



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Obtención de capas boruradas en  
aceros al carbono y aleados empleando  
bórax como medio de aporte.

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Omar Cortes Herrera

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Arturo Barba Pingarrón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**OBTENCION DE CAPAS BORURADAS EN ACEROS AL CARBONO Y  
ALEADOS, UTILIZANDO BORAX COMO MEDIO DE APORTE.**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al Dr. Arturo Barba Pingarrón, por su gran apoyo, su paciencia y el tiempo que dedico hacia la realización de este trabajo. Gracias Profesor.*

*A la UNAM y la Facultad de Ingeniería, que fueron mi segunda casa, y me han entregado un tesoro invaluable, mi preparación académica. Gracias.*

*A mis padres por su paciencia, confianza y apoyo, que me brindaron durante este largo recorrido, en mi preparación profesional. A mi padre Amando por enseñarme el valor de la responsabilidad, y que solo trabajando se pueden llegar a tener lo que uno desea. A mi madre Susana que me aportó esa fortaleza interna que siempre me demostró y que a pesar de los obstáculos que se tienen en la vida uno debe sortearlos con la mejor actitud posible. Solo me queda decirles. Lo logre, por fin acabe, y fue gracias a ustedes.*

*A mis hermanos Betty y Armando, que crecieron conmigo, y han estado a mi lado en cada uno de los buenos y malos momentos de mi vida, les agradezco su compañía y apoyo.*

*A mi tío Sidronio que a lo largo de mi infancia, has sido mi ejemplo a seguir, y he seguido cada uno de tus pasos buenos y malos, y más por ese apoyo que siempre nos has brindado tanto a mi persona, como a mi familia, sinceramente gracias tío.*

*A los que ya no están, que se me adelantaron en el camino, y que sé que donde se encuentren, están felices por este gran triunfo que he logrado. Gracias, Madrina*

*Lupita, Padrino Álvaro, Tía Bertha, Abuelita Flora, Abuelito Lupe, Abuelito Alfredo nunca los olvidaré.*

*A todas esas personas que conocí durante este largo recorrido, amigos, conocidos, y personas que de alguna manera se atravesaron en mi vida y me dejaron experiencias buenas y malas, le agradezco por haberme enseñado a vivir.*

*Y los que me faltaron Abuelita Adela, tíos, primos, gracias por ser parte de mi familia.*

***Gracias, Sinceramente. Omar Cortes Herrera***

**OBJETIVO GENERAL.**

(a) Realizar un tratamiento superficial de borurado en algunos aceros de producción nacional usando bórax como medio de aporte.

(b) Realizar una caracterización de las capas de borurado producidas sobre diferentes superficies de aceros, por medio de observación microscópica y microdureza.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES SOBRE TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS SUPERFICIALES EN ACEROS.....	4
1.1 Tratamientos termoquímicos.....	4
1.2 Antecedentes teóricos del tratamiento superficial borurado.....	9
CAPÍTULO 2. CARACTERISTICAS DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL BORURADO.....	14
2.1 Marco histórico.....	14
2.1.1 Ventajas y limitaciones del borurado.....	17
2.1.2 Ejemplos de aplicaciones.....	19
2.2 Características de los boruros de hierro.....	23
2.2.1 Tipos de capas boruradas.....	26
2.2.2 Efecto de los elementos aleantes.....	28
2.3 Tratamiento superficial de borurado en polvo y pasta.....	30
2.3.1 Principales variables del proceso de borurado en polvo y pasta.....	35
CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	37

---

3.1 Preparación del sustrato.....	37
3.2 Realización del recubrimiento de borurado.....	39
3.2.1 Preparación de la mezcla.....	40
3.2.2 Realización del revestimiento superficial de Borurado.....	42
CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	46
4.1. Caracterización.....	46
4.1.1 Microscopia electrónica de barrido.....	47
4.1.2 Microdureza.....	58
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	63
CAPITULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	66
ANEXOS.....	72



## INTRODUCCIÓN

Generalmente, los tratamientos térmicos superficiales tienen por objeto el endurecimiento de la superficie de los metales y, por consiguiente, en muchas ocasiones, el aumento de la resistencia al desgaste, conservando la ductilidad y tenacidad del núcleo.

Existen aplicaciones que demandan piezas o materiales que resistan condiciones que son cada vez más severas como largos ciclos de trabajo, temperaturas de operación cada vez más elevadas, o procesamiento de materiales que generen algún tipo de desgaste. Por ello, es necesario que dichos materiales sean sometidos a procesos que los provean de las propiedades físicas y mecánicas adecuadas para tales fines, a costos razonables.

