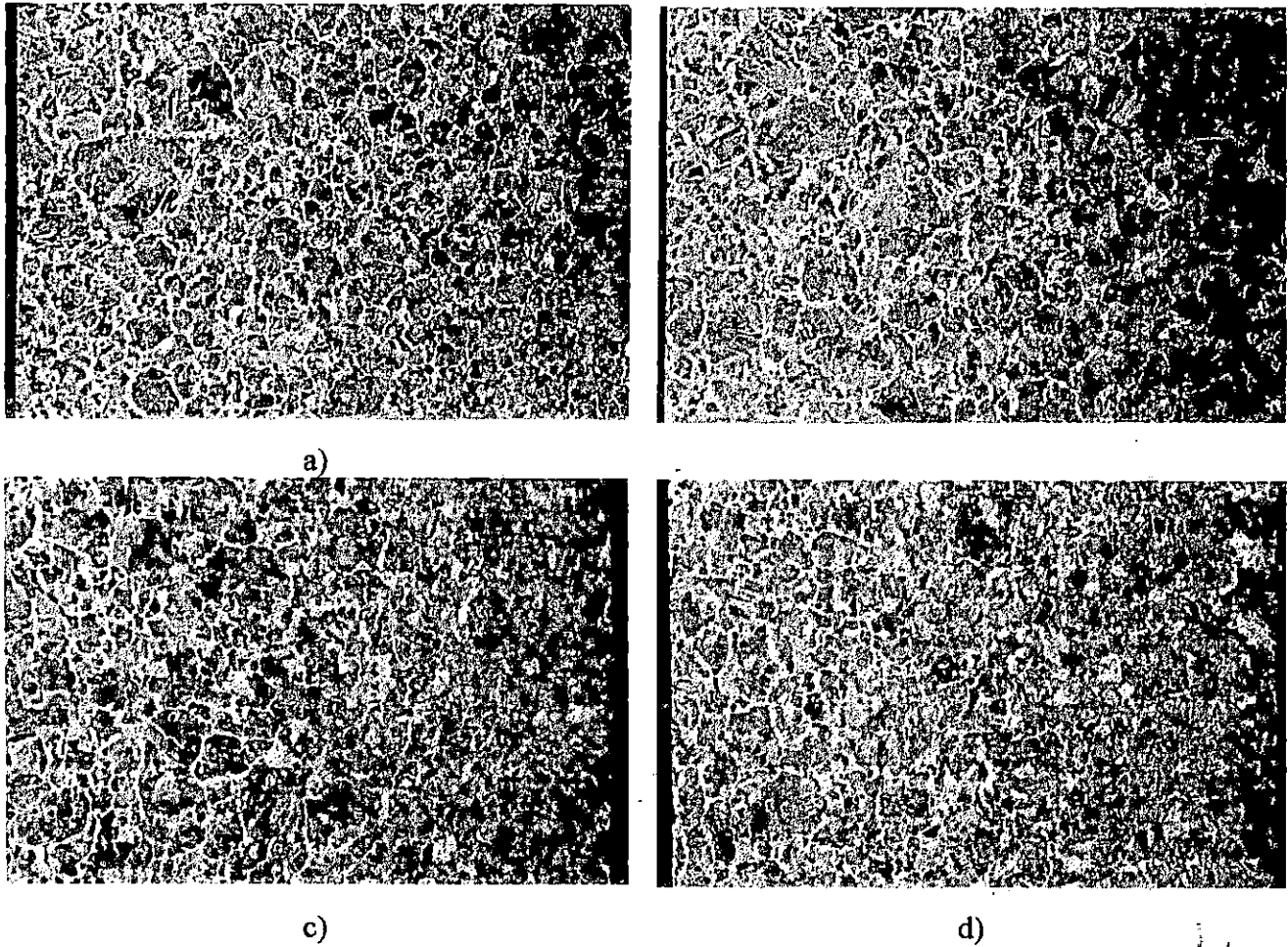


Fig. 2.15. Foto micrografias de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 8 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 90:10. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

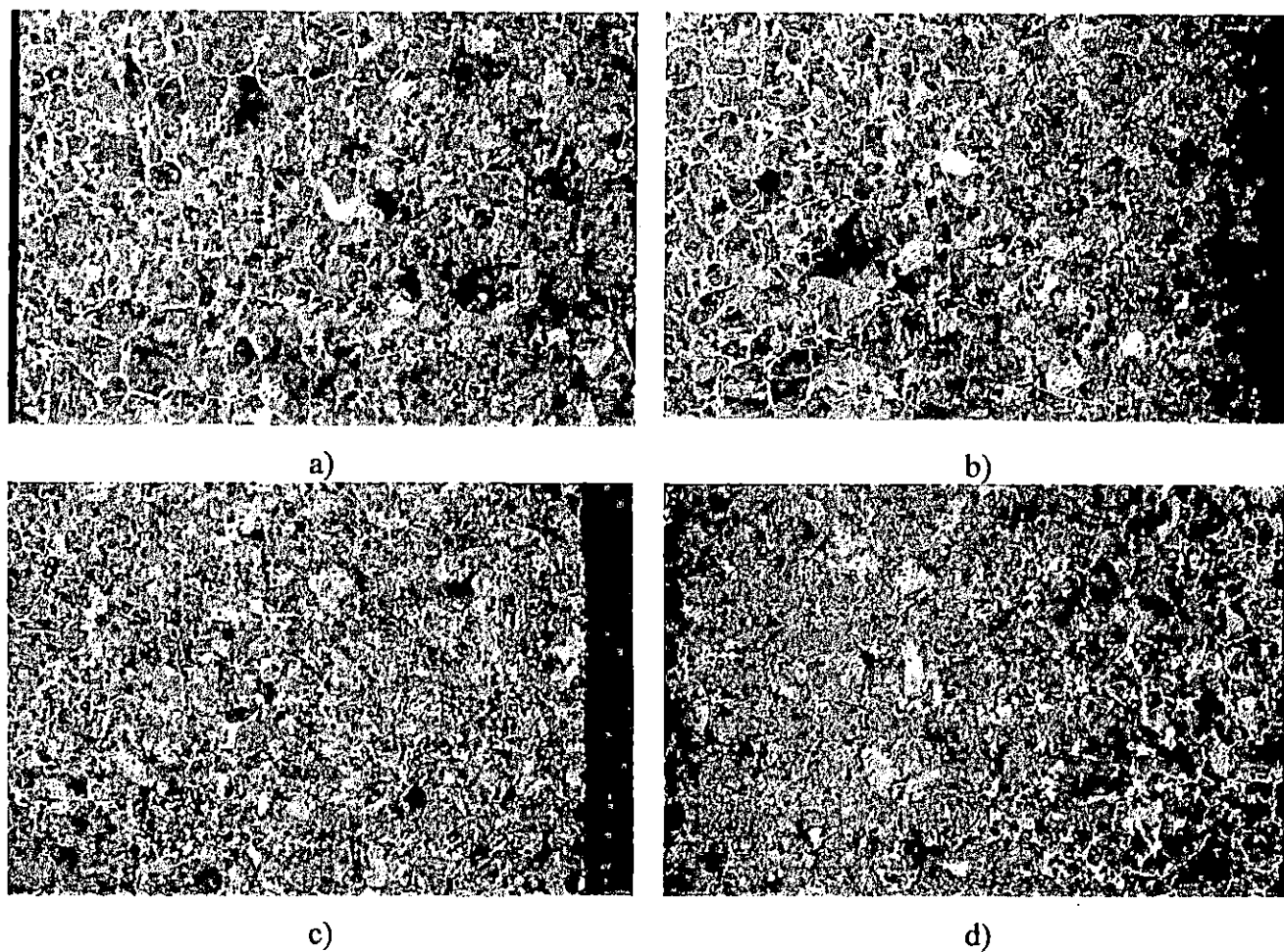


Fig. 2.16. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 10 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 90:10. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

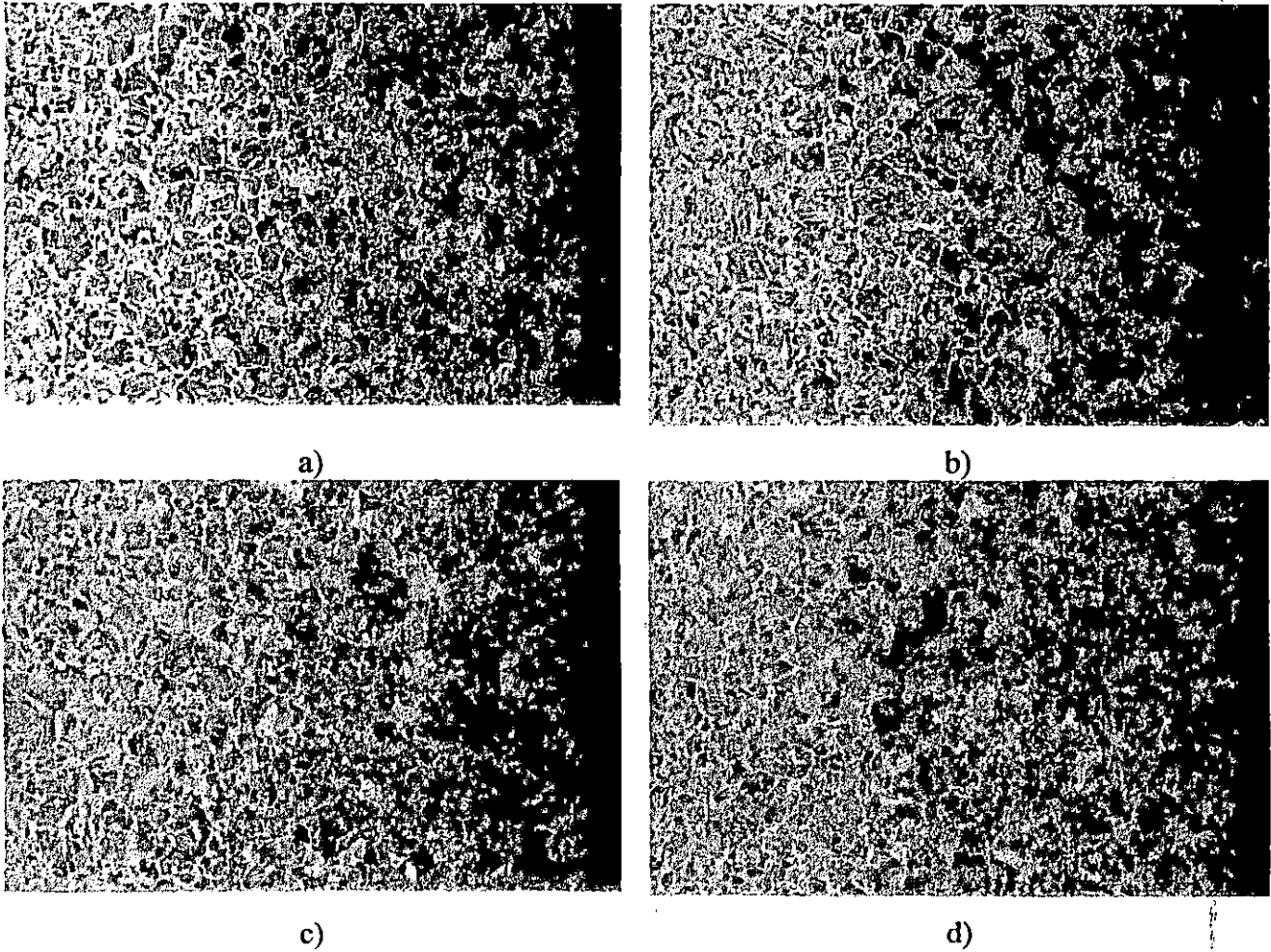


Fig. 2.17. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 4 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 80:20. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

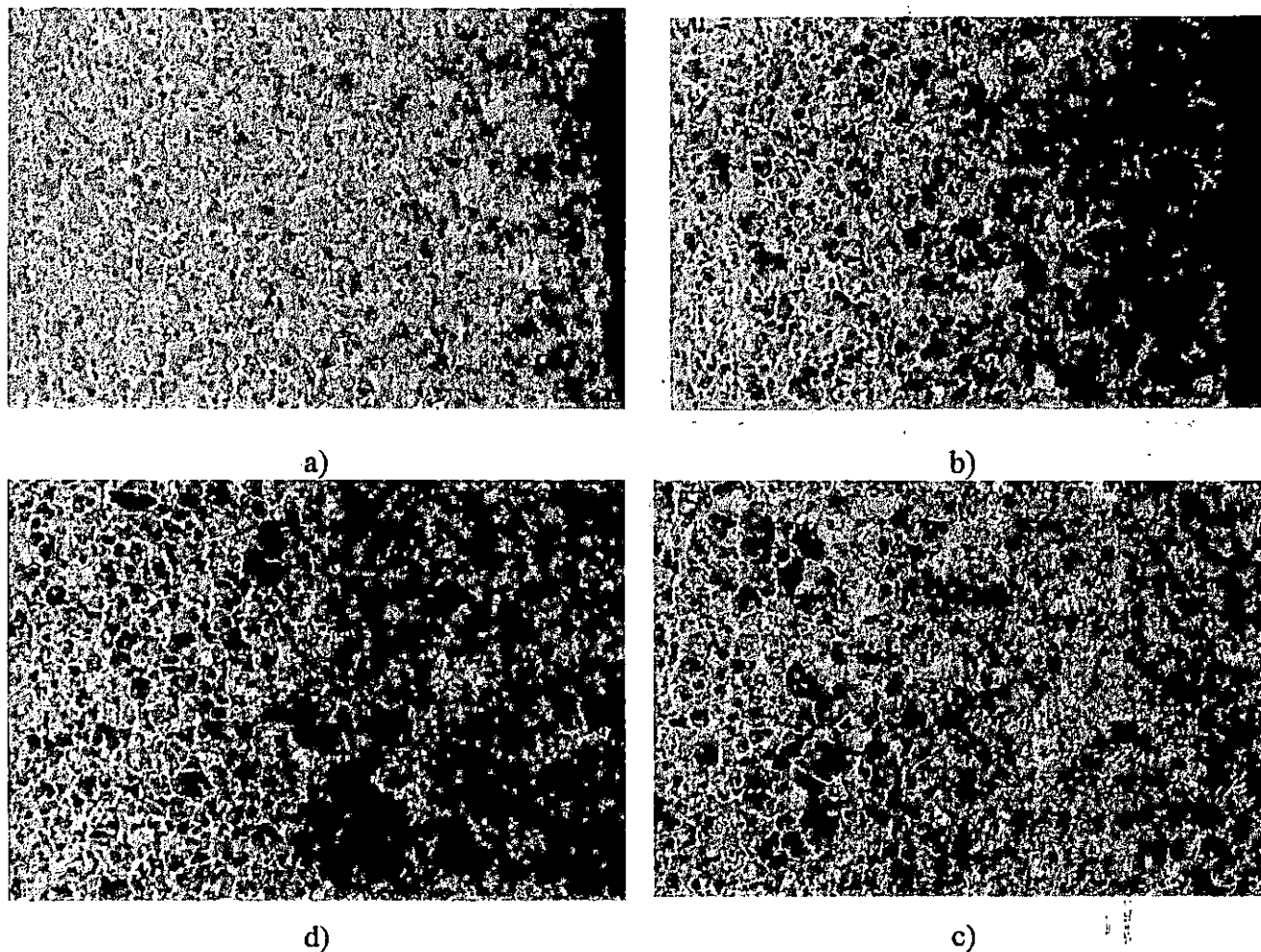


Fig. 2.18. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 6 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 80:20. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

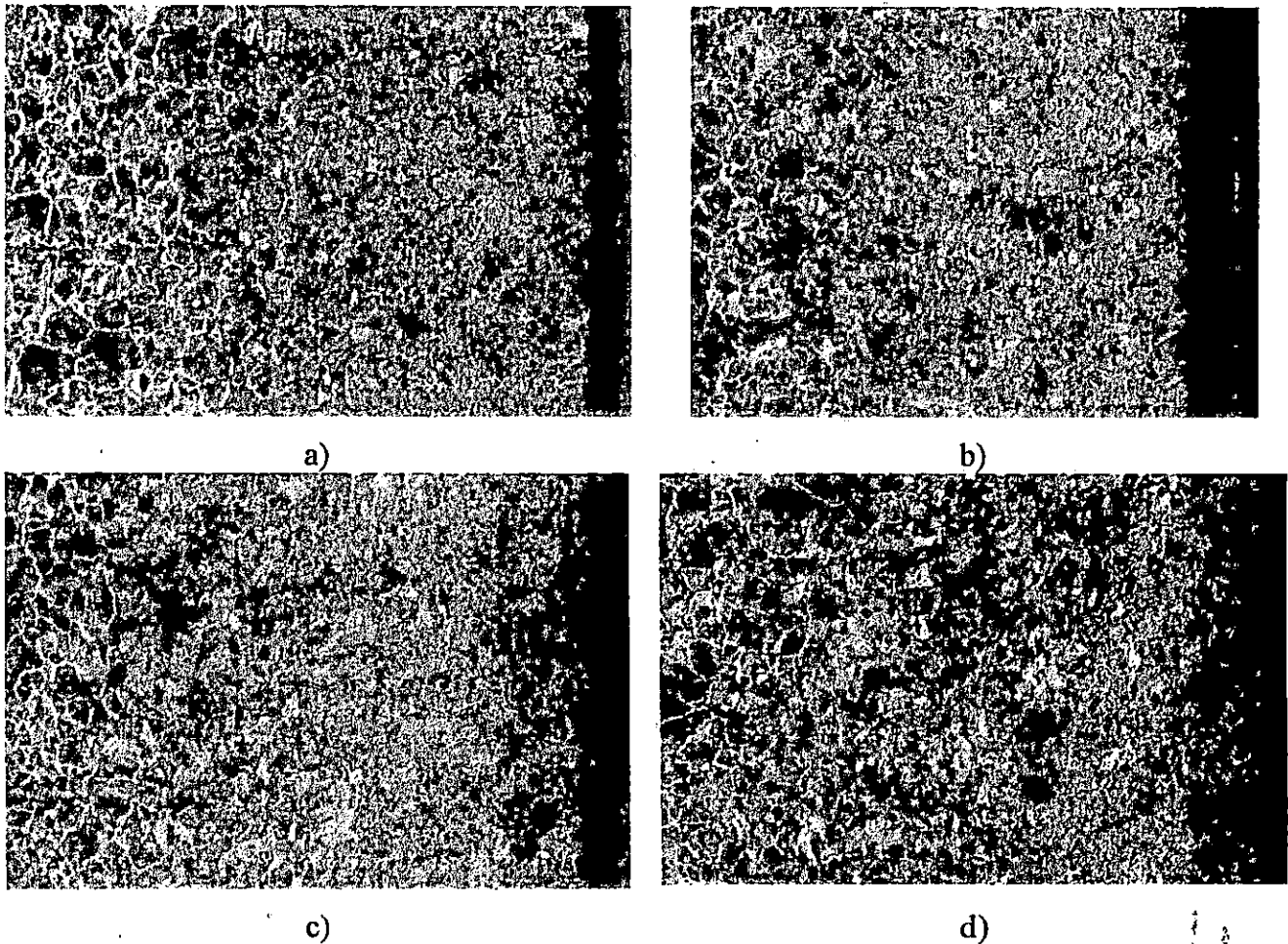


Fig. 2.19. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 8 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 80:20. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

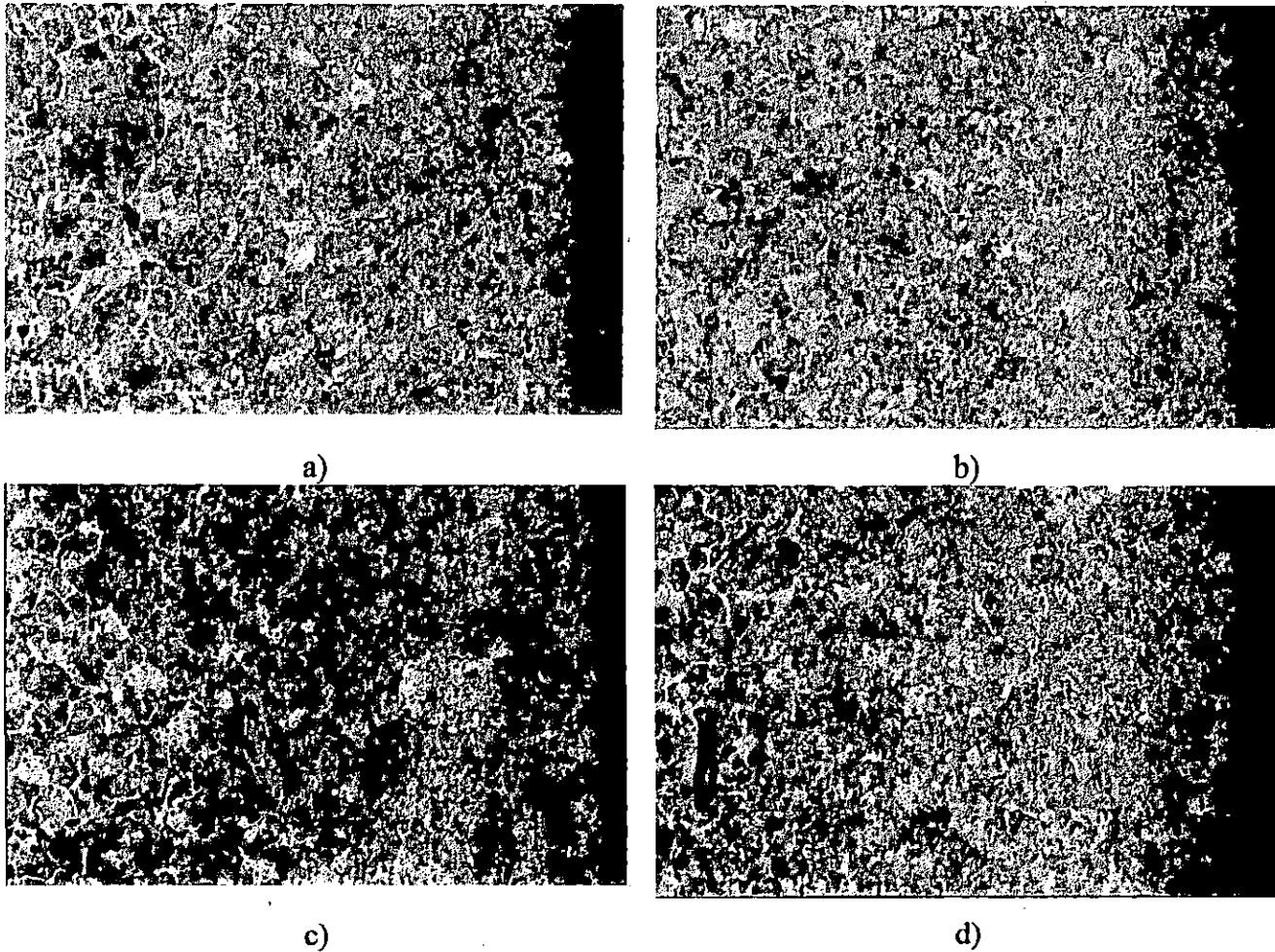


Fig. 2.20. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 10 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 80:20. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.