Aunque ya en la industria metalmeccánica existen procesos como la nitruración, carburización (cementación), carbonitruración, entre otros, el borurado de aceros ha tenido un desarrollo importante en los últimos años en muchos sitios del mundo, debido a que su implementación permite que las piezas puedan ser usadas en aplicaciones más exigentes particularmente en lo referente a su resistencia al desgaste y al posible incremento de su vida útil respecto a aquellas a las que se ha aplicado otro tipo de proceso termoquímico. [1]

En este trabajo se muestran las posibilidades de obtener piezas boruradas, usando bórax como el compuesto aportador de boro, empleando sustratos de diferentes aceros y caracterizar las piezas revestidas utilizando para ello microscopía óptica y electrónica y ensayos de microdureza, a fin de poder

vislumbrar sus posibilidades de aplicación en el mercado nacional, a la luz de los costos de proceso cuando se emplea bórax como material de aporte, que es un medio de menor costo que otros reportados en la literatura.

El presente trabajo se compone de seis capítulos los cuales se señalan a continuación brevemente.

En el primer capítulo se describe lo que son los tratamientos termoquímicos, los principales procesos que se realizan para mejorar las propiedades en la superficie, los diversos sustratos utilizados para tales fines. Incluyendo también los antecedentes del proceso de borurado, los principales procedimientos utilizados para realizar el borurado desde técnicas nuevas y novedosas, pasando por las técnicas convencionales, y terminando con técnicas en las cuales se combinan el borurado con algún otro tratamiento termoquímico.

En el segundo capítulo, se describe más detalladamente lo que es el tratamiento termoquímico del borurado, la historia del mismo, pasando por todas las características y parámetros que son parte del proceso, se describen características y morfología de las capas obtenidas, efecto de los elementos aleantes, y las variables que influyen en todo el tratamiento.

En el capítulo tres, se relata la parte experimental, en la cual se habla de la caracterización de las probetas, la preparación de la mezcla empleada usando bórax, y los parámetros utilizados en el tratamiento.

En el capítulo cuatro, se describe la caracterización realizada a las probetas, con la finalidad de evaluar si el tratamiento es realmente efectivo, para poder ser aplicado a este tipo de aceros, usando bórax como medio de aporte, y poder vislumbrar la posibilidades de aplicación que tendrían estos aceros a nivel industrial, buscando la posibilidad de ser un tratamiento de costo razonable y con resultados satisfactorios.

# CAPÍTULO 1. GENERALIDADES SOBRE TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS SUPERFICIALES EN ACEROS

## 1.1 Tratamientos termoquímicos

Las actuales exigencias tecnológicas ponen de manifiesto la necesidad de disponer de materiales metálicos con características específicas, para condiciones de servicio cada vez más críticas. Así por ejemplo, las matrices metálicas empleadas en los procesos metalúrgicos del trabajado en frío y en caliente de los metales, necesitan de una alta tenacidad y elevada dureza superficial, especialmente a alta temperatura. [2]

El endurecimiento superficial del acero se puede conseguir, fundamentalmente, mediante dos procedimientos: modificando la composición química de la superficie mediante la difusión de algún elemento químico (carbono, nitrógeno, azufre, boro, aluminio, zinc, cromo, etc.) en cuyo caso se le conoce como tratamiento termoquímico, o modificando sólo la microestructura de la superficie por tratamiento térmico, conociéndose entonces como tratamiento térmico superficial. Cualquiera de estas dos formas de endurecimiento puede proporcionar altos niveles de dureza (tabla 1.1).

Los tratamientos termoquímicos aplicados al acero son aquellos en los cuales la composición de la superficie de la pieza se altera por la adición de carbono,

nitrógeno u otros elementos. Los tratamientos más comunes en la industria internacional, son: carburización, nitruración, carbonitruración y borurado. [2]

Estos tratamientos implican una alteración de la composición química de la capa superficial del metal tratado, debido a la difusión de átomos de un medio circundante hacia el interior del metal, y dependen de varios factores, como son: temperatura, tiempo, concentración del medio circundante, concentración inicial de la pieza, etc., Así como del control de las variables anteriores. Los tratamientos termoquímicos se utilizan cuando se requiere asegurar una determinada profundidad y zonificación de la capa endurecida. El carbono, el nitrógeno y el boro, en razón de su pequeño tamaño (capaces de ser alojados en huecos intersticiales), son los elementos más usados para endurecer un acero, por lo que se utilizan ampliamente en este tipo de tratamientos.

Los principales tratamientos termoquímicos que se realizan en la industria son los siguientes: [2]

**Carburización (cementación).** Consiste en aumentar el contenido en carbono en la superficie de las piezas de acero, (usualmente de bajo carbono), rodeándolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo, (del orden de varias horas) a elevada temperatura (comúnmente entre 800 y 950°C). Posteriormente, en muchas ocasiones, se temple las piezas y se puede producir, con ello, una gran dureza superficial, asociada a la presencia de martensita en la capa superficial lograda.

**Nitruración.** Es un procedimiento de endurecimiento superficial en la que por la absorción de nitrógeno, se consiguen durezas extremas en la periferia de la pieza, lo que está asociado a la formación de nitruros de diversos elementos constituyentes de la aleación nitrurada (en su mayor parte, aceros).

**Carbonitrurado.** Este tratamiento consiste en una combinación entre la carburización y nitruración, es decir, que por difusión se aportan simultáneamente carbono y nitrógeno. Las piezas se calientan a temperaturas próximas a 850°C y luego se enfrían en forma adecuada para obtener gran dureza en la zona superficial con buena tenacidad en el centro.

**Borurado.** Es el recubrimiento de una capa superficial del acero con boro, adquiriendo una alta dureza, (unidades Vickers) en el rango de 1800 a 2000 HV, (lo que está ligado, en el caso de los aceros, a la formación de boruros  $\text{FeB}$  y/o  $\text{Fe}_2\text{B}$ ), además, es resistente al desgaste y a la corrosión en distintos medios.

**Aluminización (Calorización).** Es la saturación de la capa superficial de la pieza hecha de acero o de otros metales, con aluminio, y se realiza para elevar su resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas, especialmente.

**Cromizado.** Así como la aluminización y varios de los tratamientos anteriormente mencionados, este proceso se puede realizar en medios sólidos, líquidos o gaseosos. En el caso del cromizado, estos medios habitualmente

contienen cloruro de cromo,  $\text{CrCl}_2$ . Normalmente, el proceso se efectúa a temperaturas entre 900 y 1000 °C y con permanencia a esta temperatura, de unas 10-12 horas.

**Siliciuración.** Es el proceso de saturación de la capa superficial de la pieza con silicio, se puede efectuar en medios sólidos, líquidos ó gaseosos que contengan tetracloruro de silicio ( $\text{SiCl}_4$ ).

La Tabla 1.1 presenta una muestra de varios aceros para herramienta borurados y otros materiales y recubrimientos en la que se pueden observar algunos valores de microdureza alcanzados.

<b>Material</b>	<b>Microdurezas (HV)</b>
Acero de herramientas para trabajo en caliente X37CrMoSiV5 templado y revenido	600
Acero indeformable 95MNCrW5 templado y revenido	700
Acero de bajo carbono cementado y templado	700
Acero rápido HS18115	750
Acero al carbono nitrurado	1000
Recubrimiento de cromo duro	1300
Carburo de wolframio	1500
Acero de media aleación borado	1600
Acero indeformable 95 MnCrW5 borado	1700
Acero de herramientas para trabajo en caliente X37CrMoSiV5 borado	1700

Tabla 1.1 Microdurezas (en unidades Vickers HV) de distintos materiales producidas por diferentes tratamientos térmicos y termoquímicos [1]



## 1.2 Antecedentes teóricos del tratamiento superficial borurado

El proceso de borurado es un tratamiento termoquímico de endurecimiento superficial, en el cual átomos de boro son difundidos en un sustrato metálico para generar una capa de boruro(s) metálico(s) en la superficie del mismo, lo cual va a proporcionar una variedad de propiedades en la superficie, como alta dureza, elevada resistencia al desgaste y en muchos casos, un aumento de la resistencia a la corrosión, dando como consecuencia directa se obtiene que, en una gran cantidad de oportunidades, se incrementa el tiempo de vida del material del sustrato de tres a diez veces [3,4]. Por todo lo anterior, el borurado se ha utilizado para sustituir en muchas aplicaciones a los tratamientos de carburización, nitruración y carbonitruración [3,5]. Sin embargo, solo las técnicas en pasta y en polvo son capaces de ser procesadas en varias aplicaciones, mientras que no se utiliza como líquido y gas debido a su alta toxicidad. [3]

El proceso de borurado puede ser aplicado en superficies regulares así como en un área específica de la superficie. El proceso puede proporcionar un procedimiento de bajo costo y productos de muy alta calidad, lo cual puede redituár en algo muy benéfico en el área comercial. Además, el proceso de borurado puede ser combinado con otros tratamientos térmicos ó termoquímicos para producir capas de boruro de múltiples componentes los que pueden otorgar las mejores características en la superficie del material en cuestión.