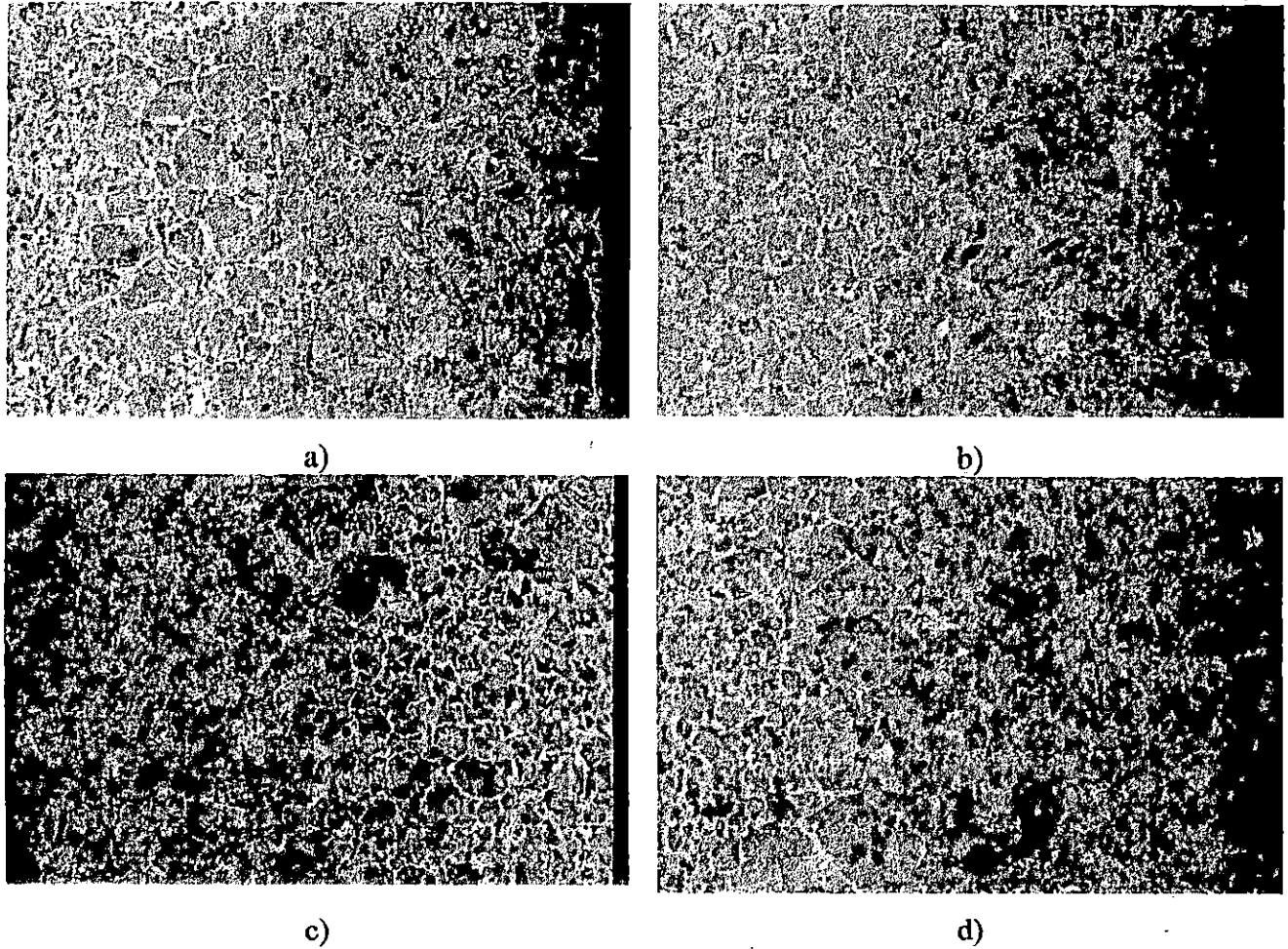


Fig. 2.21. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 4 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 70:30. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

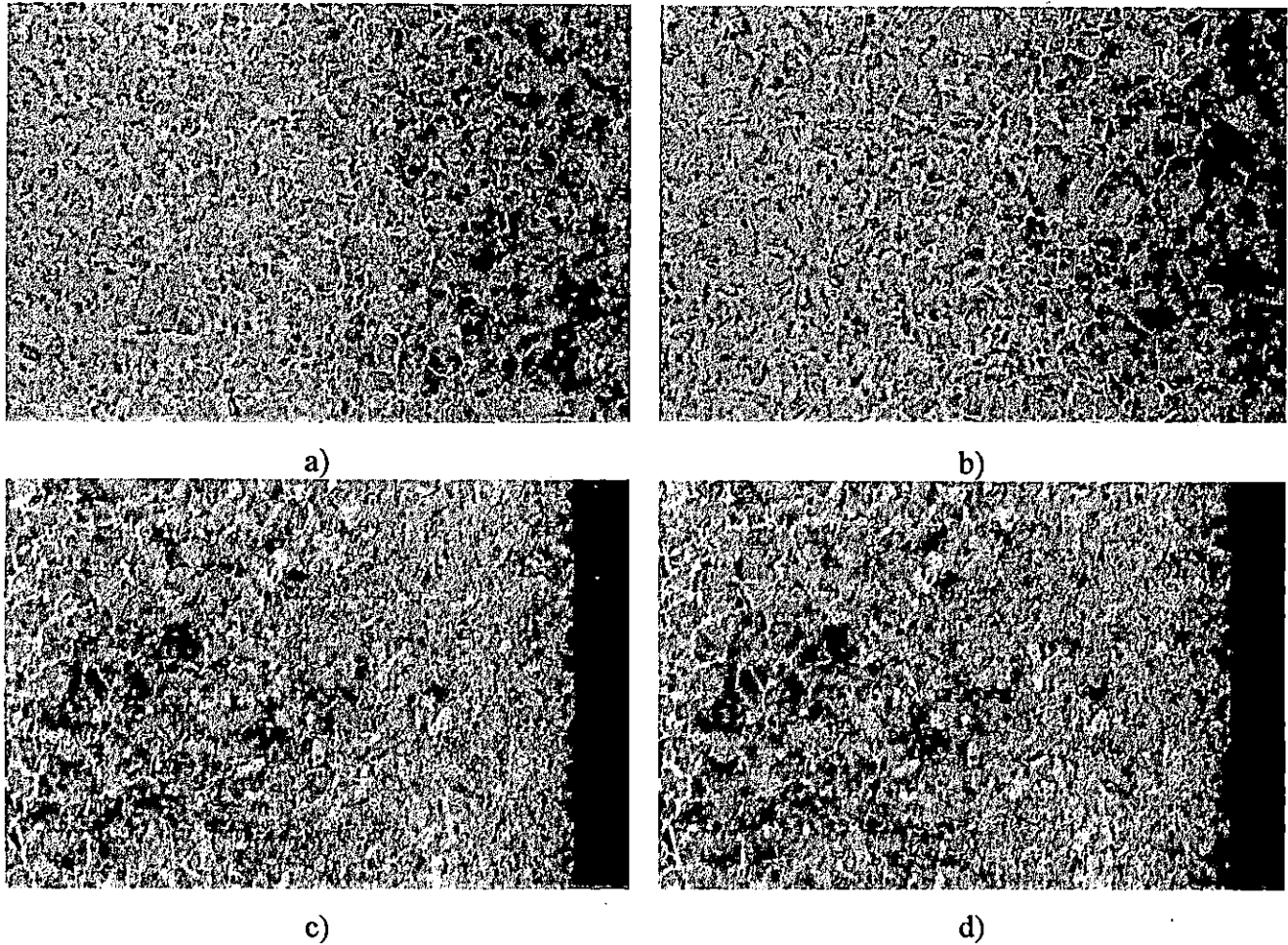


Fig. 2.22. Foto micrografias de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 6 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 70:30. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.



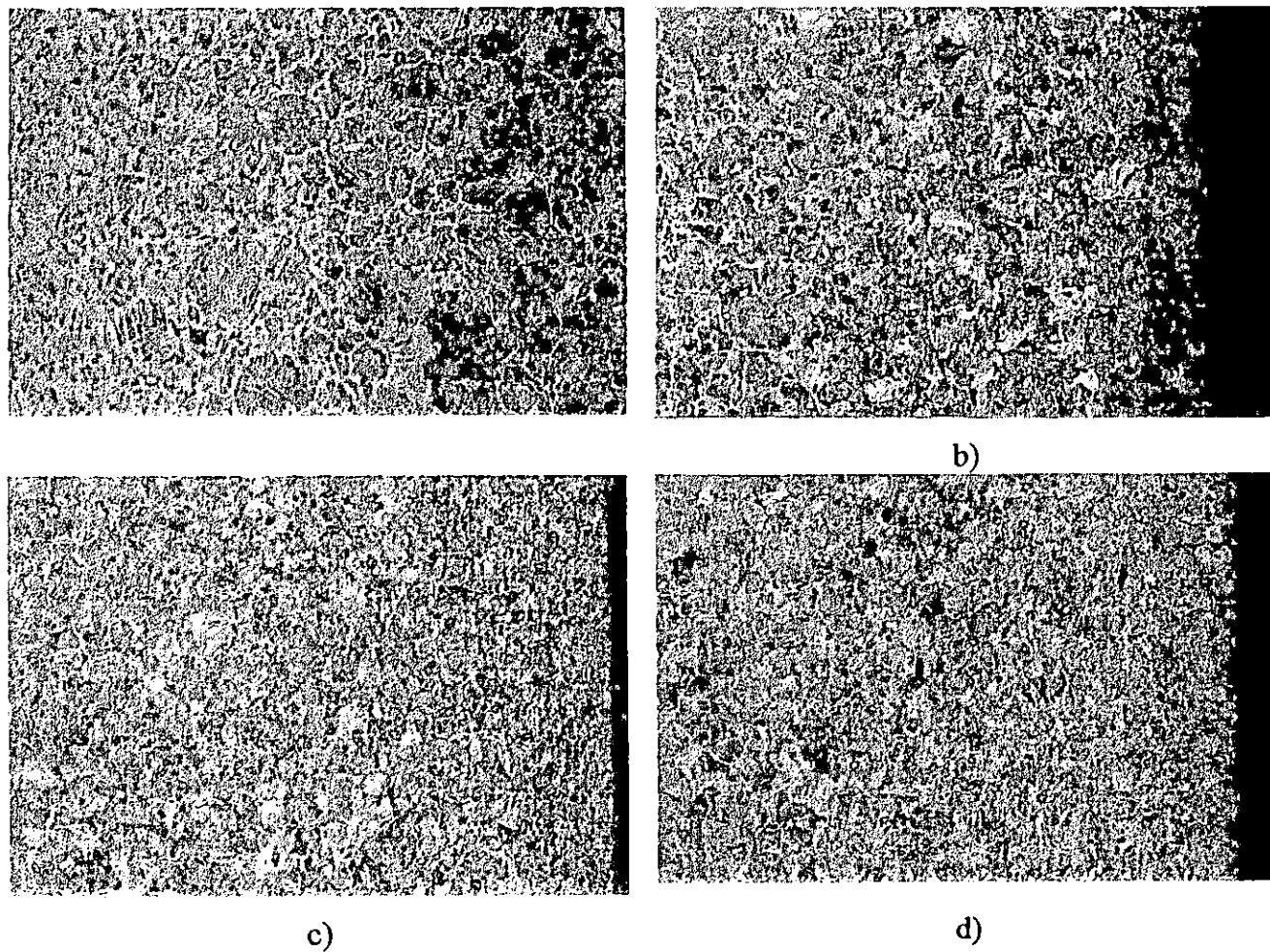


Fig. 2.23. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 8 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 70:30. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

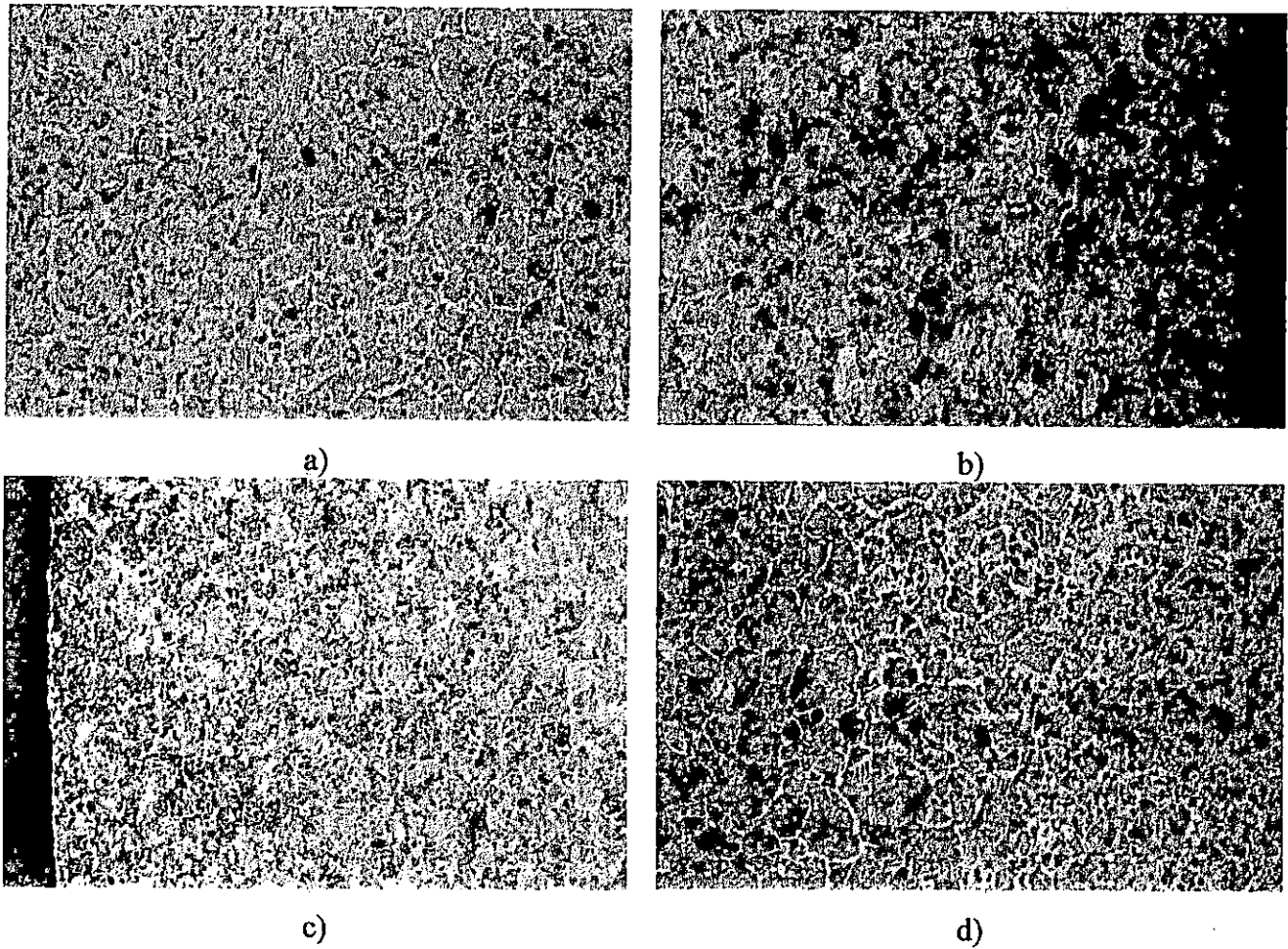


Fig. 2.24. Foto micrografías de un acero AISI 1020 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 10 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 70:30. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

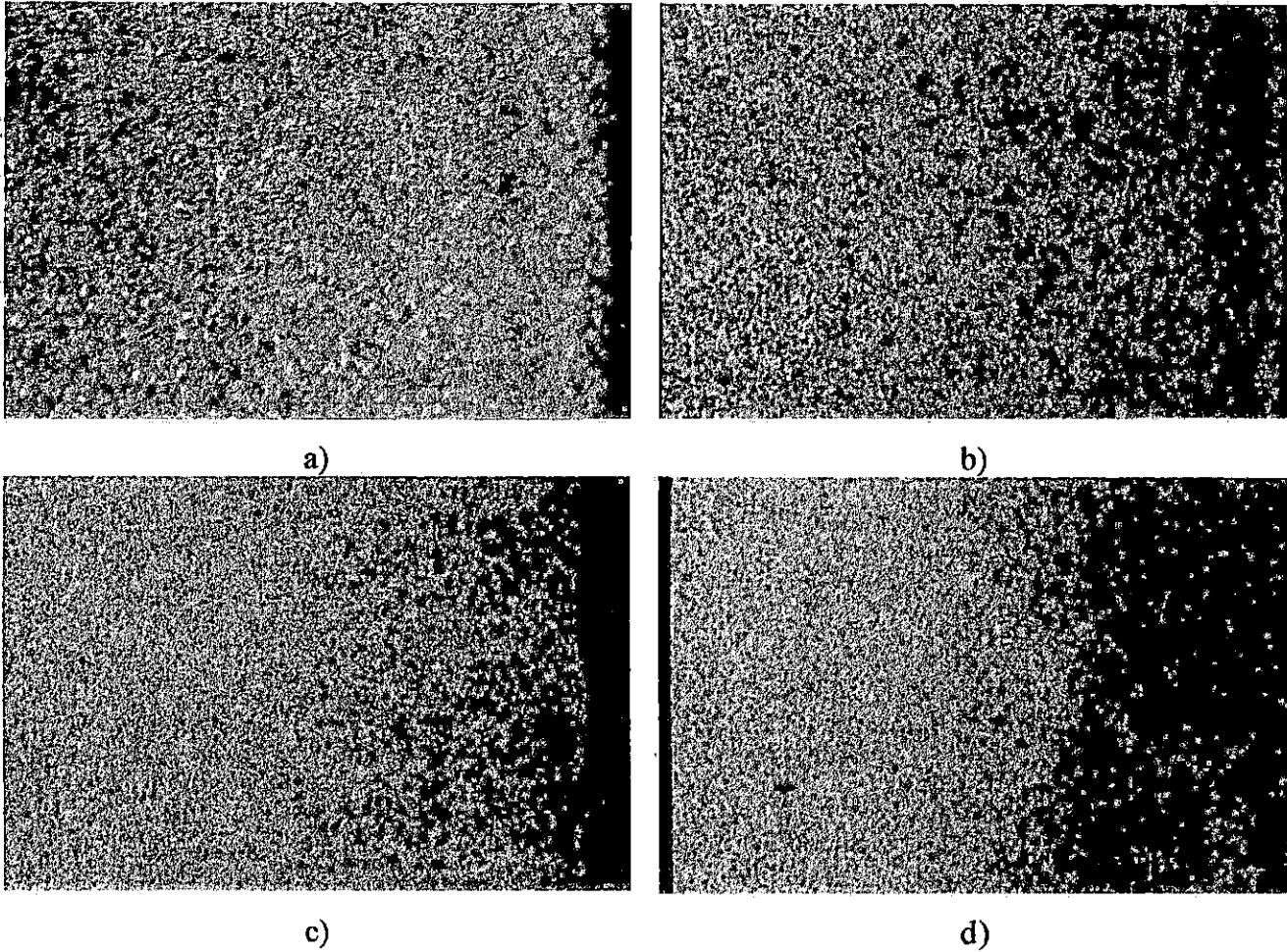


Fig. 2.25. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 4 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 90:10. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

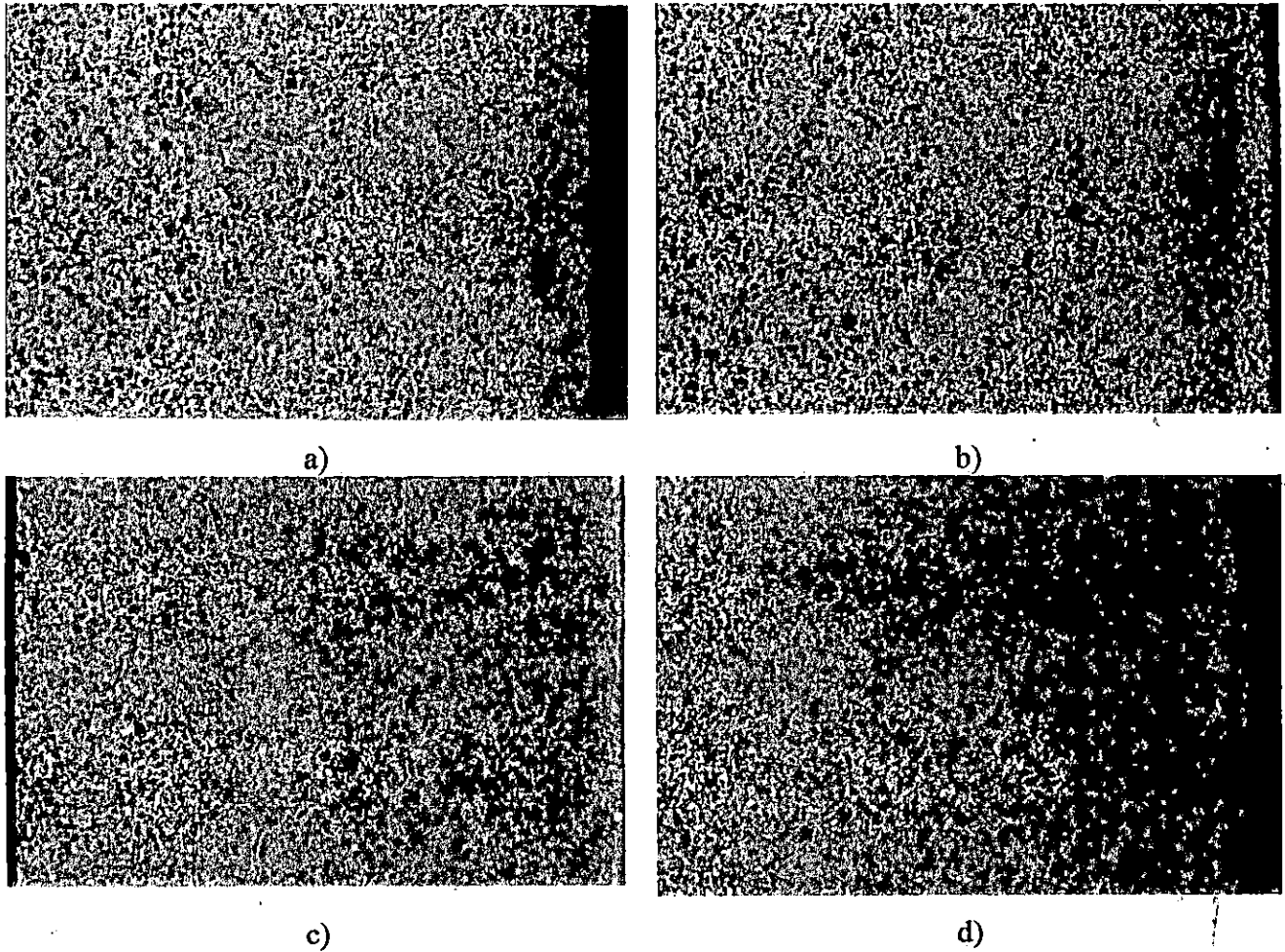


Fig. 2.26. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 6 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 90:10. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

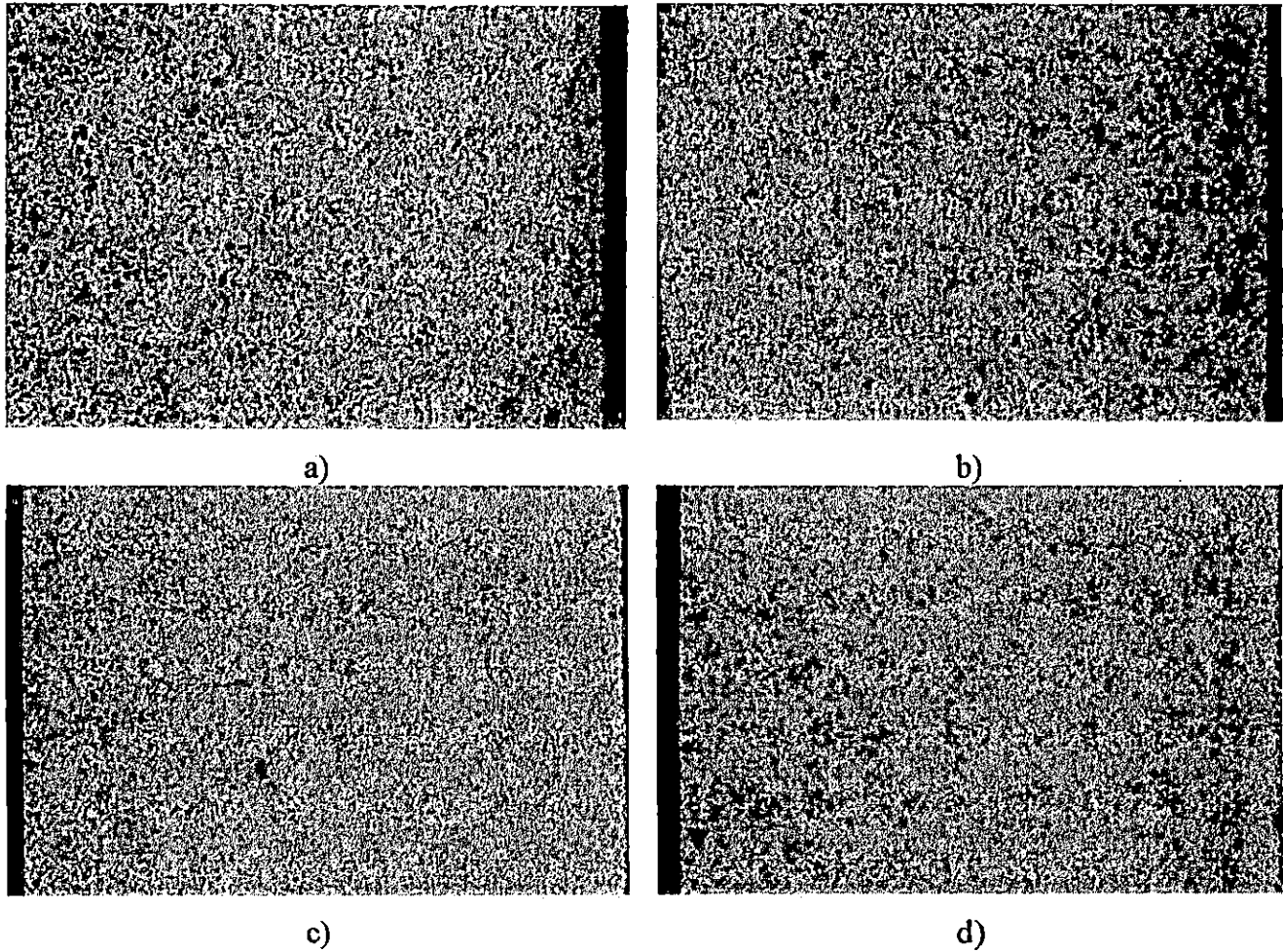


Fig. 2.27 Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 8 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 90:10. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.