En la actualidad, se pueden obtener borurados mediante varias técnicas, las cuales se pueden dividir en tres categorías: [3]

1- Técnicas avanzadas.

Desde hace algunos años, se han logrado grandes avances, para conseguir una capa de boruro eficiente, en la superficie del substrato, entre las que se pueden destacar:

- Modificación de la superficie por láser [3,7], la cual se utilizó para formar una capa de boruro en aceros de medio carbono. Aunque este método reduce la dureza de la capa de boruros, también disminuye el gradiente de dureza entre la capa de boruro y el substrato, dando como resultado el aumento de la resistencia al desgaste, en comparación a un método convencional.
- El reactor de lecho fluidizado [3,8], se utilizó para realizar el borurado en aceros con el 0.5% en peso de carbono, aleaciones de níquel [3,9] y otras aleaciones no ferrosas [3,10]. Por este método se pueden conseguir espesores aceptables y también buenas resistencias al desgaste y a la oxidación.

- Proceso de plasma de arco transferido. En esta técnica se utilizan boro y polvo de cromo, para formar recubrimientos de combinaciones boro-hierro [3,11], y boro-hierro-cromo [3,12]. En estos recubrimientos se logra obtener alta dureza y una excelente resistencia al desgaste.
- Sinterización de plasma por chispa [3,13]. Esta técnica ayudó a eliminar los inconvenientes del borurado asistido por plasma, que presenta un alto grado de porosidad.

En el borurado asistido por plasma de metales, se utiliza una atmósfera controlada de  $\text{BCl}_3\text{-H}_2\text{-Ar}$ , donde los parámetros del tratamiento permiten eliminar la porosidad en la capa de boruro [3,14]. Además, la activación mediante plasma de la atmósfera de  $\text{Ar-H}_2\text{-BF}_3$  se utilizó para disminuir la corrosión [3,15].

En el borurado asistido por plasma, combinado con deposición física de vapor y deposición química de vapor (PVD, CVD por sus siglas en inglés), se ha alcanzado la deposición de una capa de boruro a una temperatura de  $600^\circ\text{C}$  [3,16].

- La técnica de implantación de iones fue utilizada sobre fundiciones y acero para herramienta AISI M2, junto con una alta densidad de corriente, de energía baja, y la fuente de iones de haz amplio. [3,18]. Este proceso

proporciona una capa de boruro, más gruesa, y las temperaturas del borurado se encontraban alrededor de 600°C para las fundiciones, y 700°C para aceros temperaturas más bajas de lo que normalmente se utilizan en el borurado mis (900°C - 1000°C.)

## 2- Técnicas convencionales de borurado

A pesar que las nuevas técnicas para realizar el borurado, se han seguido empleando y estudiando las técnicas convencionales, como borurado en pasta, en polvo, y en baño de sales, pues por sus buenos resultados, aun son ampliamente usadas para ser aplicadas en varios materiales ferrosos, como son: Aceros aleados, fundición nodular o dúctil, aceros inoxidable, y aceros de baja aleación base cromo etc. [3].

## 3- Técnicas mixtas de borurado

Las técnicas de borurado combinadas con otro tipo de tecnologías de recubrimientos, han sido desarrolladas ampliamente para mejorar sus propiedades, tales como la resistencia al desgaste, y a la corrosión, entre las cuales están [3]:

- Tratamiento combinado de borurado-cromizado, el cual pueden proporcionar, adicionalmente, un aumento en la resistencia a la oxidación a alta temperatura [3,19].

- El tratamiento de boro-nitrurado, este método ha sido estudiado por la combinación de dos tratamientos, el borurado en polvo, y el nitrurado en gas, lo cual proporciona boruros y nitruros, formándose una capa de boruro-nitruro de excelente adherencia y libre de poros [3,20].
- El recubrimiento boruro- vanadio [3,21] en aceros, que consiste en la termo-difusión del vanadio seguido del boro.
- El Borocarbonitrurado, es un proceso de dos etapas de temperatura, en el cual se logró mejorar los posibles problemas de fragilización que pueden acompañar al borurado [3,22]. Las capas de difusión se pueden formar en aceros de bajo carbono, aleaciones de base níquel y cromo [3,23]. A pesar de que el borocarbonitrurado, reduce la profundidad de la zona formada de boruro de hierro, también logra disminuir el gradiente de microdureza a través de la capa generada, de modo que se consigue disminuir la fragilidad de la capa de boruros.
- En el tratamiento de carburizado seguido de un borurado, en aceros de medio-carbono, mediante este método se detectó que hubo un incremento en la resistencia al desgaste, y con ello un decremento en el gradiente de microdureza [3,24].

---

## **CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL BORURADO**

### **2.1 Marco histórico.**

La historia del borurado comienza en el año de 1895 cuando H. Moissan sugirió que los aceros podrían ser borurados. Posteriormente, en Rusia se llevó a cabo la primera aplicación de un tratamiento de difusión de boro empleado en maquinaria de perforación de pozos profundos. Actualmente, es posible producir boruros en la superficie de diferentes aleaciones ferrosas y no ferrosas mediante el empleo de diversas técnicas [25].

La borurización ha sido implementada en México a partir del año de 1997. La automatización y optimización del proceso de borurado, representa un área de oportunidad para su aplicación en la industria de tratamientos termoquímicos en México [26].

Los primeros aceros endurecidos bajo el método de borurado en México fueron aceros comerciales principalmente en la industria de herramientas de corte, maquinaria, para la construcción y en la industria alimenticia [27].

El tratamiento termoquímico de borurado es un proceso termoquímico relativamente nuevo que ha encontrado una gran aceptación debido a sus principales ventajas que son su alta resistencia al desgaste y su elevada dureza en la superficie, respecto a los demás tratamientos termoquímicos superficiales existentes (figura 2.1). Además de que es un proceso relativamente fácil de aplicar en la superficie de diferentes aleaciones ferrosas y no ferrosas, es por eso que surge un interés de emplear este proceso en diferentes aplicaciones industriales.

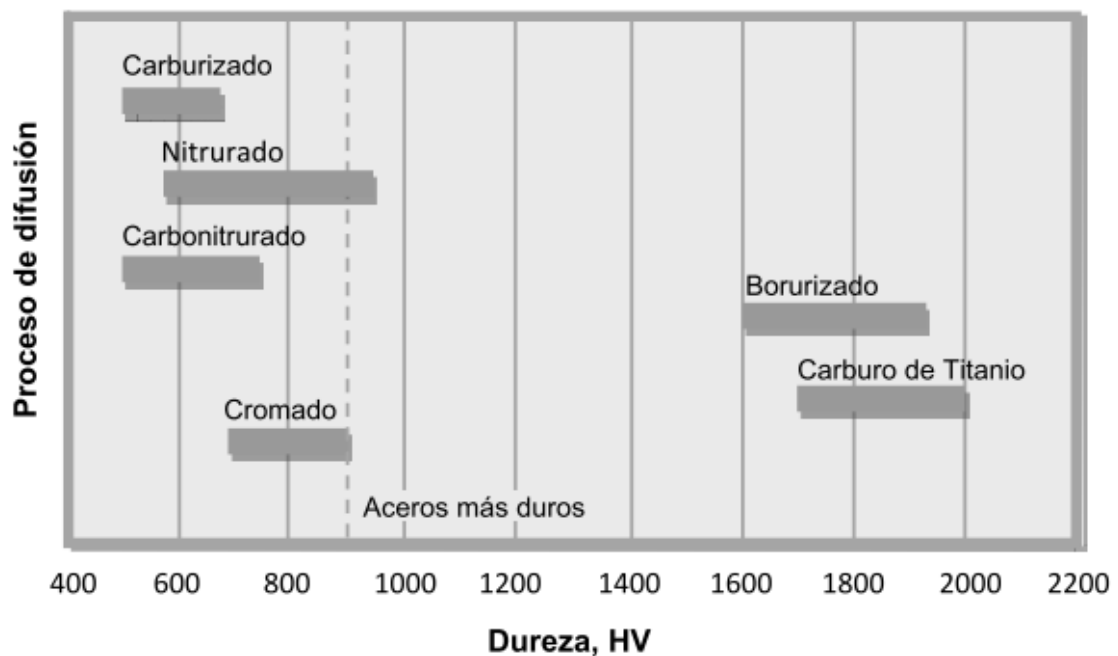


Fig. 2.1 Durezas superficiales (unidades Vickers) obtenidas por diferentes métodos de endurecimiento superficial. [28]

El borurado, es un tratamiento termoquímico que básicamente es realizado mediante un proceso difusivo, lo que significa que genera una capa superficial delgada que oscila de unas pocas a algunos cientos de micras de espesor.