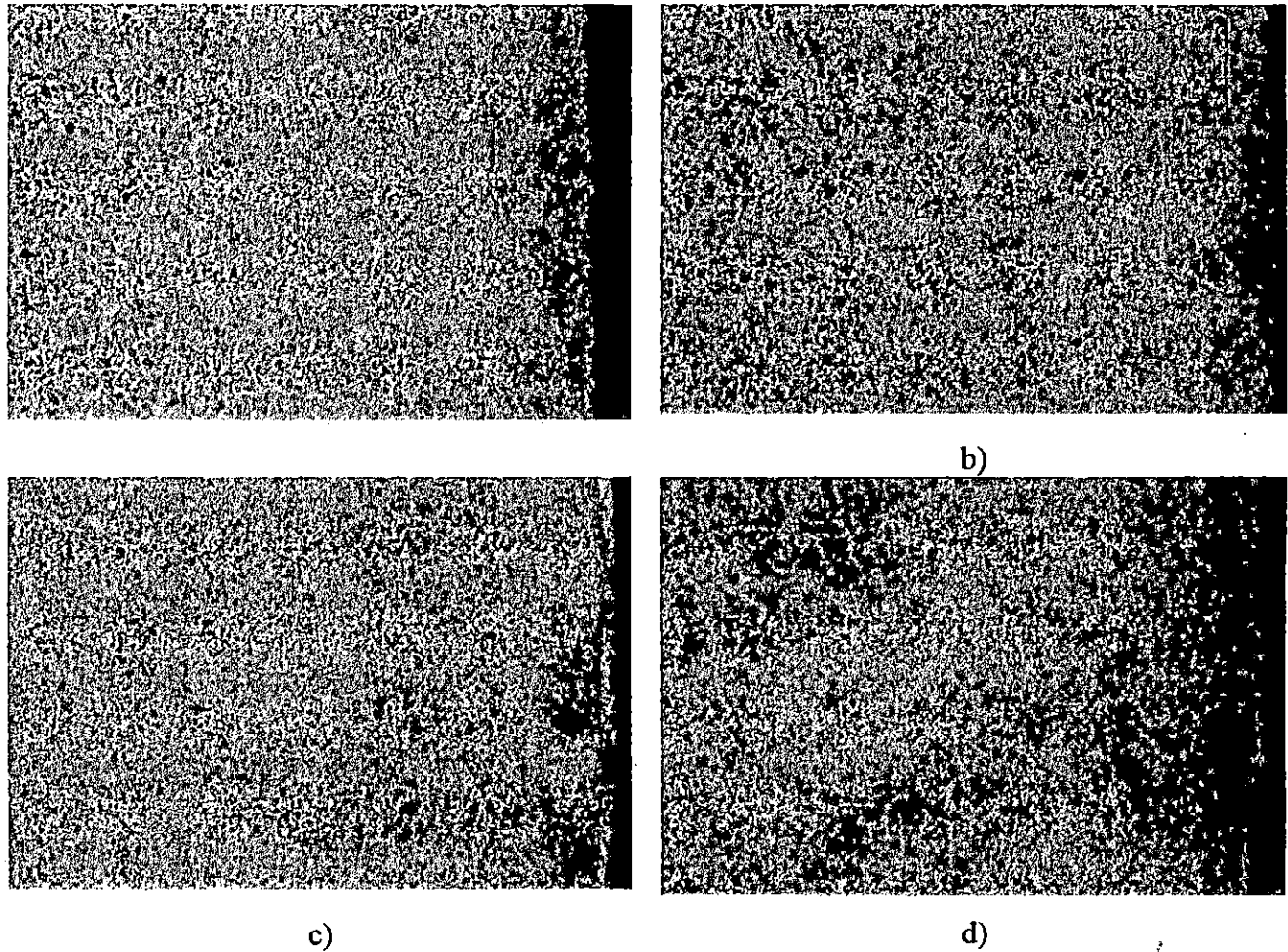


Fig. 2.28. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 10 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 90:10. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

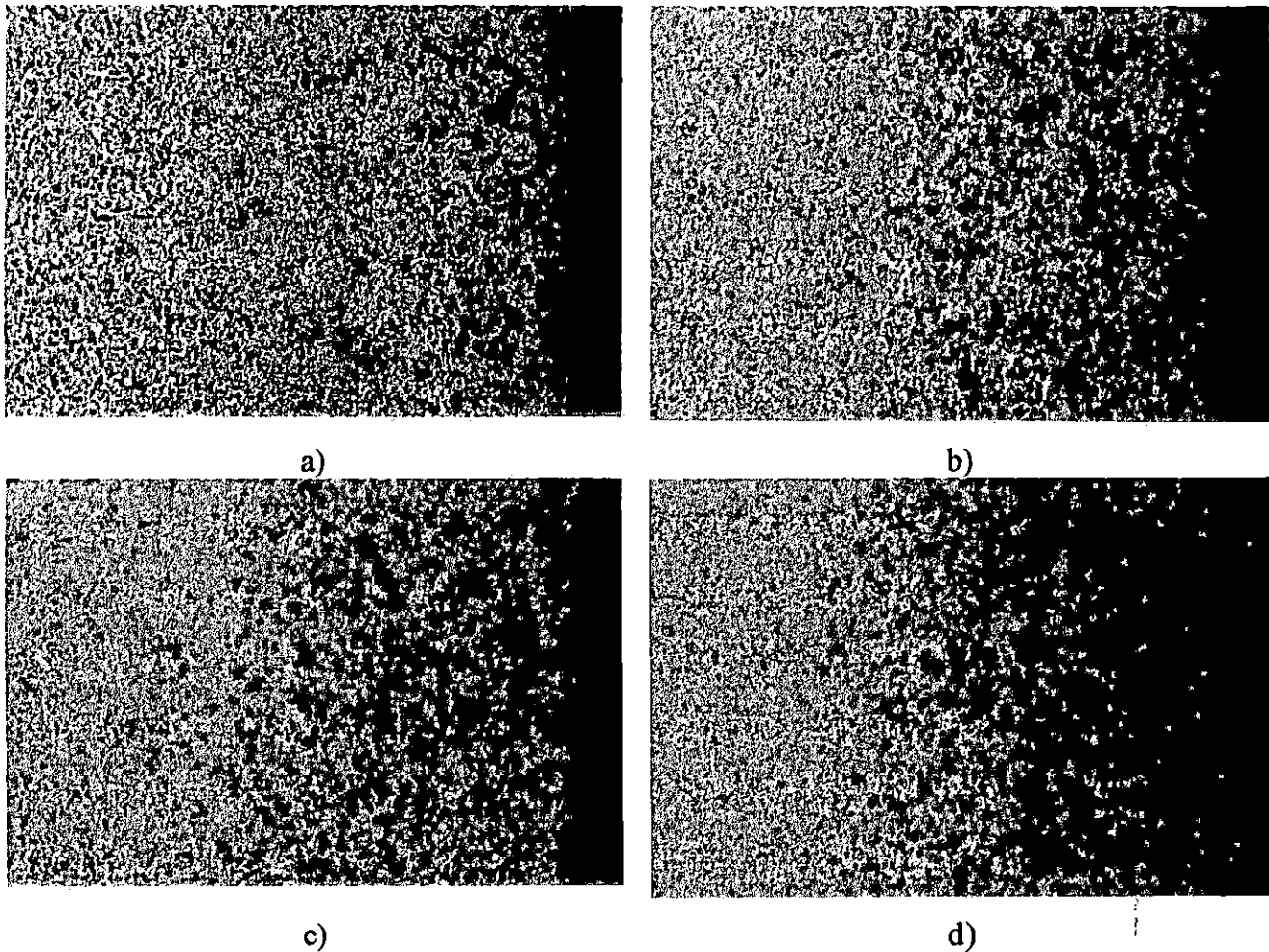


Fig. 2.29. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 4 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 80:20. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

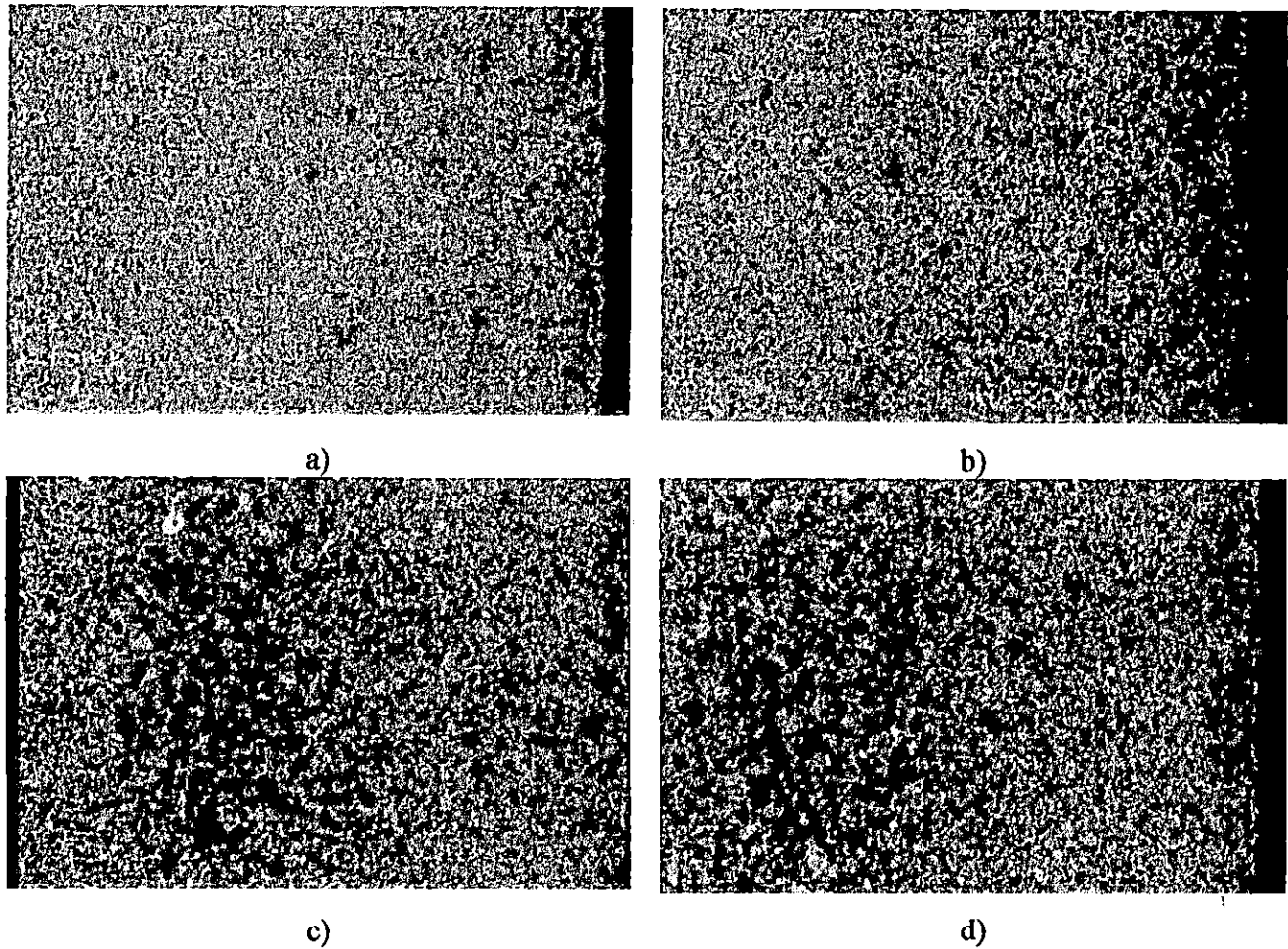


Fig. 2.30. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 6 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 80:20. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.



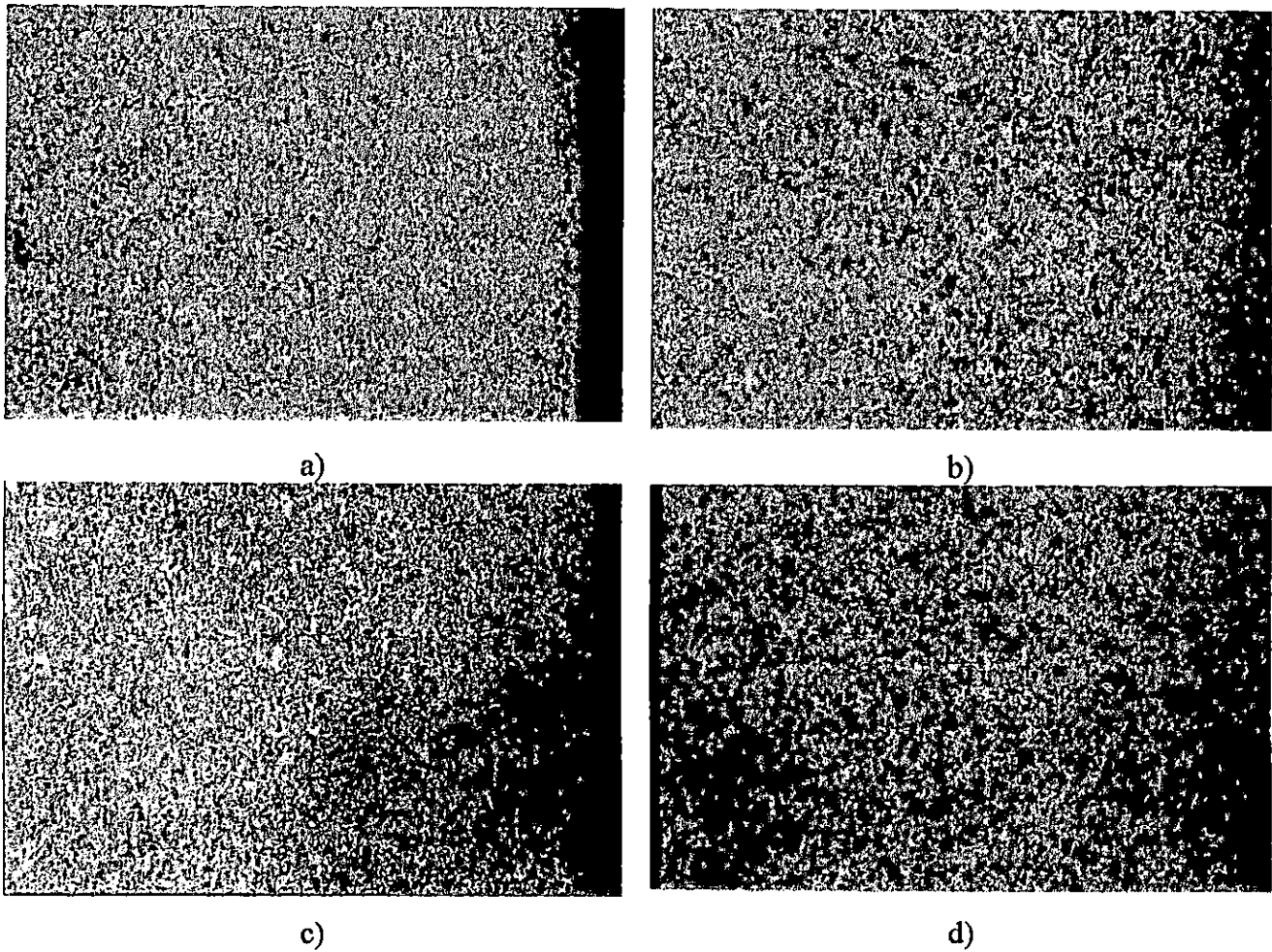


Fig. 2.31. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 8 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 80:20. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

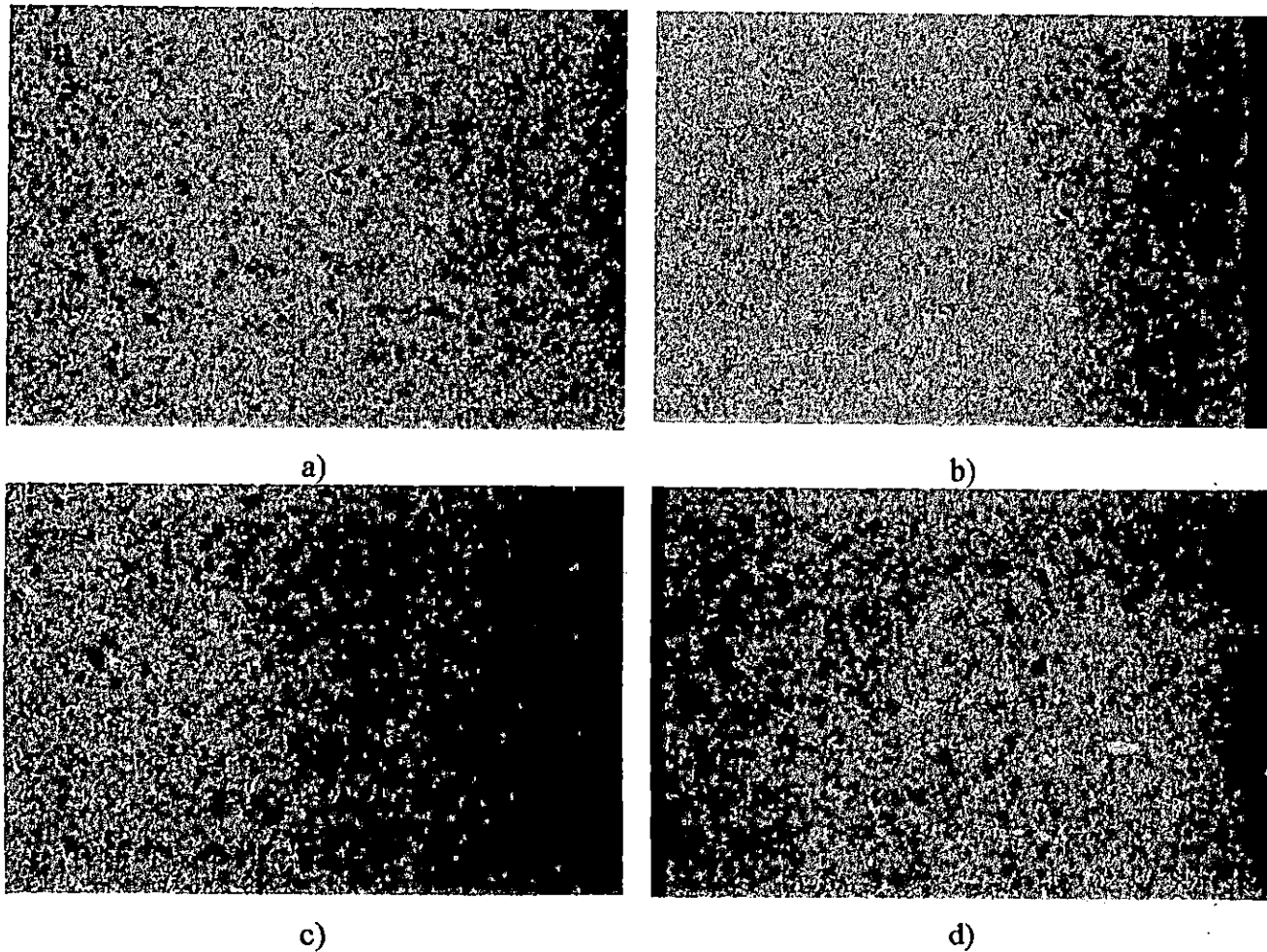


Fig. 2.32. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 10 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 80:20. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