El procedimiento consiste en saturar con boro la superficie de un metal o aleación con el fin de aumentar sus propiedades físicas y mecánicas (la dureza, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión), principalmente en medios ácidos.

El borurado se utiliza para aceros utilizados en la fabricación de herramientas, especialmente aceros de trabajo en frío, con el propósito de aumentar su resistencia al desgaste. También se aplica en piezas como brocas para industria minera y petrolera.

Con el mismo objetivo, incrementar la vida útil de las piezas sometidas a esfuerzos significativos, son utilizados los procesos de cementación, carbuniturado y nitruración. En un número importante de aplicaciones, el borurado ha reemplazado a los tratamientos anteriores.

Las aleaciones y fundiciones expuestas al tratamiento de borurado, pueden convertirse en materiales resistentes al desgaste, abrasión, debido a su extrema dureza en la superficie. Además adquiere una buena resistencia a la corrosión, especialmente en medios ácidos y disminuyen el riesgo de contaminación por emisiones de gases peligrosos, en comparación con los tratamientos de baño de sales. Cabe destacar que se puede aplicar en sistemas neumáticos, componentes de máquinas para procesar plásticos, rodamientos y cojinetes para bombas de extracción de petróleo, y componentes de maquinaria textil, por mencionar algunos de sus campos de aplicación.



### 2.1.1 Ventajas y limitaciones del borurado

Las capas boruradas poseen una serie de ventajas sobre las capas endurecidas convencionalmente como por ejemplo las de los nitrurados. Tienen valores de extrema dureza, entre 1450 y 5000 HV (escala de dureza Vickers), con altos puntos de fusión de las partes constituyentes lo que hace posible mantenerla a mayores temperaturas (ver tabla 2.2). También es mayor que la del acero de herramientas endurecido, con cromo y es equivalente a la del carburo de tungsteno.

El proceso de borurado puede aplicarse a un gran número de aceros endurecibles (aceros entre 0.1 % y 1% en carbono) mejorando la resistencia a la corrosión por erosión de materiales férreos en ácidos diluidos no oxidantes y medios alcalinos. Además, las áreas boruradas poseen una resistencia a la oxidación significativa (ambientes altamente oxidantes con temperaturas de hasta 800 °C) por lo que pueden resistir el ataque de los metales fundidos.

Por otro lado, la alta microdureza de la capa borurada, es mayor que la microdureza del acero templado de contenido medio de carbono. Las capas generadas son más duraderas en condiciones de fatiga y puede conservarse hasta los 700 °C por lo que el borurado es idóneo para elevar la resistencia al desgaste de las piezas que trabajan a temperaturas elevadas.

Metal base	Fases de la capa borada	Microdureza de la capa en Kg/mm <sup>2</sup>	Punto de fusión
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe2B	1800-2000	
Co	CoB	1850	
	Co2B	1500-1600	
	Co3B	700-800	
Co-27,5Cr	CoB	2200 (100g)	
	Co2B	1550 (100g)	
	Co3B	700-800	
Ni	Ni4B3	1600	
	Ni2B	1500	
	Ni3B	900	
Mo	Mo2B	1660	2000
	MoB2	2330	2100
	Mo2B5	2400-2700	2100
W	W2B5	2600	2300
Ti	TiB	2500	1900
	TiB2	3370	2980

Tabla. 2.2. Punto de fusión y microdureza en diferentes fases de boruro de hierro formadas durante el borurado en diferentes materiales [1].

Aunque el borurado aumenta las propiedades físico químicas de los aceros, los procedimientos para realizar el borurado son inflexibles y demandan mucho trabajo, lo que lo hace menos efectivo, en cuanto a costos se refiere, si es comparado con otros tratamientos de endurecimiento superficial como la nitruración por plasma o cementación por gas. Por ende, el borurado es idóneo cuando son requeridos componentes especiales como alta dureza, y/o resistencia a la corrosión.

Otra desventaja es que, luego del procedimiento, el espesor de la capa crece de 5 a 25 por ciento, hecho que depende de la estructura del metal. Por tal motivo

es adecuado tener en cuenta este crecimiento de la capa superficial, a la hora de emplear este proceso en piezas que demande elevada precisión de sus dimensiones.

Una desventaja más radica cuando se necesita eliminar parcialmente la capa borurada, con el objetivo de cumplir exigencias de tolerancias más estrictas, ya que esto solo puede lograrse por medio del lapeado con diamante, puesto que el granallado causa fracturas en la capa. Es por ello que el borurado es efectuado con más frecuencia en piezas con una sección transversal grande.