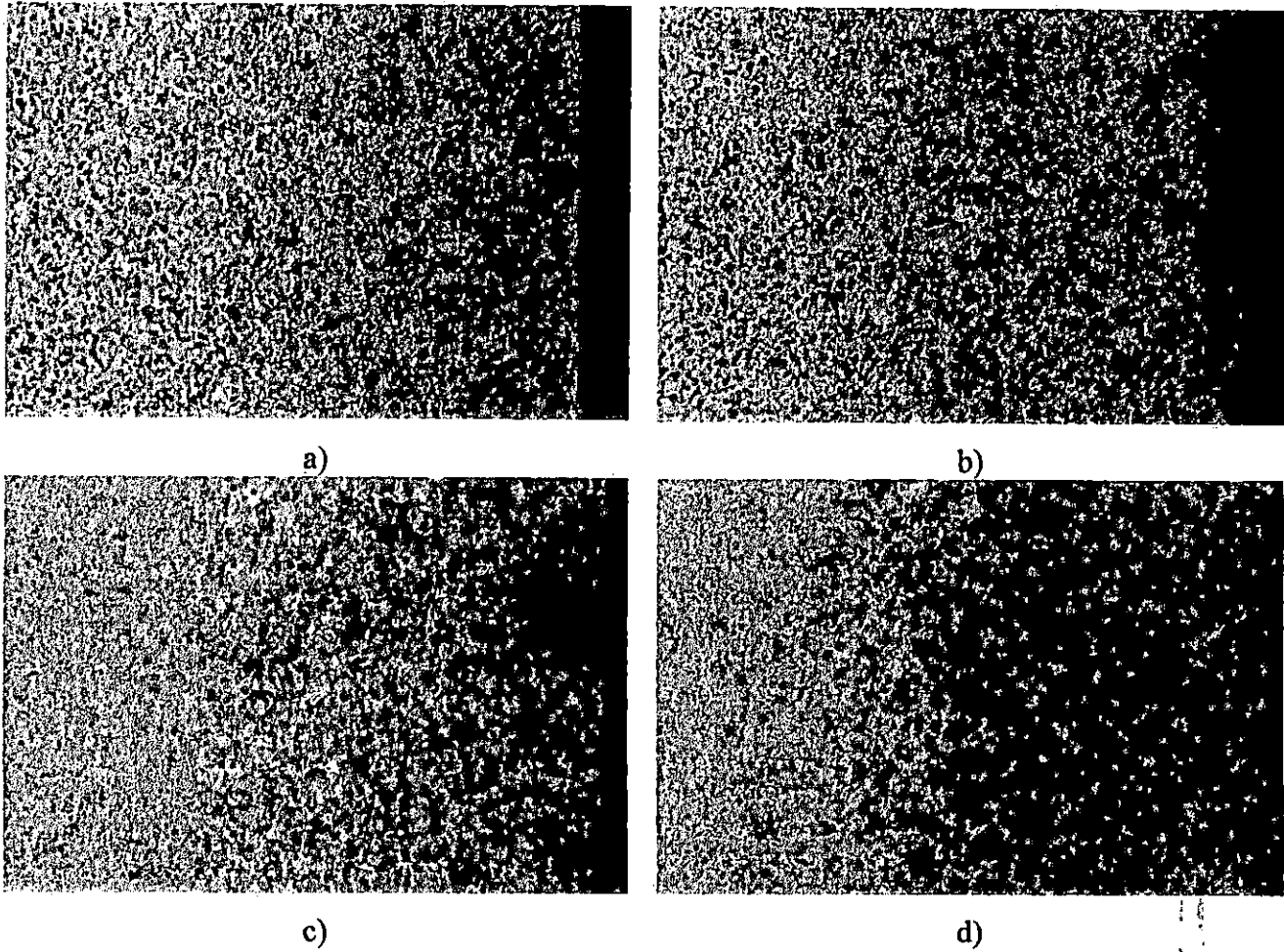


Fig. 2.33. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 4 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 70:30. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

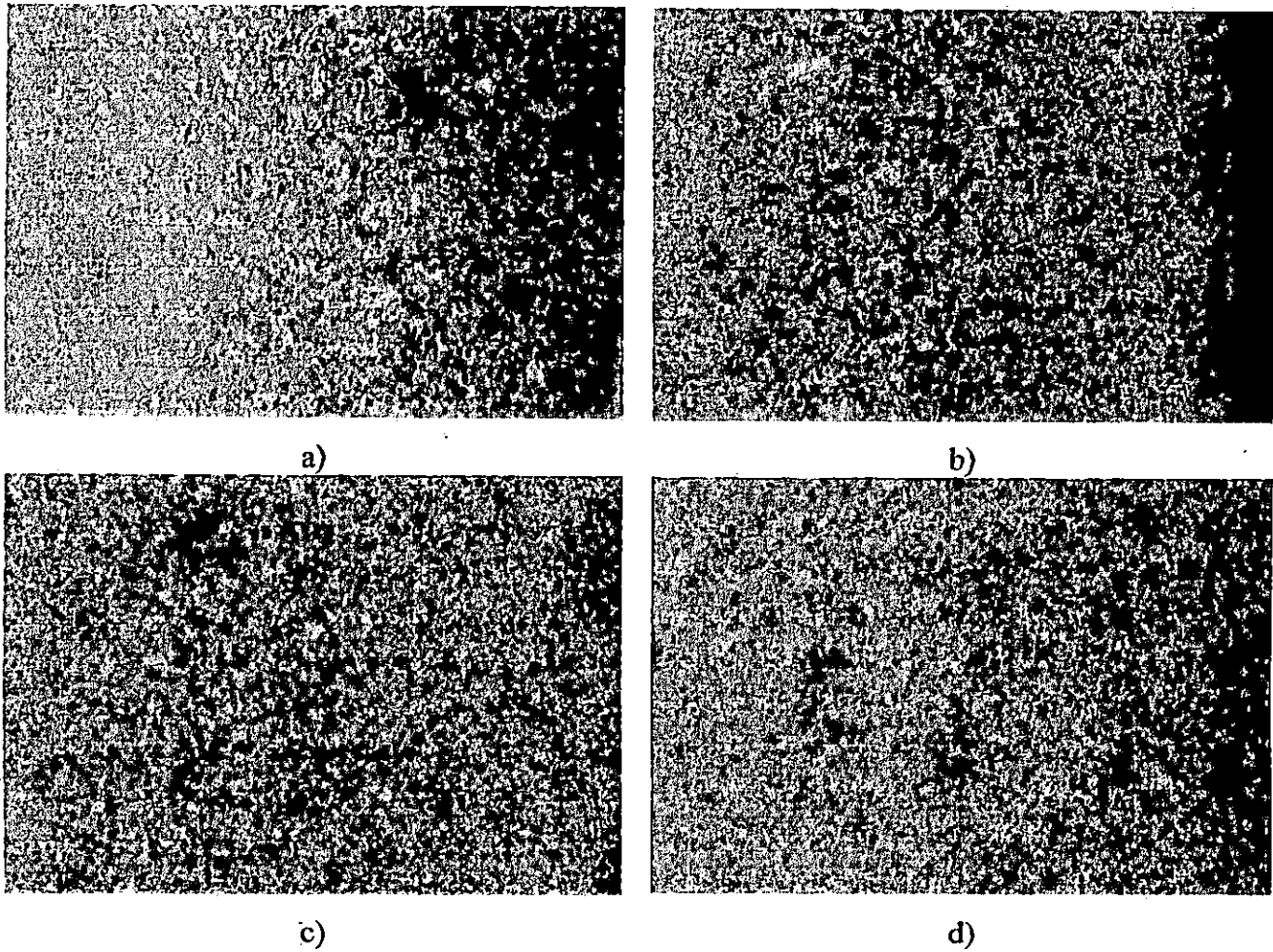


Fig. 2.34. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 6 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 70:30. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

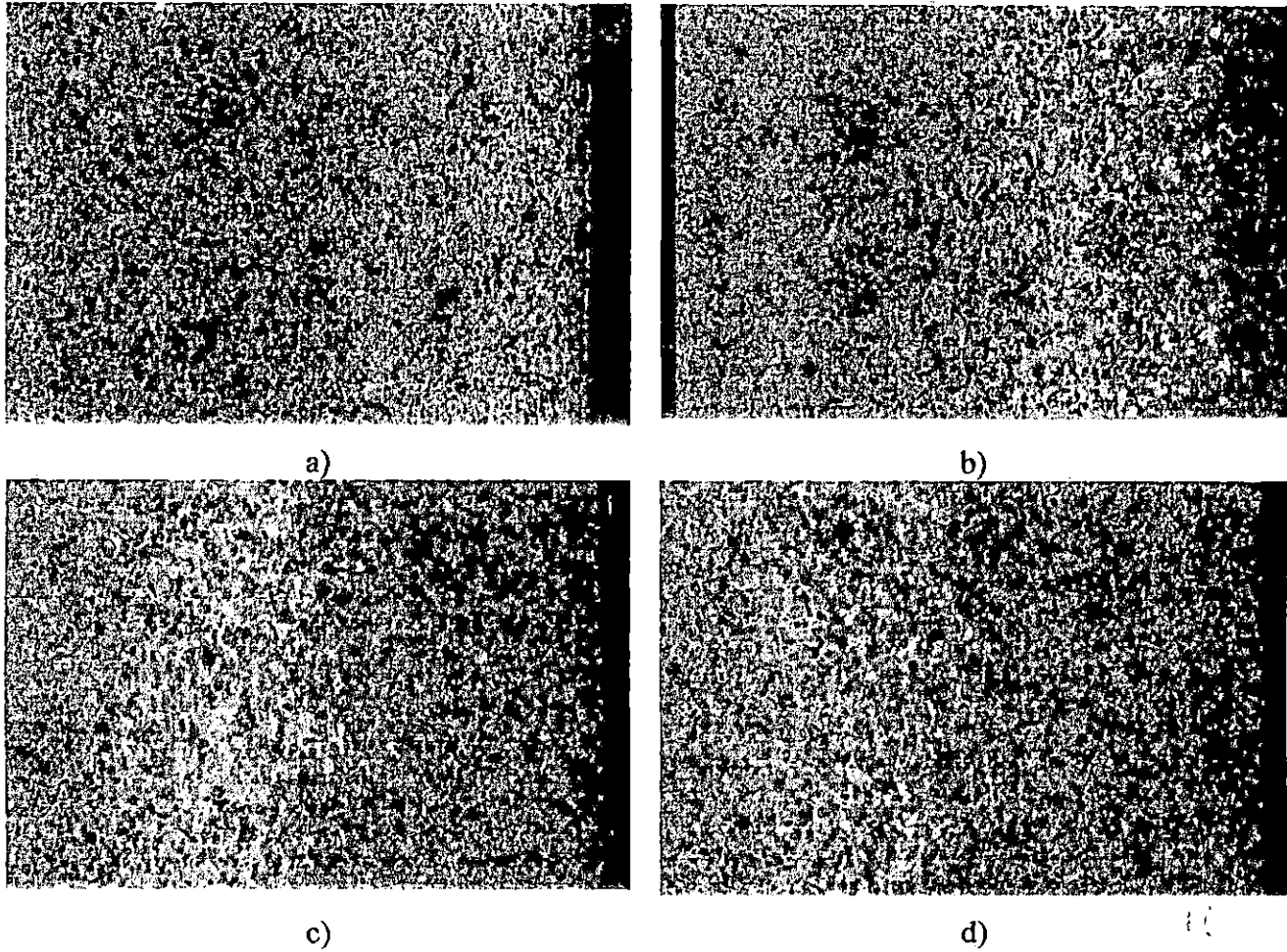


Fig. 2.35. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 8 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 70:30. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.

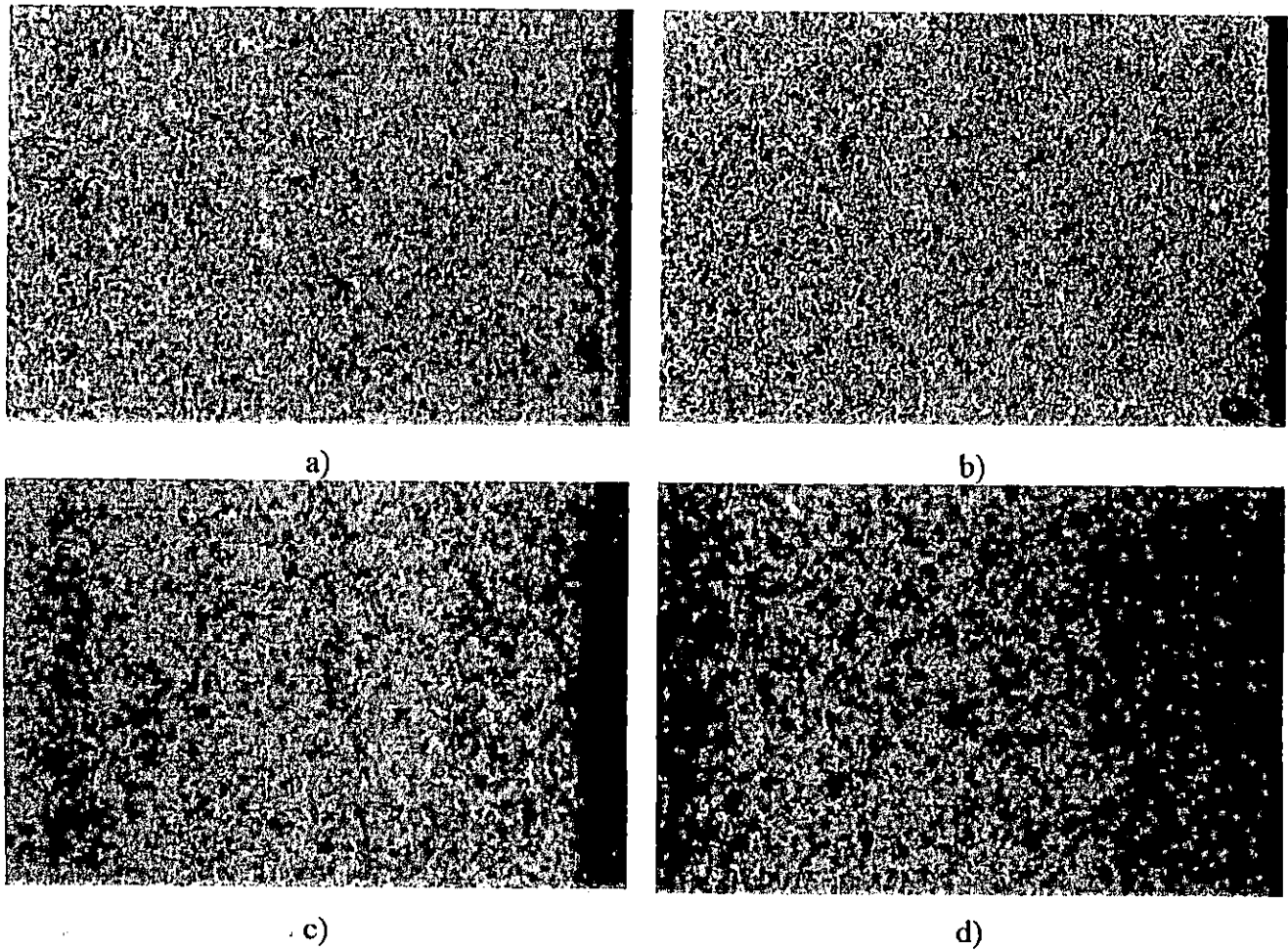


Fig. 2.36. Foto micrografías de un acero AISI 3115 con Tratamiento Termoquímico de Cementación Sólida a una temperatura de 900 °C durante 10 horas, y a diferente distancia entre probetas. Mezcla carburante 70:30. a) Distancia entre probetas = 5 mm, b) Distancia entre probetas = 7.5 mm, c) Distancia entre probetas = 10 mm y d) Distancia entre probetas = 12.5 mm.



## 2.7 RESULTADOS DEL ACERO AISI 1020

A continuación se muestran los resultados de la medición de la capa cementada utilizando el procedimiento mencionado en el literal 2.6.

Los resultados del acero AISI 1020 se recopilan en las siguientes tablas y sus respectivas graficas, es de hacer mención que están agrupadas por tipo de mezcla.

Mezcla: M1

**Tabla 7.** Espesores de capa cementada medidos a diferente distancia entre probetas y tiempos de cementación para un acero AISI 1020 y una mezcla carburante 90:10.

TIEMPO(HORAS)	Espesor de capa, mm			
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
4	0.72	0.69	0.52	0.63
6	0.57	0.77	0.77	0.83
8	0.86	0.72	0.78	0.80
10	0.74	0.63	0.74	1.00

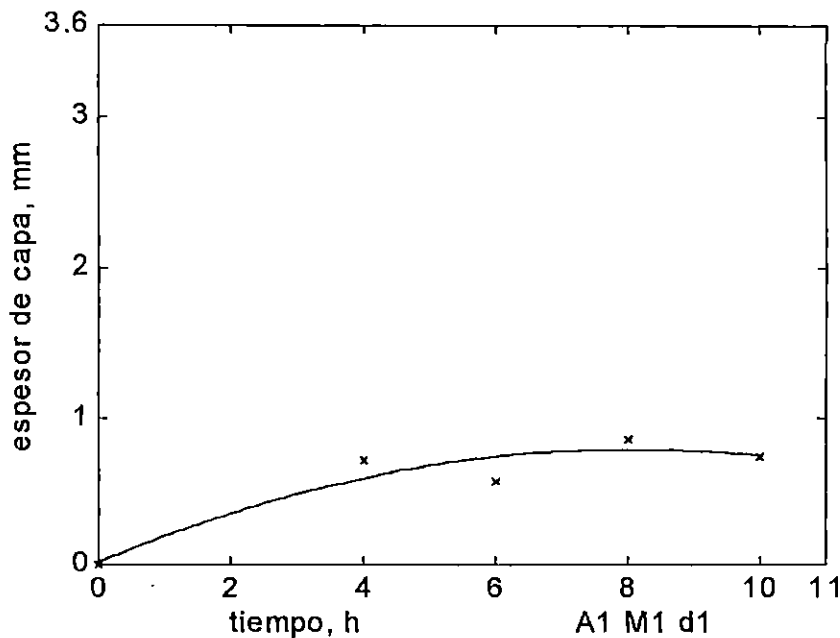


Fig. 2.37 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 5 mm.

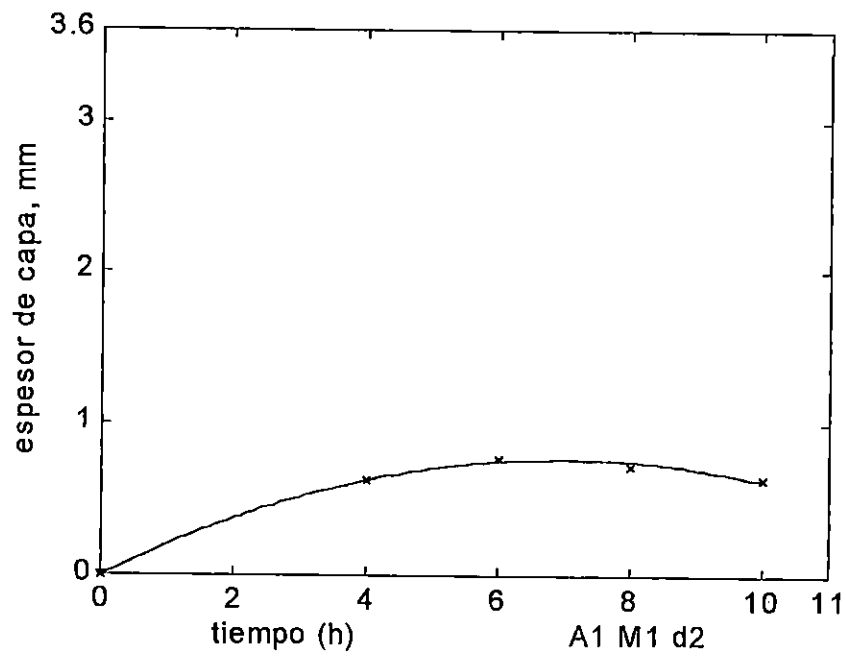


Fig. 2.38 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 7.5 mm.

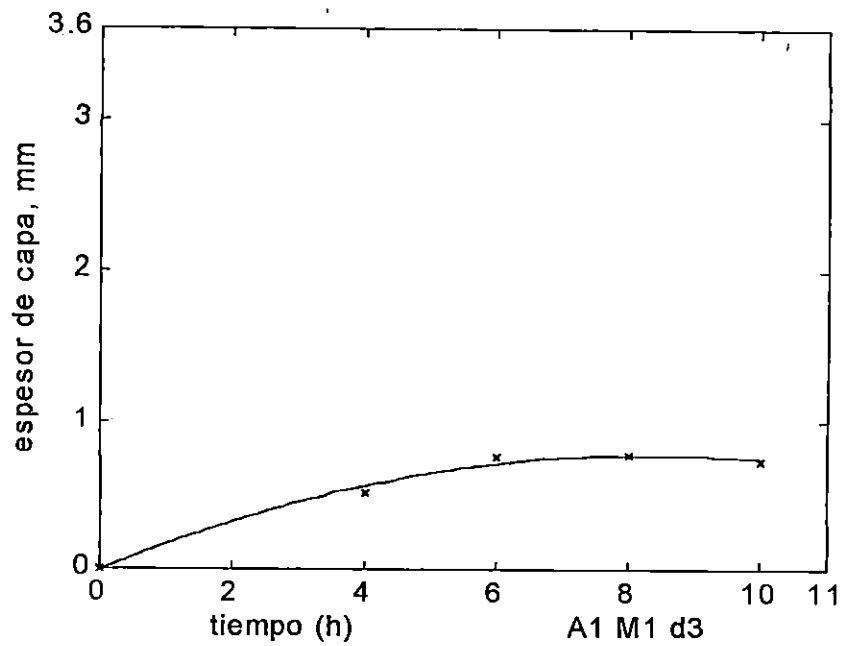


Fig. 2.39 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 10 mm.



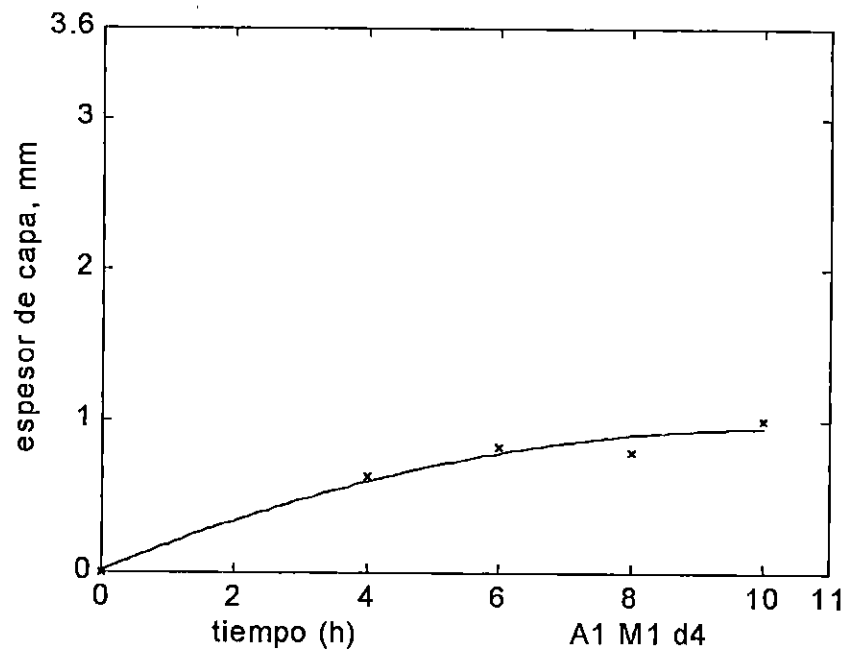


Fig. 2.40 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 12.5 mm.

Mezcla: M2

**Tabla 8.** Espesores de capa cementada medidos a diferente distancia entre probetas y tiempos de cementación para un acero AISI 1020 y una mezcla carburante 80:20.

TIEMPO(HORAS)	Espesor de capa, mm			
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
4	0.4	0.63	0.45	0.56
6	0.58	0.57	0.70	0.71
8	0.90	0.98	0.90	1.00
10	0.58	1.00	0.97	0.94

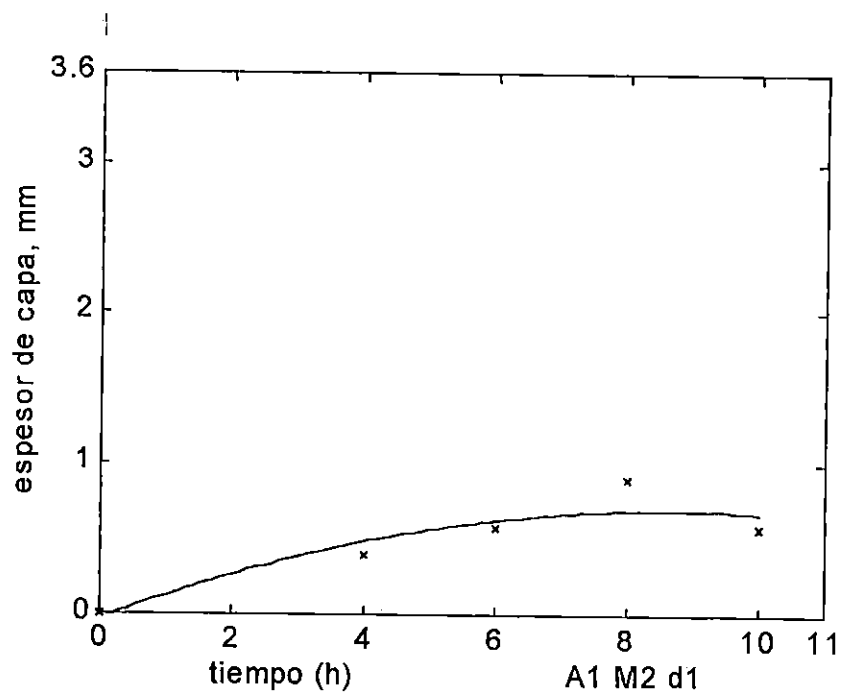


Fig. 2.41 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 5 mm.

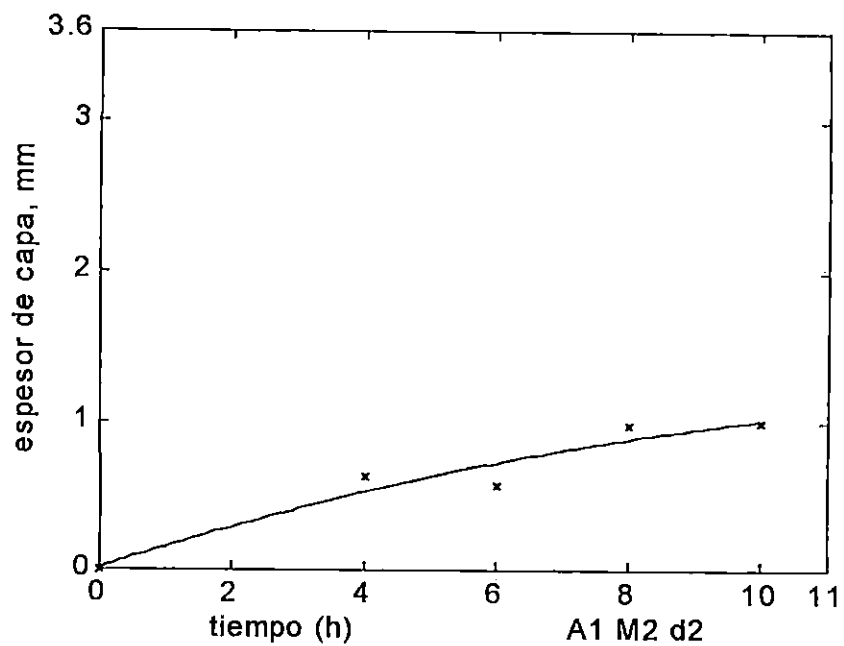


Fig. 2.42 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 7.5 mm.

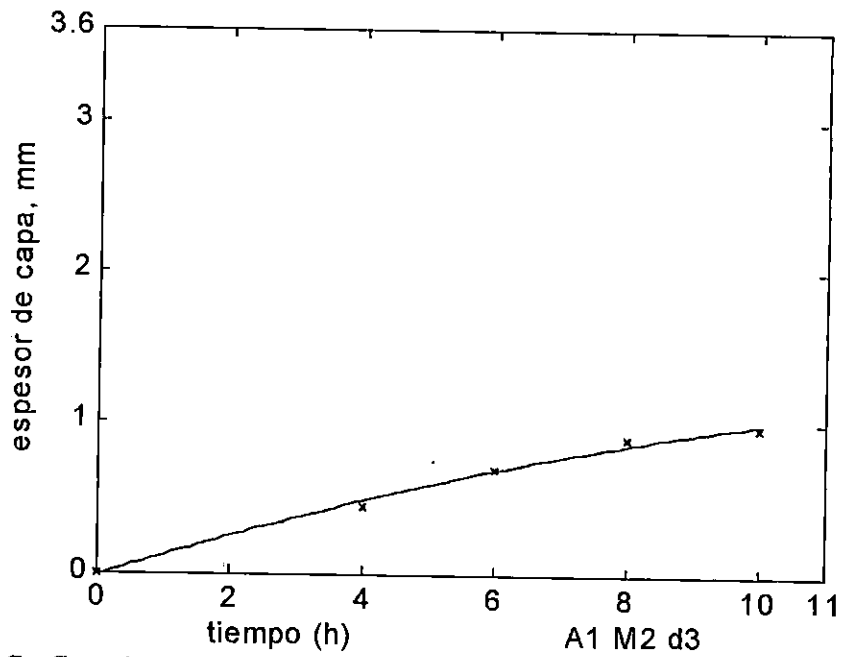


Fig. 2.43 Gráfica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 10 mm.

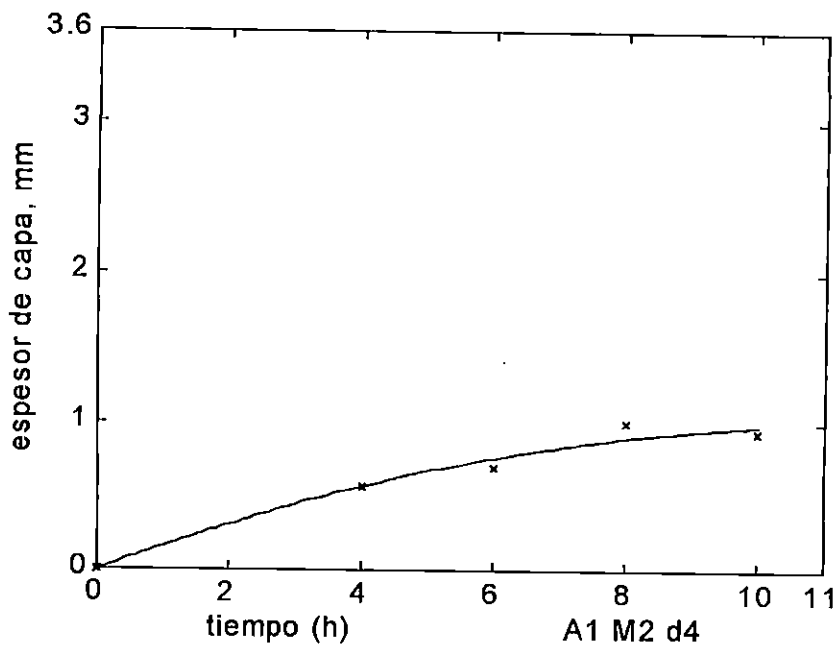


Fig. 2.44 Gráfica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 12.5 mm.

Mezcla: M3

**Tabla 9.** Espesores de capa cementada medidos a diferente distancia entre probetas y tiempos de cementación para un acero AISI 1020 y una mezcla carburante 70:30.

TIEMPO(HORAS)	Espesor de capa, mm			
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
4	0.55	0.56	0.6	0.55
6	0.62	0.72	0.75	0.82
8	0.67	0.78	0.96	1.00
10	0.77	0.98	0.98	1.02

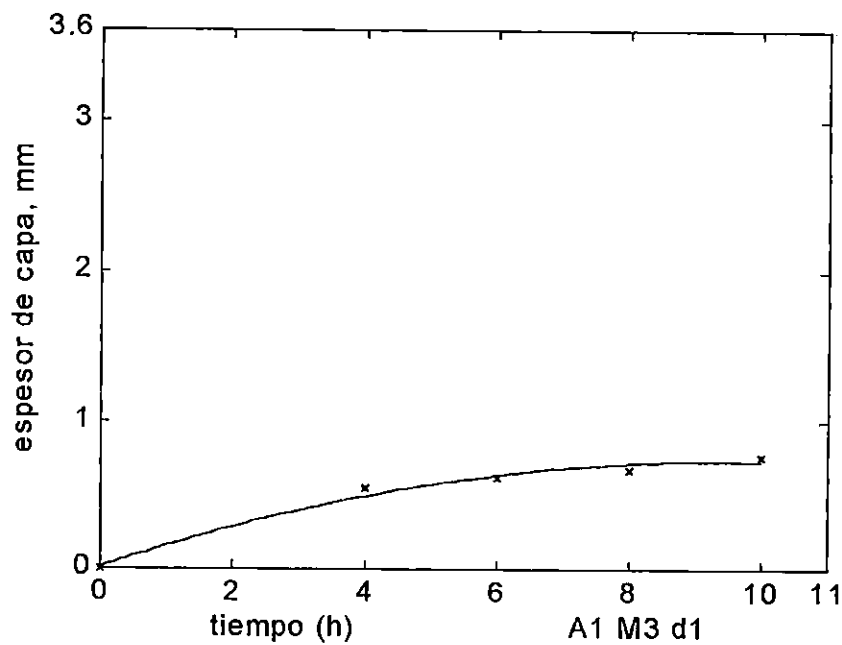


Fig. 2.45 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 5 mm.

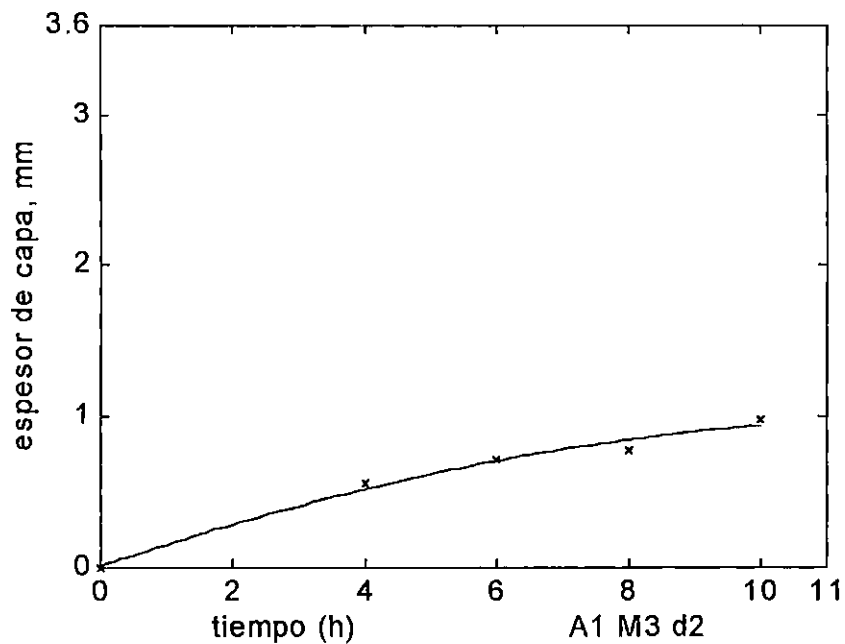


Fig. 2.46 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 7.5 mm.

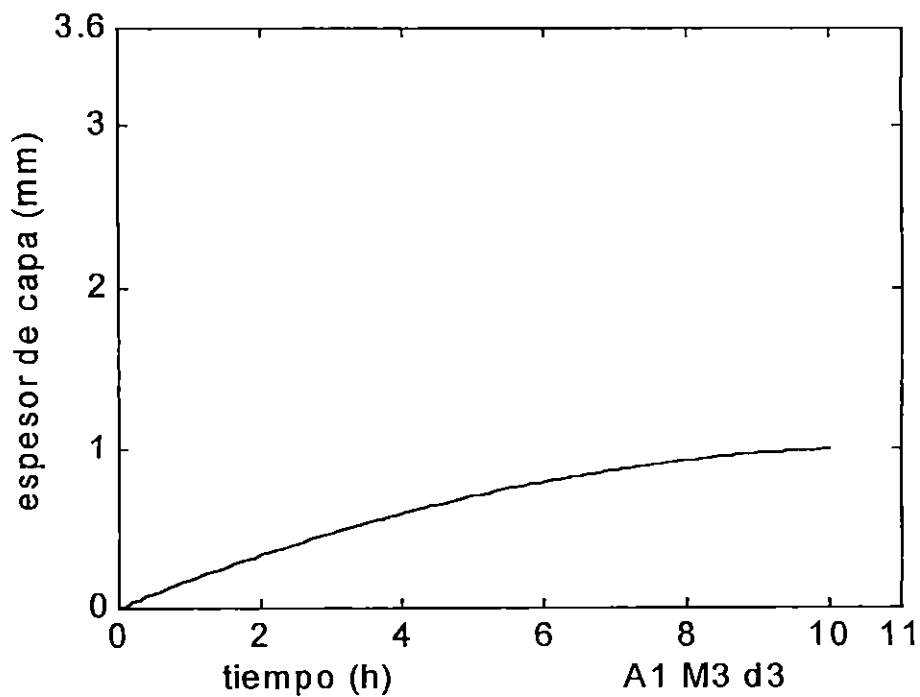


Fig. 2.4  
distanci...

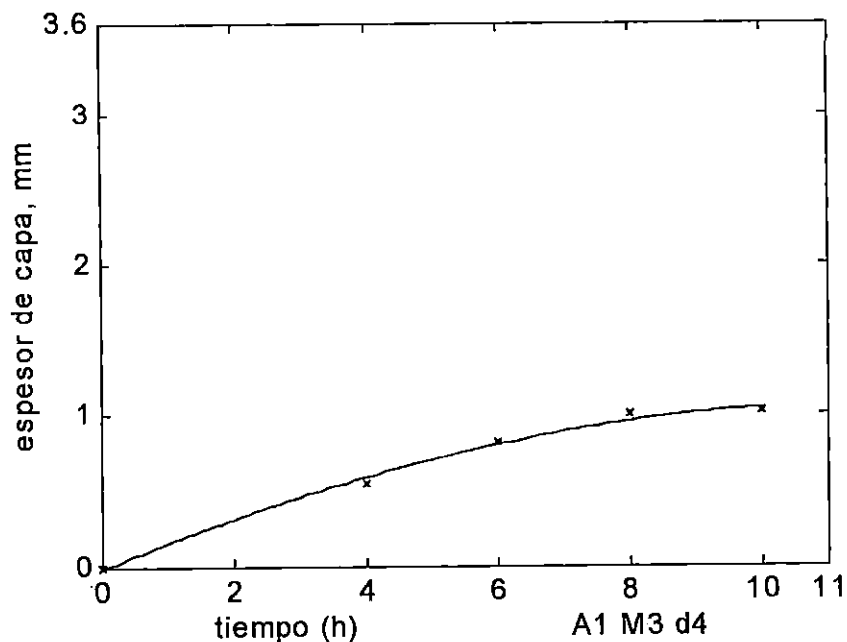


Fig. 2.48 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 12.5 mm.

## 2.8 RESULTADOS DEL ACERO AISI 3115:

Al igual que en el acero AISI 1020 los resultados del acero AISI 3115 se recopilan en las siguientes tablas y sus respectivas graficas, es de hacer mención que estan agrupadas por tipo de mezcla.

Mezcla: M1

**Tabla 10.** Espesores de capa cementada medidos a diferente distancia entre probetas y tiempos de cementación para un acero AISI 3115 y una mezcla carburante 90:10.

TIEMPO(HORAS)	Espesor de capa, mm			
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
4	0.99	1.10	1.60	1.40
6	1.30	1.70	1.40	1.80
8	1.50	1.70	2.50	2.60
10	1.74	1.90	2.60	2.80

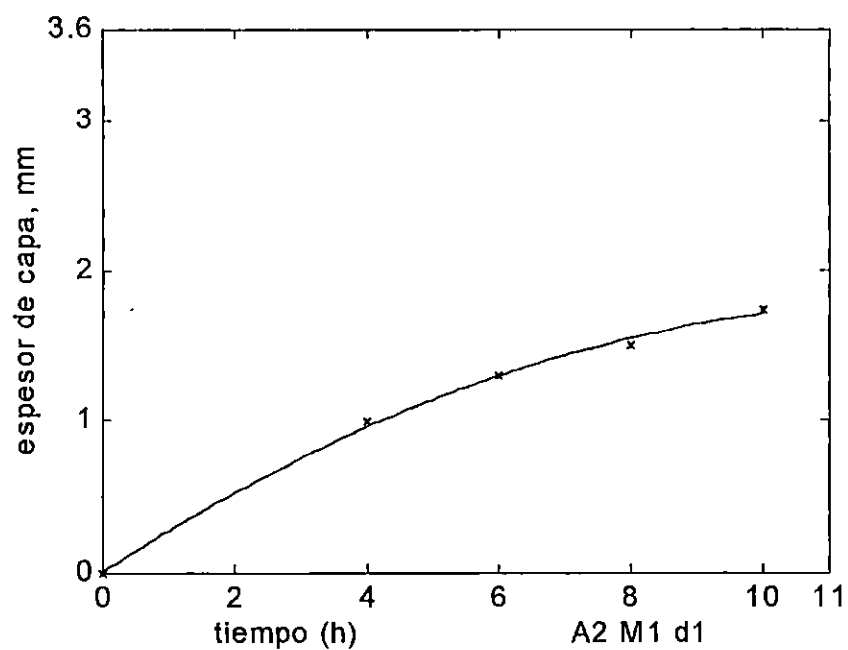


Fig. 2.49 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 5 mm.

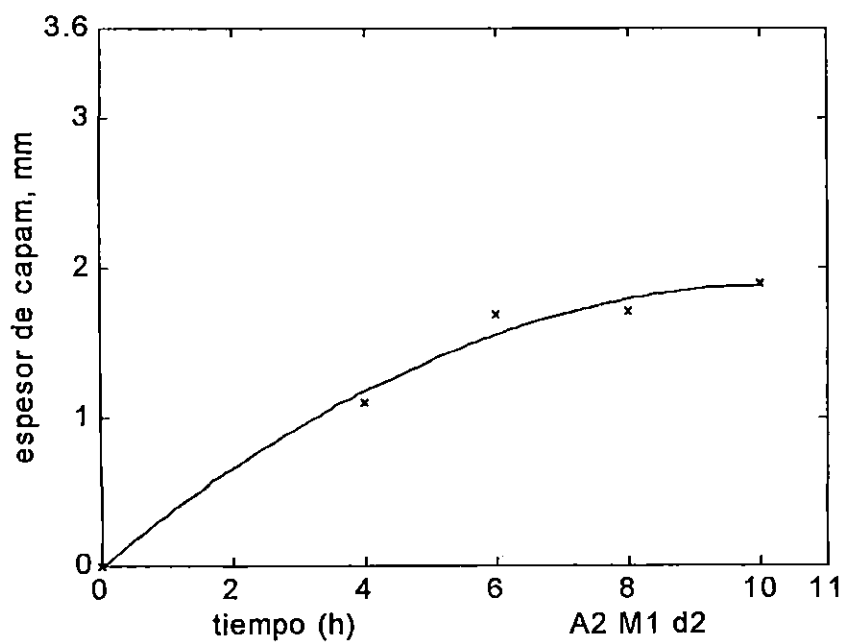


Fig. 2.50 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 7.5 mm.

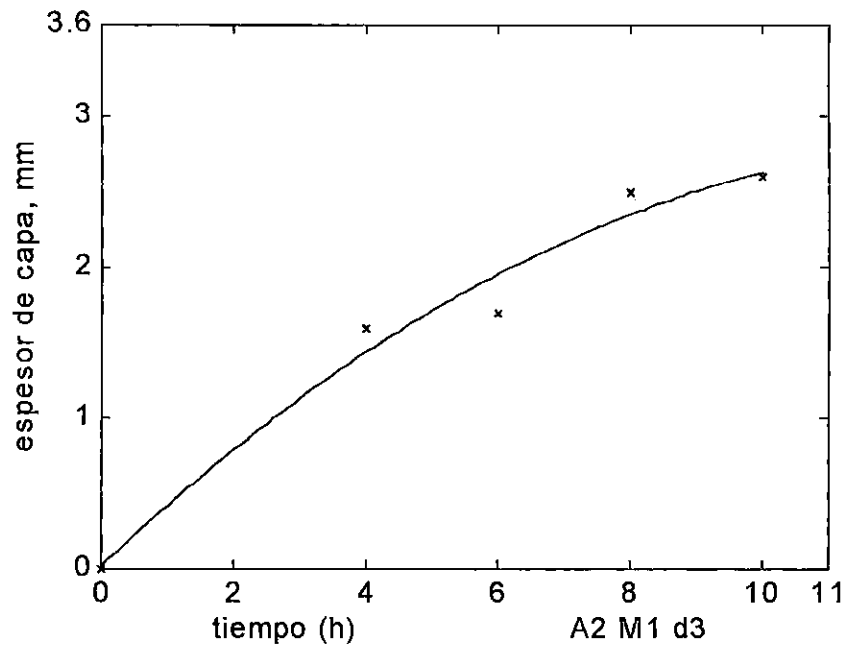


Fig. 2.51 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 10 mm.

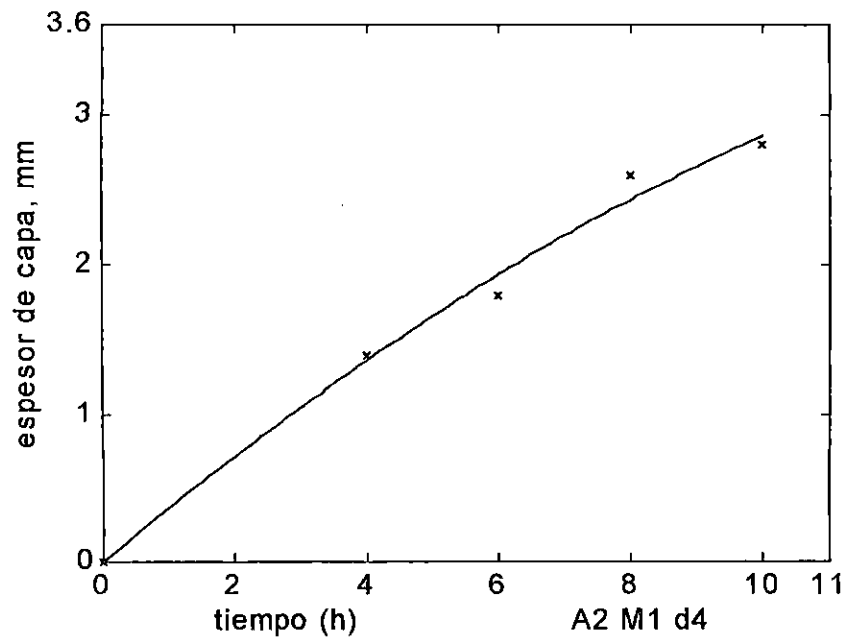


Fig. 2.52 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 12.5 mm.



Mezcla: M2

**Tabla 11.** Espesores de capa cementada medidos a diferente distancia entre probetas y tiempos de cementación para un acero AISI 3115 y una mezcla carburante 80:20.