Las propiedades de fatiga, de piezas aleadas y boruradas cuando se trabaja bajo cargas considerables (2000 Newton), son bajas en comparación con la de los aceros sometidos a cementación y nitruración; por lo que el borurado de engranajes se emplea cuando las cargas transversales son mínimas.

### 2.1.2 Ejemplos de aplicaciones.

El borurado puede ser aplicado en un amplio rango de materiales, y ser utilizado en varias aplicaciones (ver tabla 2.3). Todos los materiales ferrosos, (aceros estructurales, aceros para cementación, aceros templados y revenidos y para herramientas (H13, D2), fundiciones de hierro, hierros de alta pureza, y aceros sinterizados), son adecuados para llevar a cabo el proceso de borurado;

incluso diferentes aleaciones no ferrosas actualmente se vienen estudiando por su posibilidad de ser boruradas como las aleaciones de titanio.

Teniendo en cuenta la amplia gama de aceros susceptibles al proceso de borurado, son múltiples y diversos los componentes son implementados mediante esta técnica con el afán de incrementar la vida útil de los elementos de maquinarias y mejorar sustancialmente la vida en servicio de las herramientas de trabajo. Asimismo, diversos componentes endurecidos por la difusión del boro son empleados en la industria del vidrio, la industria textil e industria del petróleo (ver figura 2.4).

El desgaste por abrasión y por adhesión son las principales formas de desgaste, siendo resultado característico de casi todos los tipos de esfuerzos mecánicos. Los aceros borurados son resistentes a la abrasión debido a su extrema dureza en la superficie, esta característica los hace idóneos para ser aplicados en sistemas de transporte neumático, dados para estampado, componentes de máquinas para procesar plástico (tornillos de extrusión), rodamientos y cojinetes para bombas de extracción de petróleo, válvulas de bola, émbolos para la industria del vidrio y componentes en la maquinaria textil. Asimismo, dado la baja tendencia a presentar soldadura en frío, el tratamiento es empleado para reducir el desgaste por adhesión en herramientas utilizadas para el proceso de conformado en frío de metales, tales como las aleaciones de cobre y de aluminio.

<b>ACERO</b>	<b>APLICACION</b>
1015	Ejes. Engranés y diversos elementos de maquinaria
1045	Pernos y discos abrasivos
4140	Pistones
E52100	Cojinetes y guías
D2, D3	Bujes y herramientas para estampado
H11, H13	Herramientas para moldes de inyección
L6	Pernos y dados para forja
02, 07	Rodillos para grabados
302, 306	Partes para la industria química y textil.
410	Moldes

Tabla. 2.3. Aplicaciones industriales de diferentes aceros borurados [28].

Es de suma importancia resaltar que en aplicaciones industriales, la presencia de una sola fase  $Fe_2B$  es más deseable que la presencia con una bicapa tipo  $FeB/Fe_2B$ . La presencia de un sistema  $FeB-Fe_2B$ , propicia la formación de grietas en la interfaz de crecimiento. La diferencia de los coeficientes de dilatación térmica de ambas fases ( $FeB = 23 \times 10^{-6} / ^\circ C$  versus  $Fe_2B = 7.85 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ) genera esfuerzos residuales de compresión y tensión durante el crecimiento de los boruros; provocando con ello la aparición de grietas.