TIEMPO(HORAS)	Espesor de capa, mm			
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
4	1.10	1.20	1.18	1.10
6	1.90	2.10	1.75	1.60
8	1.55	2.50	1.76	2.32
10	2.16	2.85	2.08	2.10

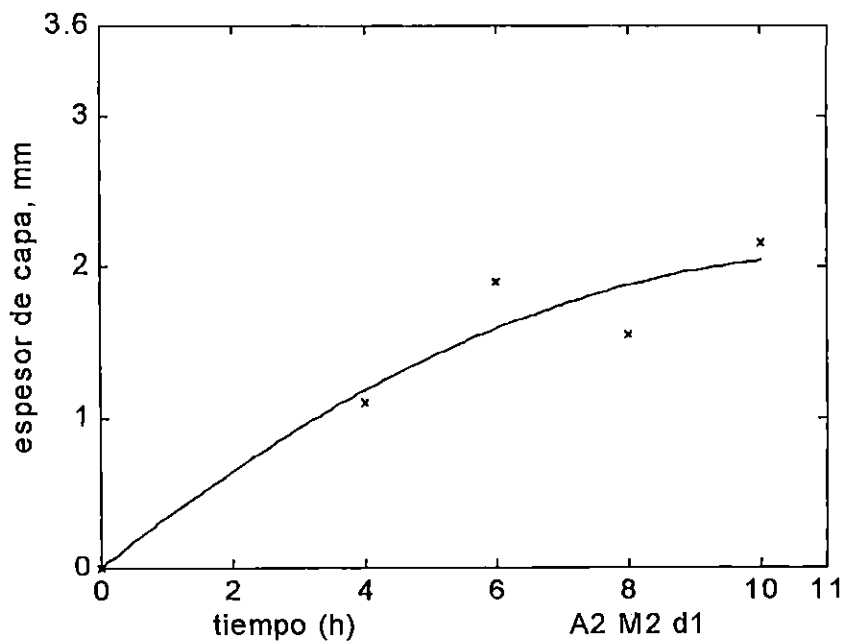


Fig. 2.53 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de .5 mm.

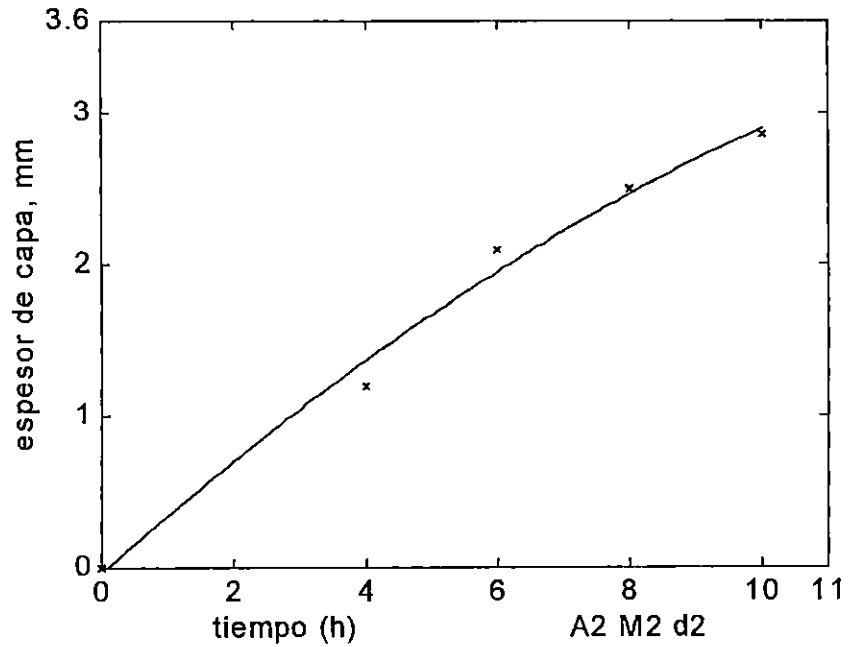


Fig. 2.54 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 7.5 mm.

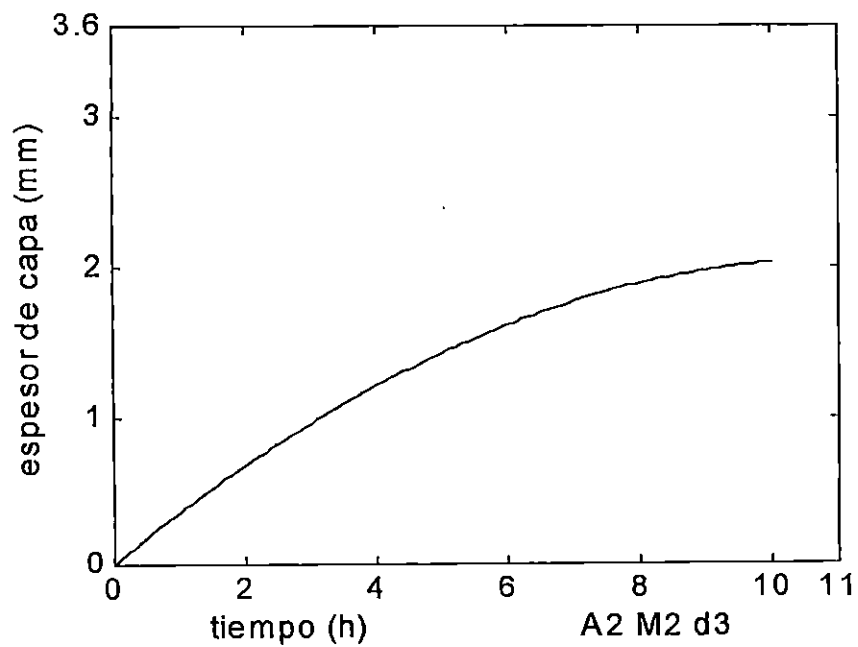


Fig. 2.55 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 10 mm.

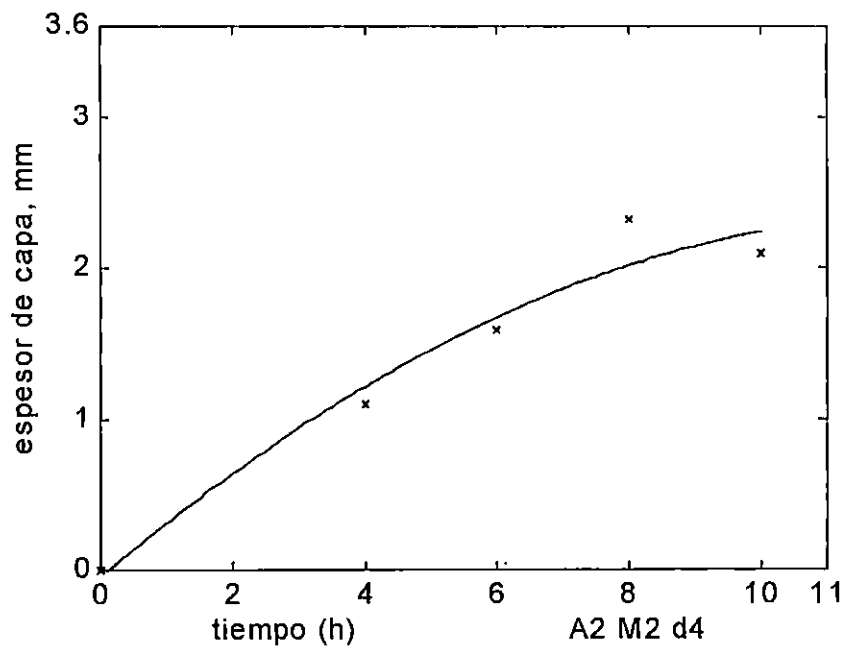


Fig. 2.56 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 12.5 mm.

Mezcla: M3.

**Tabla 12.** Espesores de capa cementada medidos a diferente distancia entre probetas y tiempos de cementación para un acero AISI 3115 y una mezcla carburante 70:30.

TIEMPO(HORAS)	Espesor de capa, mm			
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
4	0.85	0.89	1.48	1.66
6	1.47	1.54	1.85	1.67
8	1.63	1.71	3.21	2.38
10	2.00	1.86	2.62	2.20

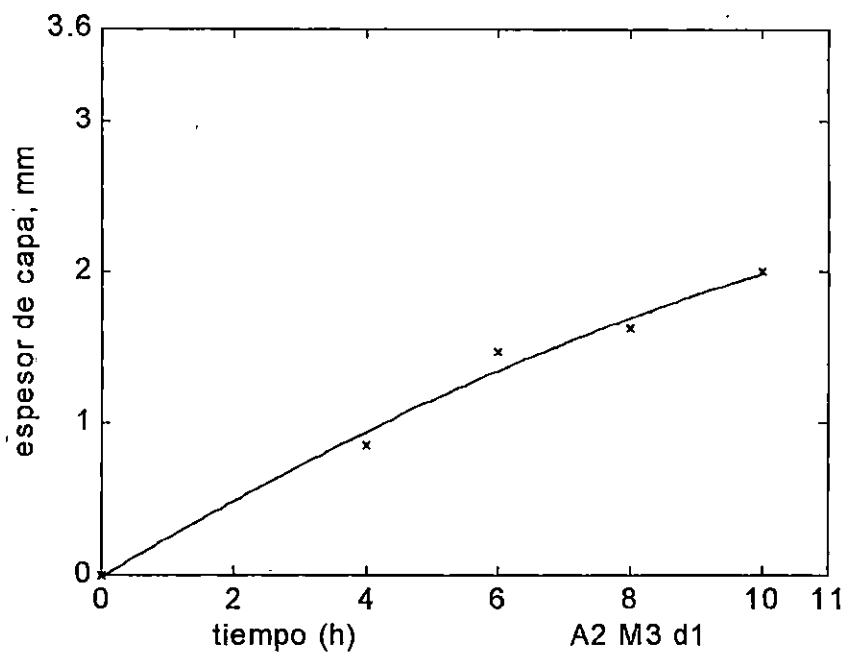


Fig. 2.57 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 5 mm.

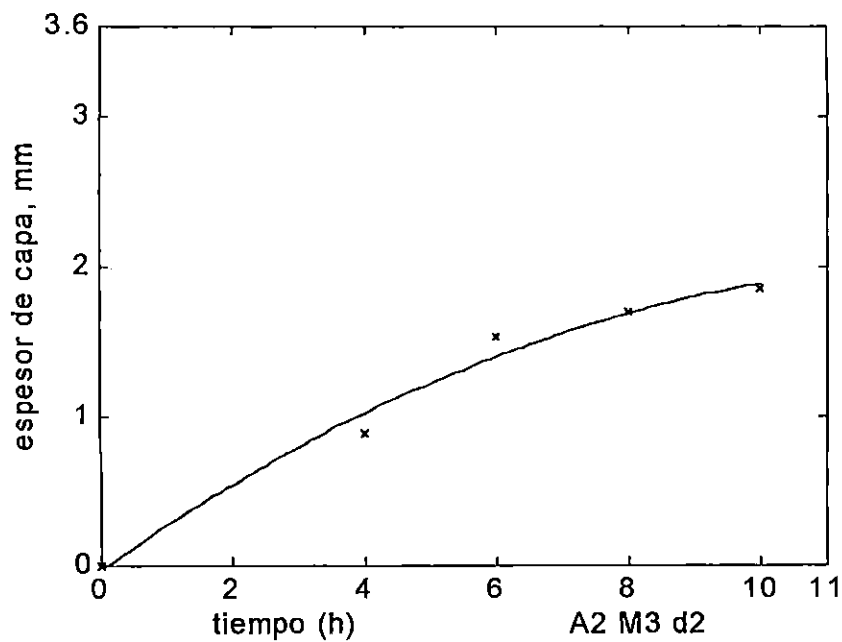


Fig. 2.58 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 7.5 mm.

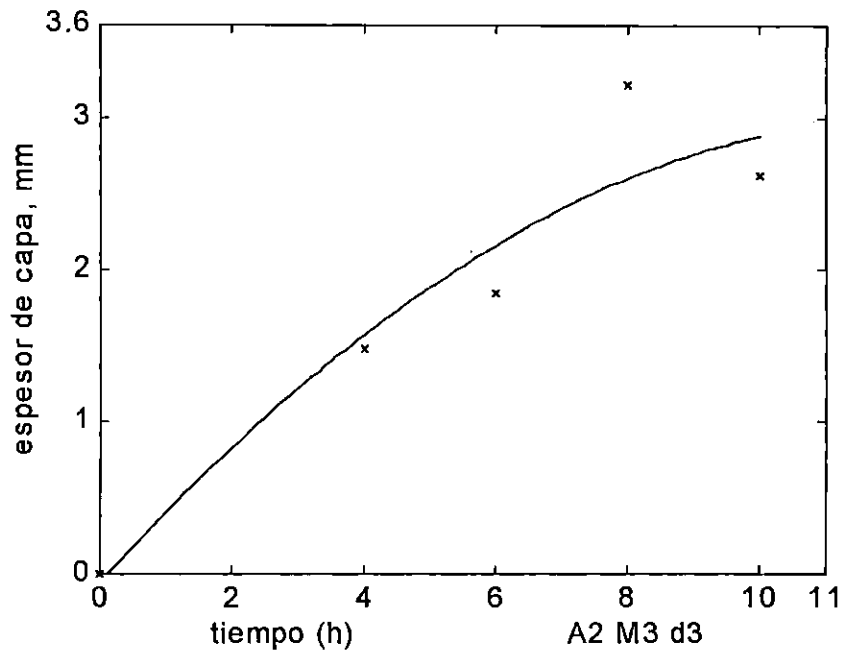


Fig. 2.59 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 10mm.

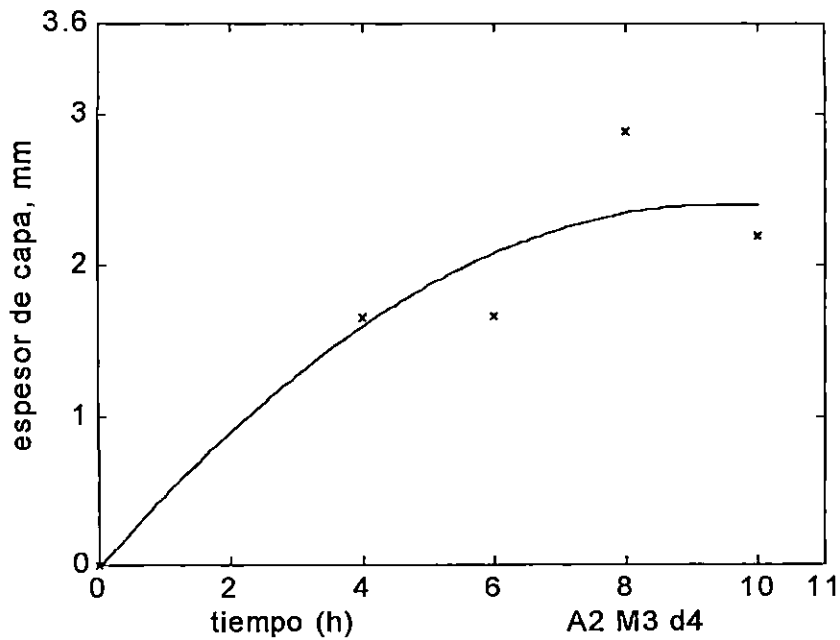


Fig. 2.60 Grafica de espesor de capa cementada vs tiempo de cementación para una distancia entre probetas de 10mm.



## 2.9 ECUACIONES CARACTERISTICAS DE CADA CURVA.

A continuación se muestran las ecuaciones de las curvas que rigen cada una de las tendencias de las graficas, en estas ecuaciones la variable dependiente es el espesor de capa cementada y la variable independiente es el tiempo ( t ).

Las ecuaciones corresponden para un determinado acero, mezcla, distancia entre probetas y tiempo de cementación.

MEZCLA	DISTANCIA	ACERO	ECUACIÓN
M1	d1	A1	$-0.0119 t^2 + 0.1918 t + 0.0201$
M1	d2	A1	$-0.0156 t^2 + 0.2184 t + 0.0009$
M1	d3	A1	$-0.0115 t^2 + 0.1904 t - 0.0097$
M1	d4	A1	$-0.0088 t^2 + 0.1824 t + 0.0129$
M2	d1	A1	$-0.0098 t^2 + 0.1688 t - 0.0313$
M2	d2	A1	$-0.0048 t^2 + 0.1479 t + 0.0142$
M2	d3	A1	$-0.0040 t^2 + 0.1409 t - 0.0105$
M2	d4	A1	$-0.0074 t^2 + 0.1724 t - 0.0075$
M3	d1	A1	$-0.0080 t^2 + 0.1522 t + 0.0143$
M3	d2	A1	$-0.0058 t^2 + 0.1509 t + 0.0120$
M3	d3	A1	$-0.0080 t^2 + 0.1790 t - 0.0002$
M3	d4	A1	$-0.0076 t^2 + 0.1790 t - 0.0117$
M1	d1	A2	$-0.0111 t^2 + 0.2814 t + 0.0098$
M1	d2	A2	$-0.0182 t^2 + 0.3719 t - 0.0117$
M1	d3	A2	$-0.0156 t^2 + 0.4162 t + 0.0227$
M1	d4	A2	$-0.0095 t^2 + 0.3809 t - 0.0044$
M2	d1	A2	$-0.0152 t^2 + 0.3561 t + 0.0048$
M2	d2	A2	$-0.0096 t^2 + 0.3896 t - 0.0360$
M2	d3	A2	$-0.0168 t^2 + 0.3709 t + 0.0017$
M2	d4	A2	$-0.0146 t^2 + 0.3747 t - 0.0442$
M3	d1	A2	$-0.0064 t^2 + 0.2647 t - 0.0125$
M3	d2	A2	$-0.0120 t^2 + 0.3115 t - 0.0281$
M3	d3	A2	$-0.0190 t^2 + 0.4846 t - 0.0596$
M3	d4	A2	$-0.0272 t^2 + 0.5145 t - 0.0231$

## 2.10 Análisis de resultados

Las variables involucradas en el diseño del proceso de cementación sólida son, la distancia entre probetas, el tiempo de cementación, el tipo de mezcla y los aceros a utilizar; en lo que a los tipos de aceros respecta, se pudo apreciar una marcada diferencia en las profundidades de capa cementada, observando que el acero AISI 3115 presento los mayores espesores de capa cementada, ya que comparando los resultados obtenidos para una misma mezcla (M1, M2 ó M3) por ejemplo en la tabla 7 y en la tabla 10 se puede apreciar claramente que los valores de capa cementada para los mismos tiempos de cementación son mayores que los obtenidos en el acero AISI 1020.

El efecto anterior se produjo por los elementos aleantes que contiene el acero AISI 3115. Los elementos que contiene este acero son: cromo (Cr), Manganeso (Mn), níquel (Ni) y Molibdeno (Mo); de todos estos elementos todos a excepción del níquel (Ni), facilitan la penetración de los átomos de carbono, elementos que no posee el acero AISI 1020, lo cual es una de las razones por las que el acero AISI 3115 presenta los mayores espesores de capa cementada; otro factor que influye en tal efecto es el porcentaje de carbono contenido en dicho acero, que es de 0.15 %; es decir, 0.05% menos que el acero AISI 1020, ya que el material tiene menos porcentaje de carbono posee una mayor capacidad de difusión de los átomos de carbono. Finalmente, este efecto se refleja en un incremento del espesor de la capa cementada.

Otra variable de análisis es la distancia entre las probetas, de lo cual se pudo determinar que efectivamente tuvo una influencia en el espesor de capa, ya que a medida que se incrementaba la distancia normal entre las probetas en la mayoría de los casos los espesores de capa se incrementaron. Este fenómeno se puede explicar desde el punto de vista del mecanismo de difusión de los átomos de carbono entre

las superficies normales de las probetas, por ejemplo para la distancia  $d_1$  igual a 5 mm, los átomos de carbono se encontraron hasta la mitad de la distancia se pueden difundir a una de las superficies del acero y los átomos de carbono en la otra mitad de la otra superficie, para la distancia  $d_2$  igual a 7.5 mm los átomos de carbono tenían un mayor espacio mayor para concentrarse en una mayor cantidad y así incrementar la cantidad de átomos para poderse difundir, así sucesivamente para las demás distancias restantes. Esto quiere decir que a medida que se incremento la distancia entre las probetas, dio como resultado un incremento de la capa cementada sin hacer distinción entre los dos tipos de aceros; esto es válido para las distancias especificadas como parámetro de diseño.

Es importante mencionar la concentración de la mezcla carburante (M1, M2 y M3), ya que esta juega un papel muy importante en el tratamiento termoquímico de cementación sólida en lo que al espesor de capa cementada respecta. Se puede observar en los resultados obtenidos en la tabla 11 del acero AISI 1020 que para los tiempos de 4 y 6 horas las mezclas con las que se obtienen mayores espesores de capa cementada son para las mezclas M1 y M3 respectivamente, para el tiempo de 8 horas la mezcla carburante con la que se obtiene mayores espesores de capa es la mezcla M2, sin embargo para el tiempo de 10 horas se puede observar que la tendencia se cumple que al aumentar la concentración de mezcla carburante aumenta respectivamente el espesor de la capa.

Evaluando los resultados para el acero AISI 3115 se puede observar que para un tiempo de 4 horas se pueden obtener espesores de capa bastante similares ya sea utilizando una mezcla pobre (M1) como una mezcla rica (M3); no así, para la mezcla intermedia M2 donde los espesores son un poco menores, para un tiempo de 6, horas la mezcla óptima para obtener grandes espesores es la intermedia. Al evaluar el tiempo de 8 horas de cementación se puede determinar que la mezcla mas rica (M3) es la que proporciona mayores espesores, no así para el tiempo de 10 horas.



# CAPÍTULO III

### 3.0 MANUAL DEL USUARIO

#### 3.1 INDICACIONES DE COMO ACCESAR A LA INFORMACIÓN:

El primer paso para acceder al contenido del sitio web, es posicionarse sobre el texto que dice: “CEMENTACION SÓLIDA”, que está a la izquierda de la pantalla, como se ve a continuación.



Al hacerlo, el cursor se transformará en una mano, que al hacer click en ese momento abrirá una nueva página, en la cual se encuentra el concepto básico de

cementación sólida, especificaciones técnicas de los aceros AISI 1020 y AISI 3115, además de su composición química y algunos usos, proporcionando a la vez una breve explicación de dicho procedimiento.

También se observa que existen dos clasificaciones de acero: AISI 1020 y AISI 3115, en cada una de ellas se puede acceder para ver el análisis de cada uno de los aceros antes mencionados, solamente posicionándose sobre el texto que indica el nombre de las mezclas para cada uno de ellos, así:

**CEMENTACION SOLIDA**

La cementación es el procedimiento más antiguo de saturación de la superficie con carbono que se aplica para obtener dureza y resistencia alta al desgaste de la capa superficial conservando el núcleo blando y tenaz -según el tipo de materiales empleados para la cementación se distinguen tres tipos de cementación.

- A. Carburantes Sólidos
- B. Carburantes Líquidos
- C. Carburantes Gaseosos.

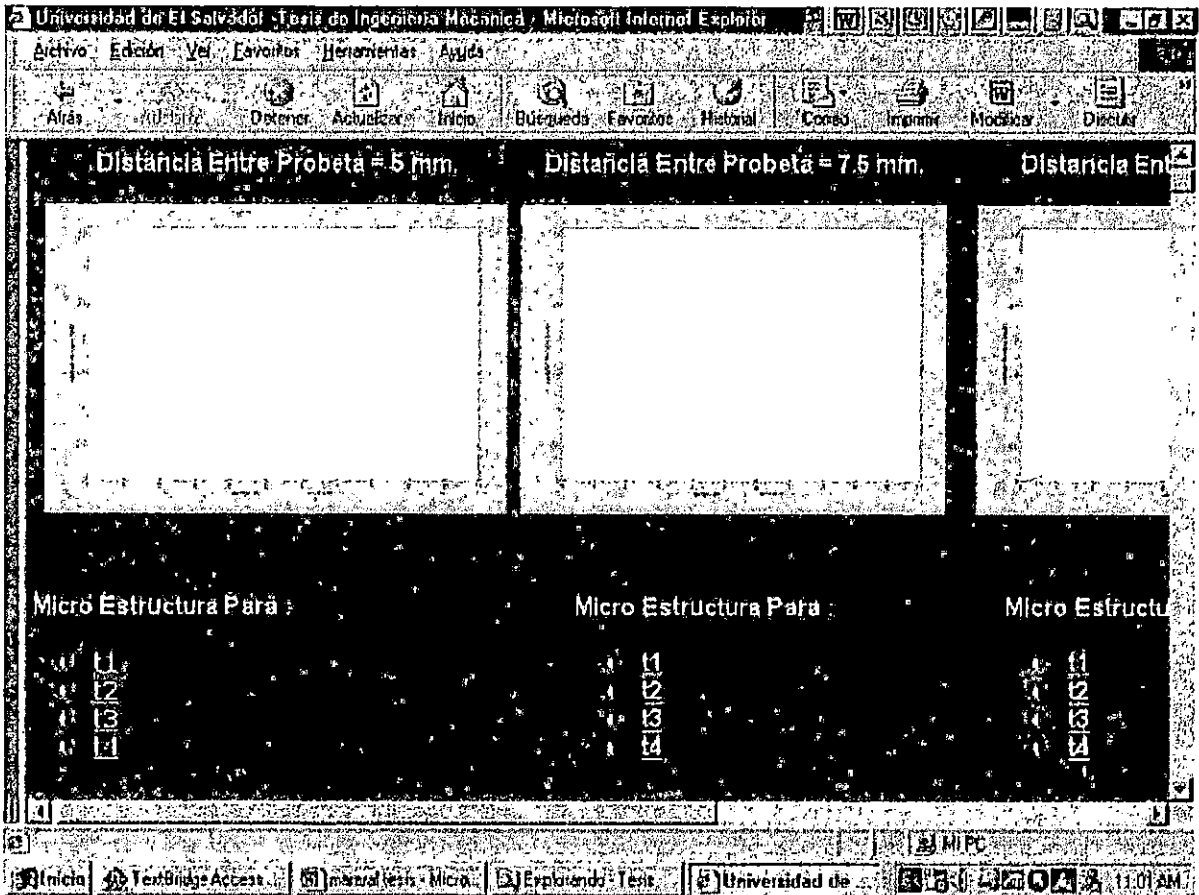
Aquí se presenta un estudio de cementación sólida con diferentes porcentajes de Carbono Vegetal y Agente Activador (Carbonato de Calcio) aplicado en dos aceros de uso común en la industria nacional los cuales son

**Acero AISI 1020(A)**

- Mezcla 1 (M1) = 90.10 % de Carbono Vegetal y 9.90 % de Carbonato de Calcio
- Mezcla 2 (M2) = 80.20 % de Carbono Vegetal y 19.80 % de Carbonato de Calcio
- Mezcla 3 (M3) = 70.30 % de Carbono Vegetal y 29.70 % de Carbonato de Calcio

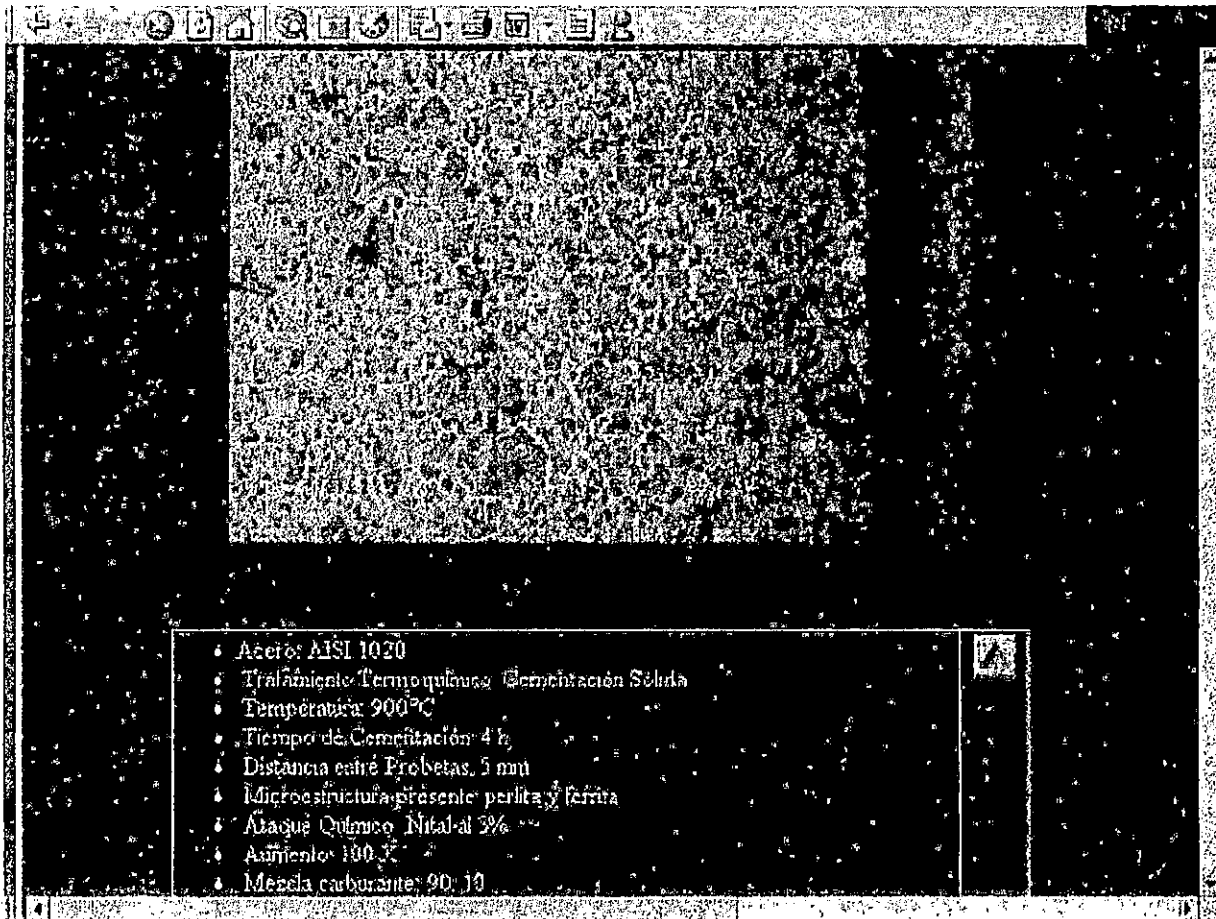
Dentro del acero AISI 1020 se tienen tres opciones, se puede acceder a ellas de la misma forma que anteriormente se indicó.

Por ejemplo para la mezcla 1 ( M1) se obtiene lo siguiente:



Se obtienen cuatro gráficos distintos para las diferentes distancias y se puede acceder a los íconos que contienen los distintos tiempos; cuando se ingresa a cada uno de estos íconos que indican los tiempos, se obtienen las fotografías para dicho tiempo del acero AISI 1020 junto a su descripción de las condiciones bajo las cuales se efectuó el experimento así:

para t1 de la primera gráfica de la izquierda;

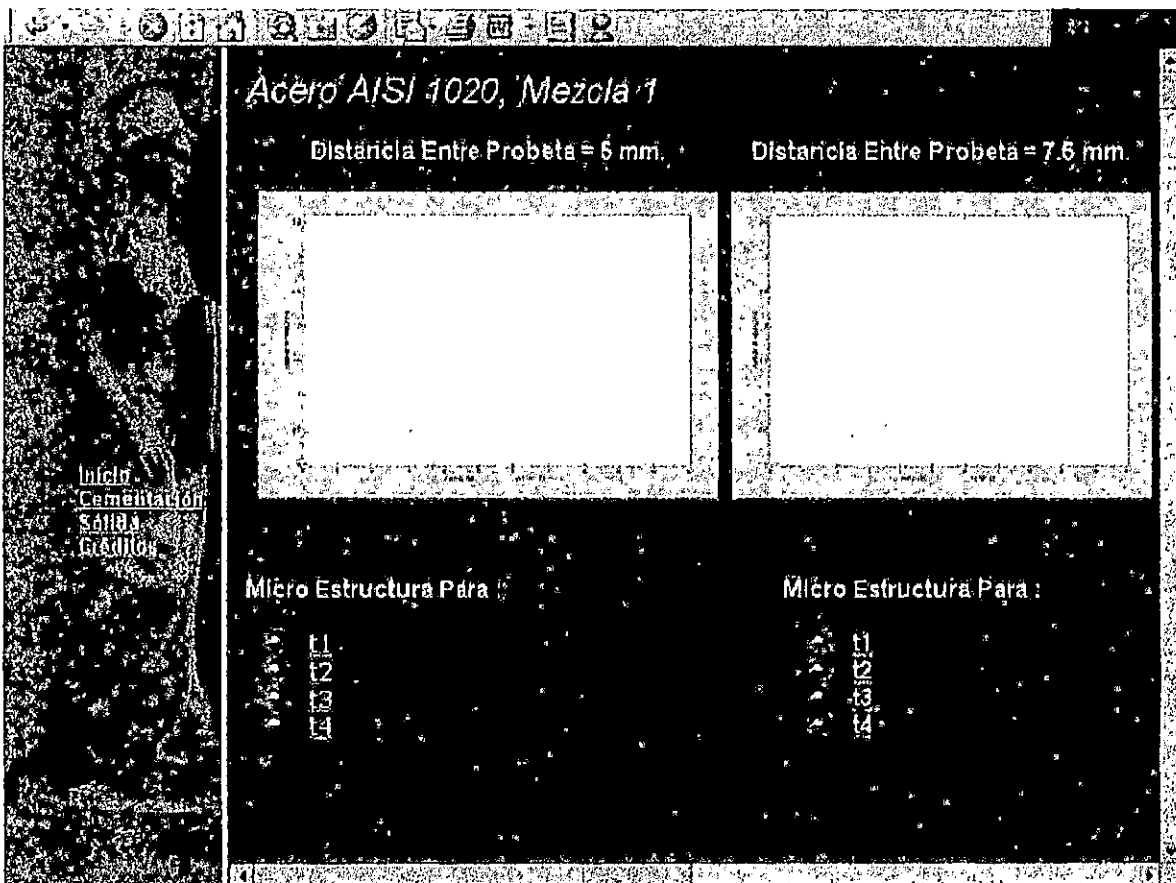


A la derecha de la figura anterior se observa un icono con una flecha circunscrita, la cual cuando se acciona hace retornar al menú, donde se puede elegir nuevamente otro tiempo de la misma gráfica o de cualquiera de las otras gráficas que se encuentran dentro de la misma pantalla.

De esta misma forma se puede ver el análisis completo y los datos obtenidos durante el experimento de cementación sólida para cualquiera de los dos aceros.

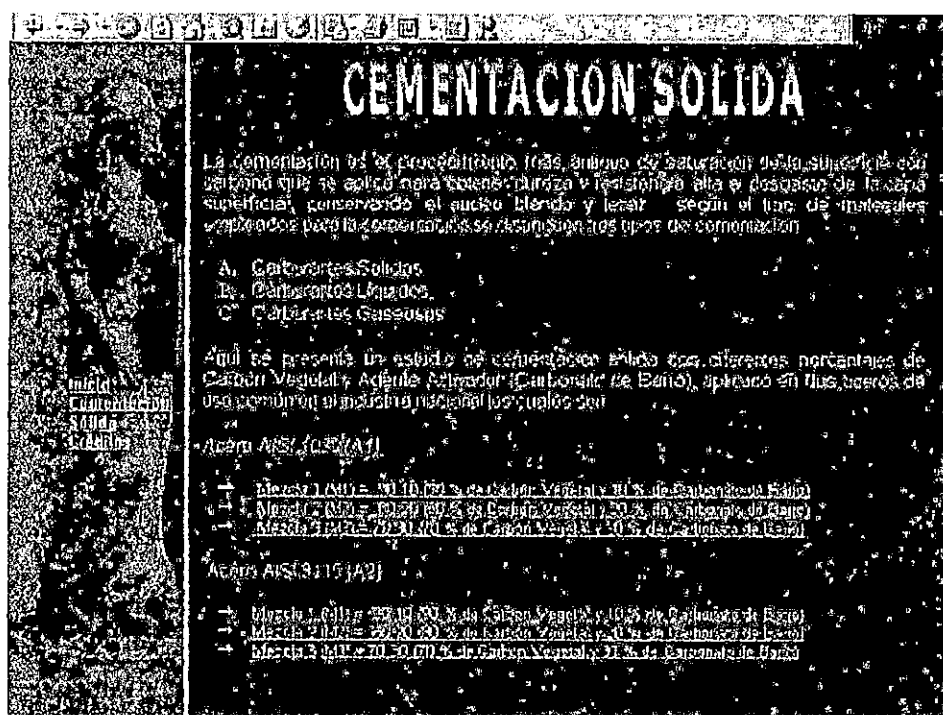
Cuando se quiera retornar de nuevo al menú principal basta con posicionarse sobre el título que dice: “ INICIO”, que está ubicado a la izquierda de la pantalla.

Otra forma de retornar a la página anterior de cada una de las páginas presentes en este sitio web, es haciendo click en la flecha de la barra superior izquierda, que se indica con un circulo verde y que indica “ Anterior”, como se hace en cualquier sitio de la web.

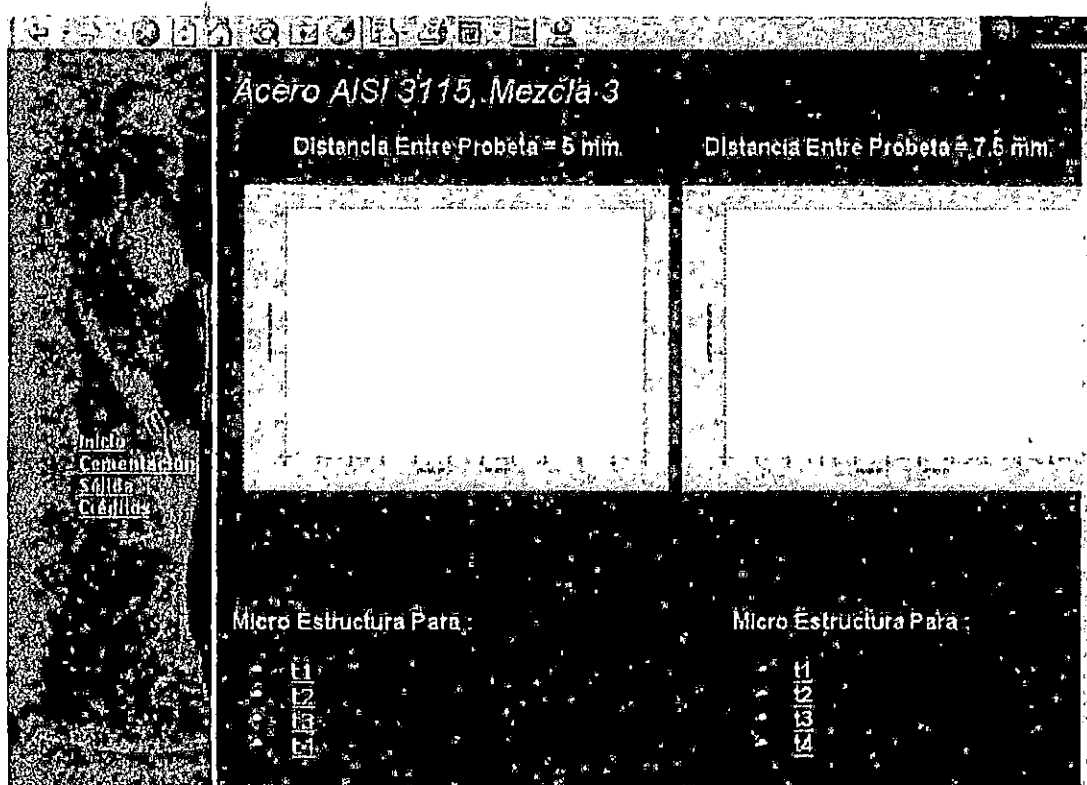


Para acceder a la información del acero AISI 3115, se hace de la misma forma; haga click en donde están los iconos de dicho acero, que se encuentra ubicado en las

últimas filas de la pantalla, dependiendo del dato que se busque, ya que existen tres opciones: mezcla 1, mezcla 2 y mezcla 3, como se muestra a continuación:

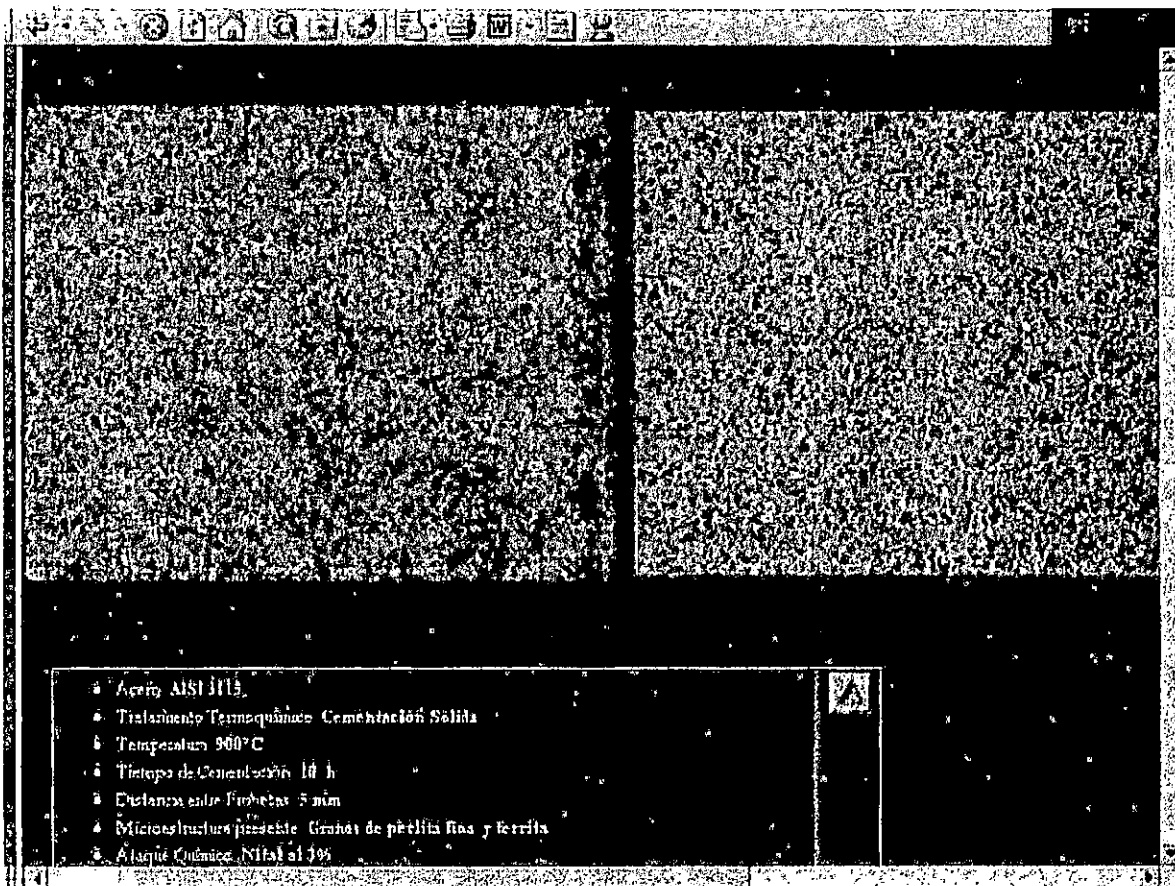


Como ejemplo se accederá a la mezcla 3 para ver sus resultados:



Se observa que de igual forma al acero AISI 1020 se obtienen cuatro gráficas distintas, de diferentes distancias y debajo de cada una de éstas se ven iconos de diferentes tiempos, en los cuales, si se hace un click se obtiene la fotografía correspondiente y su descripción completa, así:

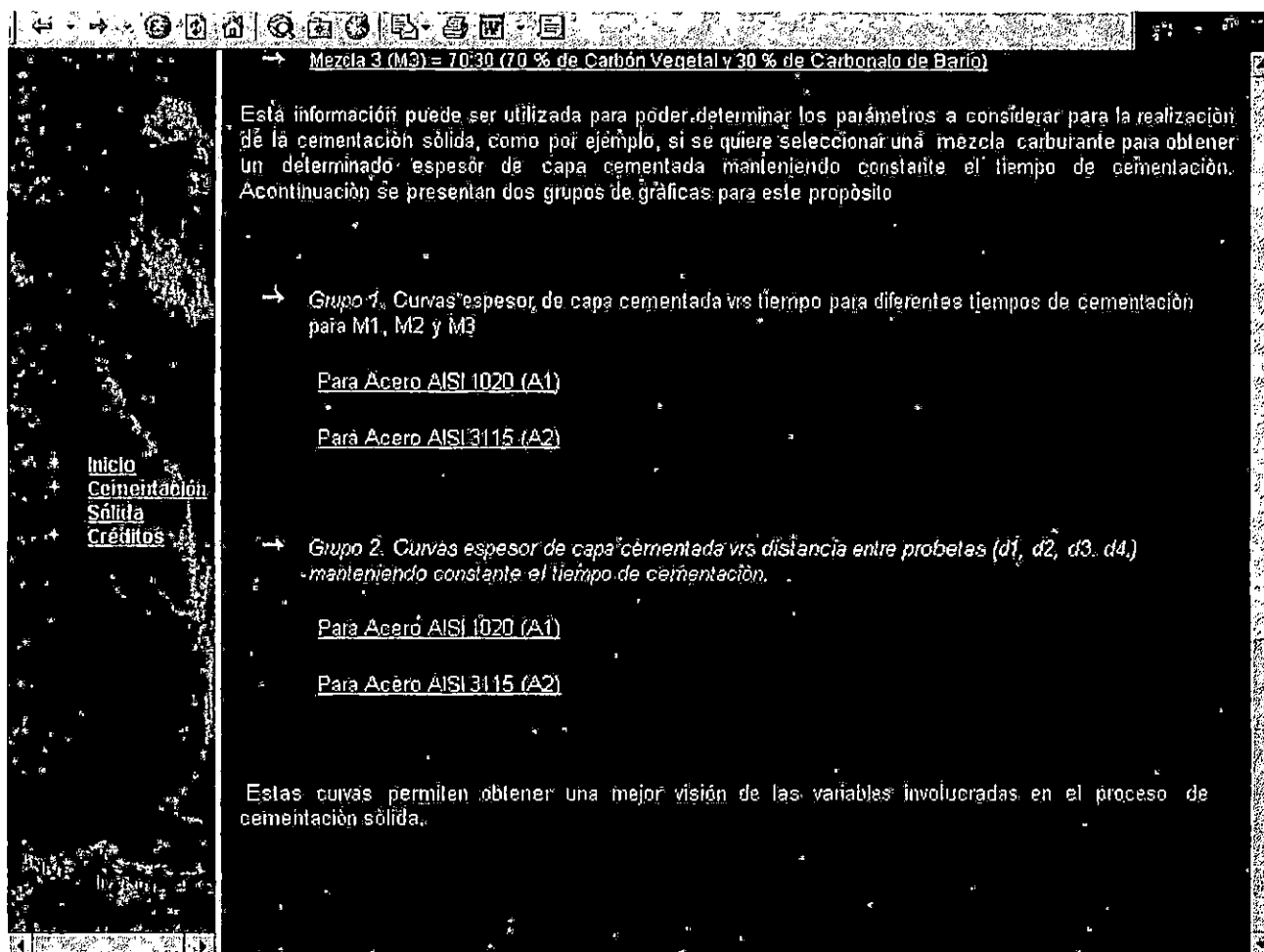
Para  $t_4$  en la primera gráfica:



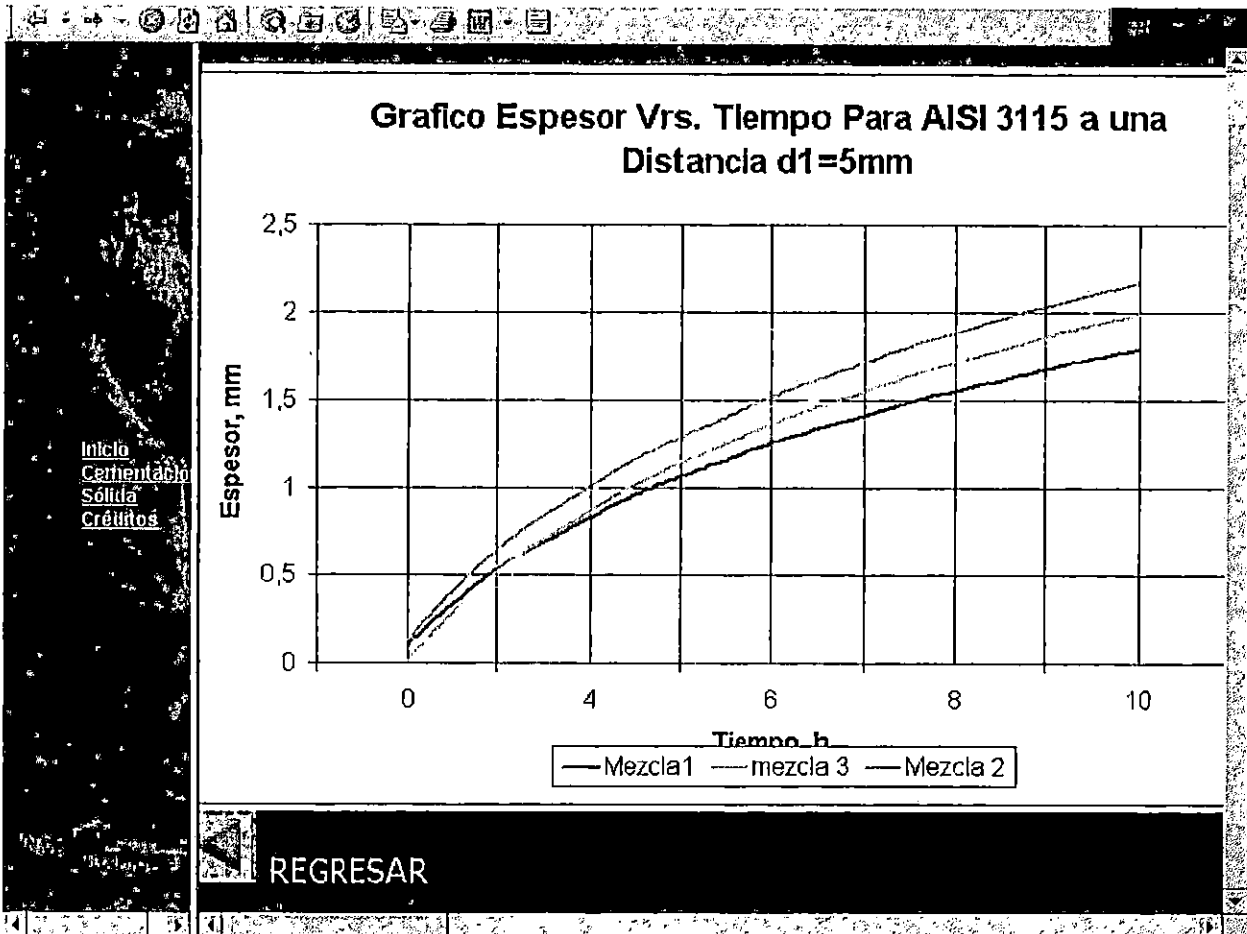
Se tienen dos fotografías, de las cuales la de la izquierda es la que indica la capa cementada desde la superficie y la de la derecha es su continuación, lo que significa que es una capa cementada muy profunda. Al hacer click en el botón de la derecha del texto se regresa al menú donde se puede elegir nuevamente otro tiempo de la misma gráfica u otro gráfico con sus distintos tiempos.



Existe otra clasificación para obtener información acerca del experimento, la cual comprende la clasificación que aparece en la página de “CEMENTACIÓN SÓLIDA”, tal como se aprecia en la siguiente figura:



Aquí se observan dos grupos, de los cuales el primero proporciona unas gráficas de espesor de capa versus el tiempo de cementación; para acceder a este grupo, se puede hacer eligiendo el acero AISI 1020 o el acero AISI 3115 haciendo click sobre el texto. Como ejemplo se hará el procedimiento para el acero AISI 3115 y se obtiene lo siguiente:

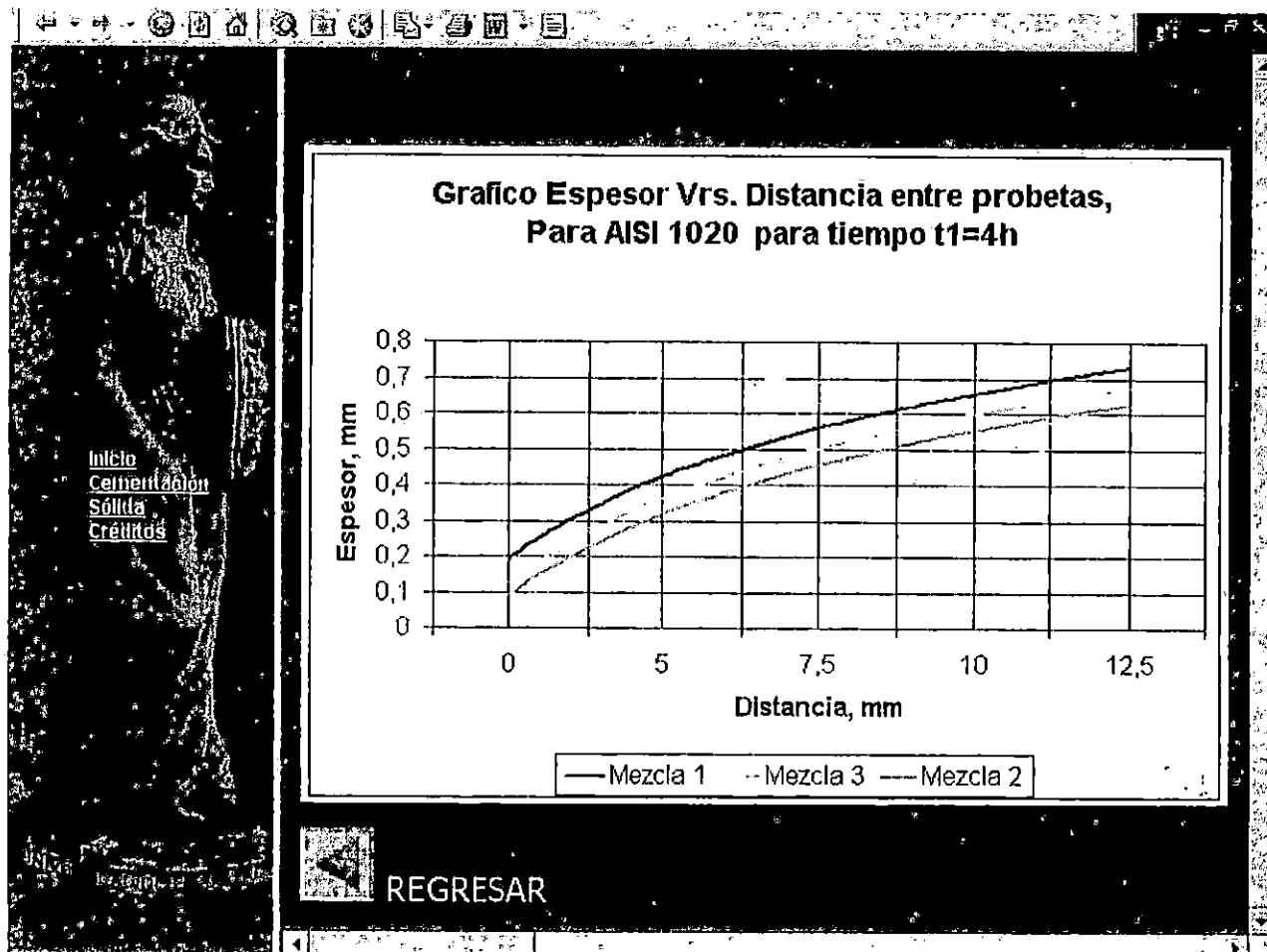


En donde se observan las gráficas de distintos colores para cada una de las mezclas, de aquí se puede elegir el tiempo y la mezcla según sea la necesidad.

Se pueden ver las gráficas correspondientes a las otras distancias solamente con desplazar la barra que está ubicada debajo del botón de retorno.

Debajo de la gráfica se ve un botón que dice: "REGRESAR", cuando se acciona hace retornar a la página de cementación sólida, en donde se puede elegir nuevamente otra opción.

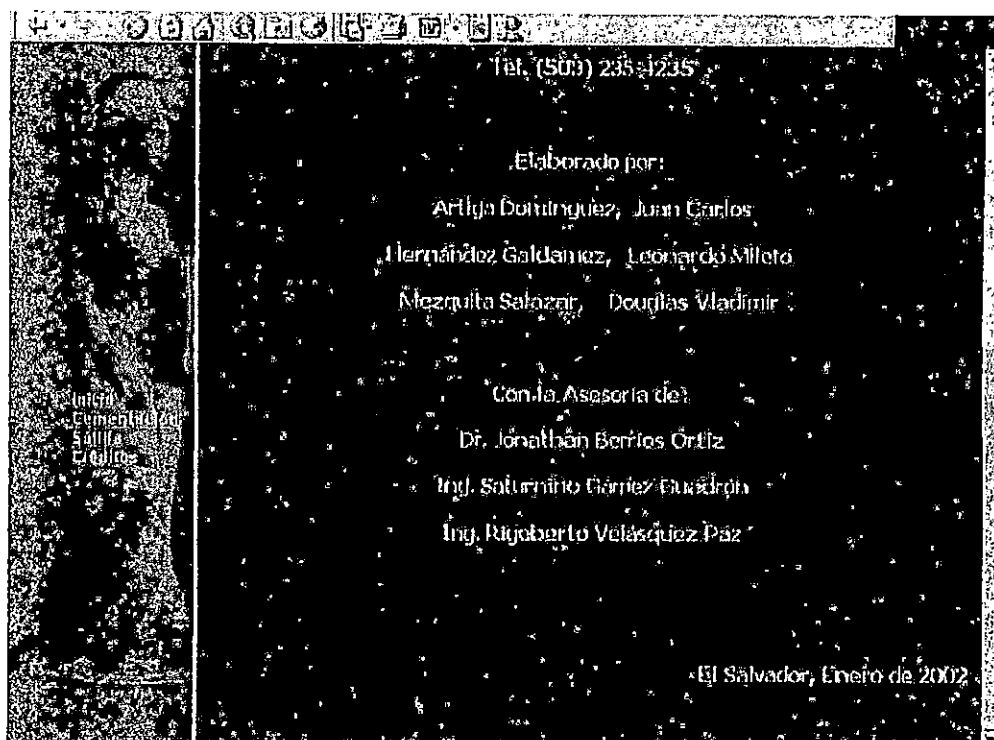
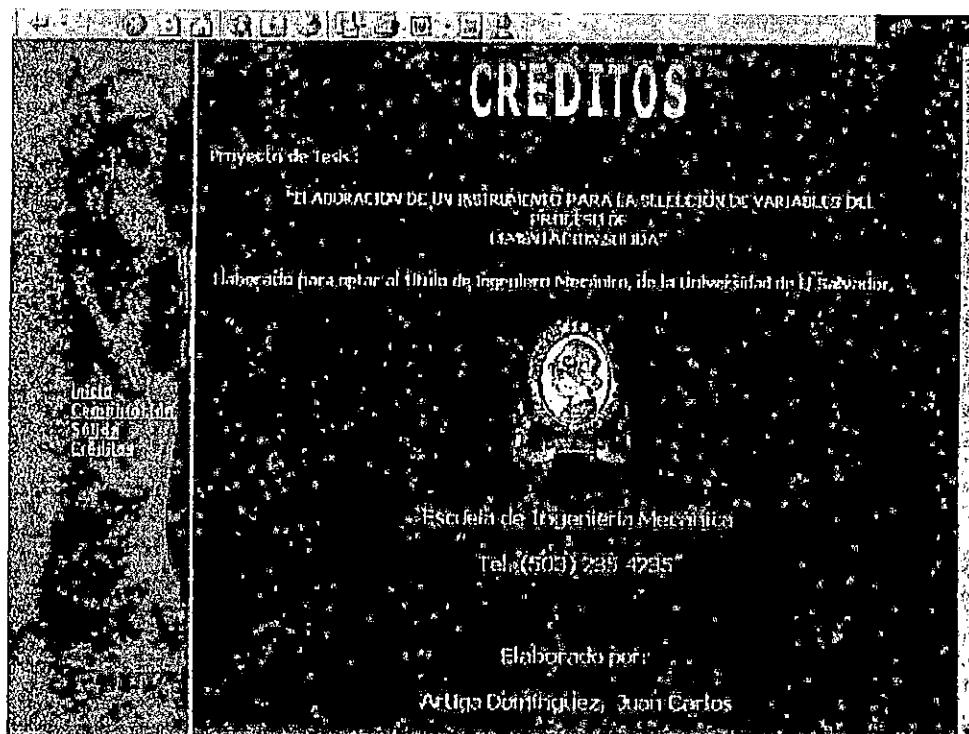
Para este caso se elegirá como ejemplo la opción del acero AISI 1020 del grupo 2 y se obtiene lo siguiente:



Este gráfico está representando las mezclas con los mismos colores que el anterior, con la diferencia que en este gráfico se tiene espesor de capa versus la distancia entre probetas, de modo que el usuario puede elegir la mezcla y distancia entre probetas que mas le convenga según el espesor de capa deseado.

Cuando se desee volver nuevamente al menú anterior solamente se debe accionar el botón de retorno.

Para obtener información acerca de los tesisistas, coordinador y asesores de dicho proyecto, se debe posicionar en el título que dice "CREDITOS", obteniéndose lo que muestra la siguiente pantalla:



En donde se ve la fecha en que se desarrolla este proyecto, el nombre de la universidad, su teléfono para cualquier contacto o duda acerca de dicho proyecto, como también los nombres de las personas que desarrollaron el experimento.

Y para volver a la página principal solamente se hace click en la palabra "INICIO".

SAN SALVADOR FEBRERO DE 2002  
HACIA LA LIBERTAD POR LA CULTURA

## COSTOS ESTIMADOS DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

A continuación se presentan los costos de una manera resumida, para la realización del trabajo de graduación de cementación sólida, en estos se incluyen los costos de materia prima, consumo de energía eléctrica, mano de obra y depreciación del equipo utilizado.

### Costos de materia prima

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo/U (€)	Costo/Total (€)
Lámina de Hierro 1/8", 2 t 1 m.	Pliego	1	202.00	202.00
Acero AISI 1020, $\Phi$ 1" t 1.5 m.	Metro	1.5	100.00	150.00
Acero AISI 3115, $\Phi$ 25mm t 1.5 m.	Metro	1.5	88.00	132.00
Soda Cáustica Industrial	Libra	1	43.75	43.75
Carbón Vegetal de balsamo	Libra	50	4.00	200.00
Alumina de 0.3 $\mu$ m	Gramos	70	5.00	350.00
Carbonato de bario	Gramos	510	1.15	586.50
Papel lija	Pliego	50	6.00	300.00
Resina fenolica	Botella	2	43.75	87.50
Alcohol etílico	Litro	1	62.40	62.40
Papel Toalla	Rollo	4	6.50	26.00
Reactivo para ataque químico (nital)	Gramos	50	2.00	100.00
FotoMicrografías	Unidad	300	3.33	1000
<b>TOTAL</b>				<b>3239.65</b>

### Costos de papelería

Descripción	Costo total (€)
Papelería, Tinta, Fotocopias, Hora Computadora, Otros	5000.00
<b>TOTAL</b>	<b>5000.00</b>

### Costos de energía eléctrica

El costo por kilowatt-hora es de ¢ 1.02, a continuación se presenta un cuadro resumen del equipo utilizado y la cantidad de horas utilizadas, además se incluye la depreciación del equipo.

Equipo	Pot (kw)	Horas utilizadas	Costo por consumo de energía(¢)	Depreciación(¢)	Costo total(¢)
Horno	5.5	200	5610	1500.00	7110.00
Cortadora	1.5	32	49.00	58.00	107.00
Embutidora	1.69	5	8.60	30.00	38.60
Pulidora	0.746	48	36.50	58.00	94.50
Vibradora	0.746	20	15.20	65.25	80.50
Microscopio	0.50	120	6.00	725.00	731.00
Torno	1.5	80	122.40	246.50	368.90
Herramientas	-	200	-	100	100.00
<b>TOTAL</b>					<b>8630.00</b>

### Costos de mano de obra

Los costos de mano de obra se calcularán a partir del tiempo invertido en la realización del trabajo de graduación, los viáticos y los costos por consultoría eterna. Los costos totales de la mano de obra son de ¢ 456000.00.

### Costos totales del proyecto

Tomando en cuenta todos los rubros anteriores los costos totales del proyecto suman un total de ¢ 472869.65.

## CONCLUSIONES

El tipo de acero que se utiliza en un proceso de cementación debe tener como característica principal un bajo contenido de carbono, además el grado de aleación de este tiene un papel muy importante en la velocidad de difusión que puedan tener los átomos de carbono en el acero y en las propiedades del núcleo y de la capa cementada.

Los elementos aleantes que retardan la penetración de los átomos de carbono en el acero y que por lo tanto incrementan el tiempo de cementación son el Ni, y el Si, sin embargo la presencia del Cr, Mo y Mn aceleran la penetración de los átomos de carbono en el acero, disminuyendo los tiempos de cementación necesarios para obtener espesores de capa cementada requeridos.

El espesor de la capa cementada es influenciada por las variables de diseño del experimento; se pudo determinar que a medida que se incremento la distancia entre probetas y los tiempos de cementación, en la mayoría de los casos la capa cementada se incrementó. En lo que a los aceros respecta, se pudo determinar que el acero AISI 3115 presento espesores de capa cementada relativamente grandes y más definidos que el AISI 1020; lo cual es debido al porcentaje de carbono que cada uno de los aceros tiene y de los elementos aleantes. La tendencia esperada con respecto a la mezcla carburante era que a mayor porcentaje de carbonato de bario (mezcla cada vez más rica) se obtendrían mayores espesores de capa cementada, situación que en algunos de los casos no se cumplió como por ejemplo para el acero AISI 1020 para un tiempo de 4 h.

Con la elaboración de la página web se sistematizó los resultados obtenidos, ya que esto permite una mejor visualización de los resultados, ayudando al usuario a tener



una guía para la selección del acero, mezcla, tiempo y distancia entre probetas a utilizar, dependiendo estas del espesor de capa cementada que se desee obtener según sea la necesidad, en el capítulo 3 se puede observar el manual del usuario para utilizar el sitio web que recopila los resultados de esta investigación.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Es importante que se le de seguimiento en otros trabajos de graduación a esta investigación involucrando otras variables de diseño o modificar algunas de las que se seleccionaron en este experimento, como por ejemplo se sugiere realizar el tratamiento termoquímico de cementación con carbón vegetal de abedul o de roble, comparar los resultados con los que ya se tienen y así mejorar el procedimiento.
- ✓ Que esta investigación sirva como incentivo para futuros trabajos en el área de metalurgia y en general, así fomentar, promover nuevos proyectos.
- ✓ Elaborar una mayor cantidad de muestras metalográficas tomando diferentes valores de dureza para la misma probeta tratada bajo las mismas condiciones, esto permitirá obtener una mejor tendencia de los resultados y así poderles dar un tratamiento estadístico adecuado.
- ✓ Utilizar la página web para generar vínculos con otras empresas y así sacarle un mejor provecho a la investigación.

**BIBLIOGRAFIA**

1. ACEROS DE LLODIO S.A.: Aceros de cementación, ediciones Urmo SA, 1ª edición, España 1975
2. A. MALISHEV; G. NIKOLAYEV & SHUVALOV: Tecnología de los metales , Limusa, Noriega editores, Mexico 1994
3. HANS DILP STUDEMANN: Manual del Ingeniero tecnico vol. TII, Tratamiento térmico de los aceros, primera edición 1980
4. JOSE APRAIZ BARREIRO: Tratamiento térmico de los aceros, 8ª edición
5. SYDNEY H, AVNER: Introducción a la metalurgia física, 2ª edición, McGraw- Hill, Mexico 1974
6. J. C. ANDERSON: Ciencia de los materiales, 1ª edición, Limusa
7. YU LAJTIN & ARZAMAZOV: Tratamiento químico térmico de los metales, editorial MIR, Moscú URSS 1987
8. DONALD R ASKELAND: Ciencia e ingeniería de los materiales, 1ª edición, Editorial Iberoamerica
9. WILLIAM F SMITH: Fundamentos de la ciencia e ingeniería, 2ª edición, McGraw-Hill

# ANEXOS

## ANEXO I

Dureza vickers de acuerdo al promedio de las diagonales al realizar una indentación con una carga de 200 g.

d en μm	Dureté Vickers HV									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	1027	1017	1006	996	985	975	965	955	946	937
20	927	918	909	900	891	883	874	866	857	849
21	841	833	825	817	810	802	795	788	780	773
22	766	759	753	746	739	733	726	720	713	707
23	701	695	689	683	677	672	666	660	655	649
24	644	639	633	628	623	618	613	608	603	598
25	593	589	584	579	575	570	566	562	557	553
26	549	544	540	536	532	528	524	520	516	512
27	509	505	501	498	494	490	487	483	480	476
28	473	470	466	463	460	457	453	450	447	444
29	441	438	435	432	429	426	423	420	418	415
30	412	409	407	404	401	399	396	394	391	388
31	386	383	381	379	376	374	371	369	367	364
32	362	360	358	355	353	351	349	347	345	343
33	341	339	336	334	332	330	329	327	325	323
34	321	319	317	315	313	312	310	308	306	304
35	303	301	299	298	296	294	293	291	289	288
36	286	285	283	281	280	278	277	275	274	272
37	271	269	268	267	265	264	262	261	260	258
38	257	255	254	253	252	250	249	248	246	245
39	244	243	241	240	239	238	237	235	234	233
40	232	231	229	228	227	226	225	224	223	222
41	221	220	218	217	216	215	214	213	212	211
42	210	209	208	207	206	205	204	203	202	202
43	201	200	199	198	197	196	195	194	193	192
44	192	191	190	189	188	187	186	186	185	184
45	183	182	182	181	180	179	178	178	177	176
46	175	175	174	173	172	172	171	170	169	169
47	168	167	166	166	165	164	164	163	162	162
48	161	160	160	159	158	158	157	156	156	155
49	154	154	153	153	152	151	151	150	150	149
50	148	148	147	147	146	145	145	144	144	143
51	143	142	141	141	140	140	139	139	138	138
52	137	137	136	136	135	135	134	134	133	133
53	132	132	131	131	130	130	129	129	128	128
54	127	127	126	126	125	125	124	124	124	123
55	123	122	122	121	121	120	120	120	119	119
56	118	118	117	117	117	116	116	115	115	115
57	114	114	113	113	113	112	112	111	111	111

## ANEXO 2

Foto micrografía de un acero AISI 1020 indentado con una maquina de dureza Vickers y una carga de 200 g. Obsérvese el rombo de la indentación al centro de la foto.