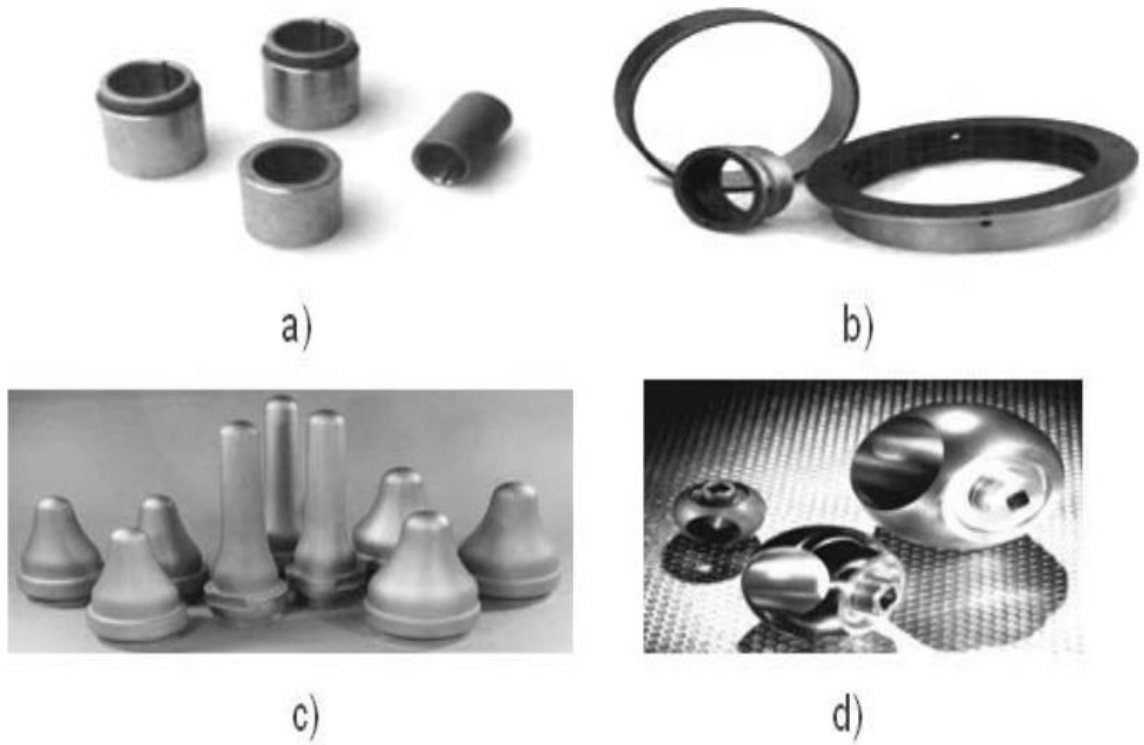


Fig. 2.4 Ejemplos de componentes sometidos al proceso de borurado, a) cojinetes, b) anillos para las bombas de extracción de petróleo, c) émbolos para la industria del vidrio, d) válvulas de bola [29].

## 2.2 Características de los boruros de hierro.

La estructura de un boruro está determinada por el tamaño relativo del átomo del boro y los del metal en el que éste se difunde, así como por la tendencia a combinarse entre ellos. El boro es altamente soluble en metales que tienen un volumen atómico pequeño.

De acuerdo con el diagrama de fases hierro-boro (figura 2.3), y dependiendo de los diferentes parámetros experimentales como la composición química del sustrato, de la temperatura y tiempo del tratamiento, pueden ser identificadas dos fases en la capa formada: la fase externa o superficial, boruro de hierro tipo  $\text{FeB}$  (estructura cristalina ortorrómbica), con un contenido en peso de boro aproximadamente del 16%, y una fase interna, boruro de hierro tipo  $\text{Fe}_2\text{B}$ , con una estructura cristalina tetragonal y un porcentaje en boro de aproximadamente 9% (figura 2.2).

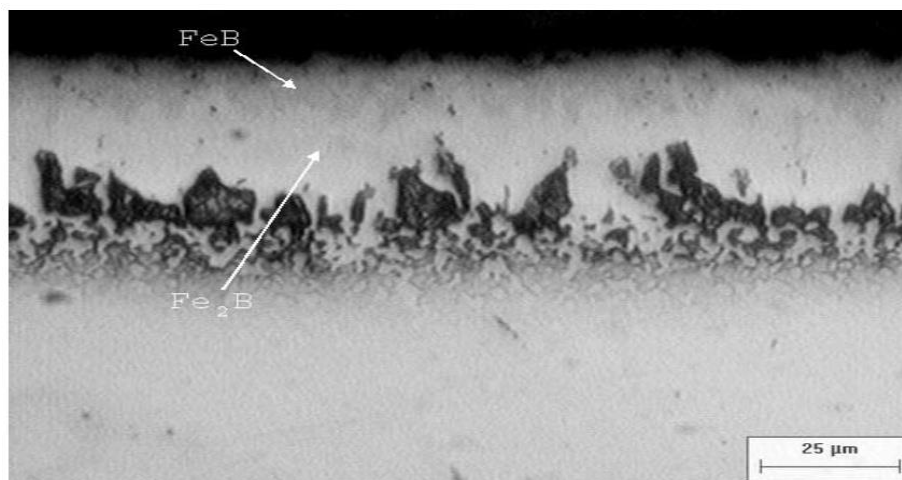


Fig. 2.2. Capas de  $\text{FeB}$  y  $\text{Fe}_2\text{B}$  tomadas durante el proceso de borurado de un acero para herramientas AISI M2 [29].

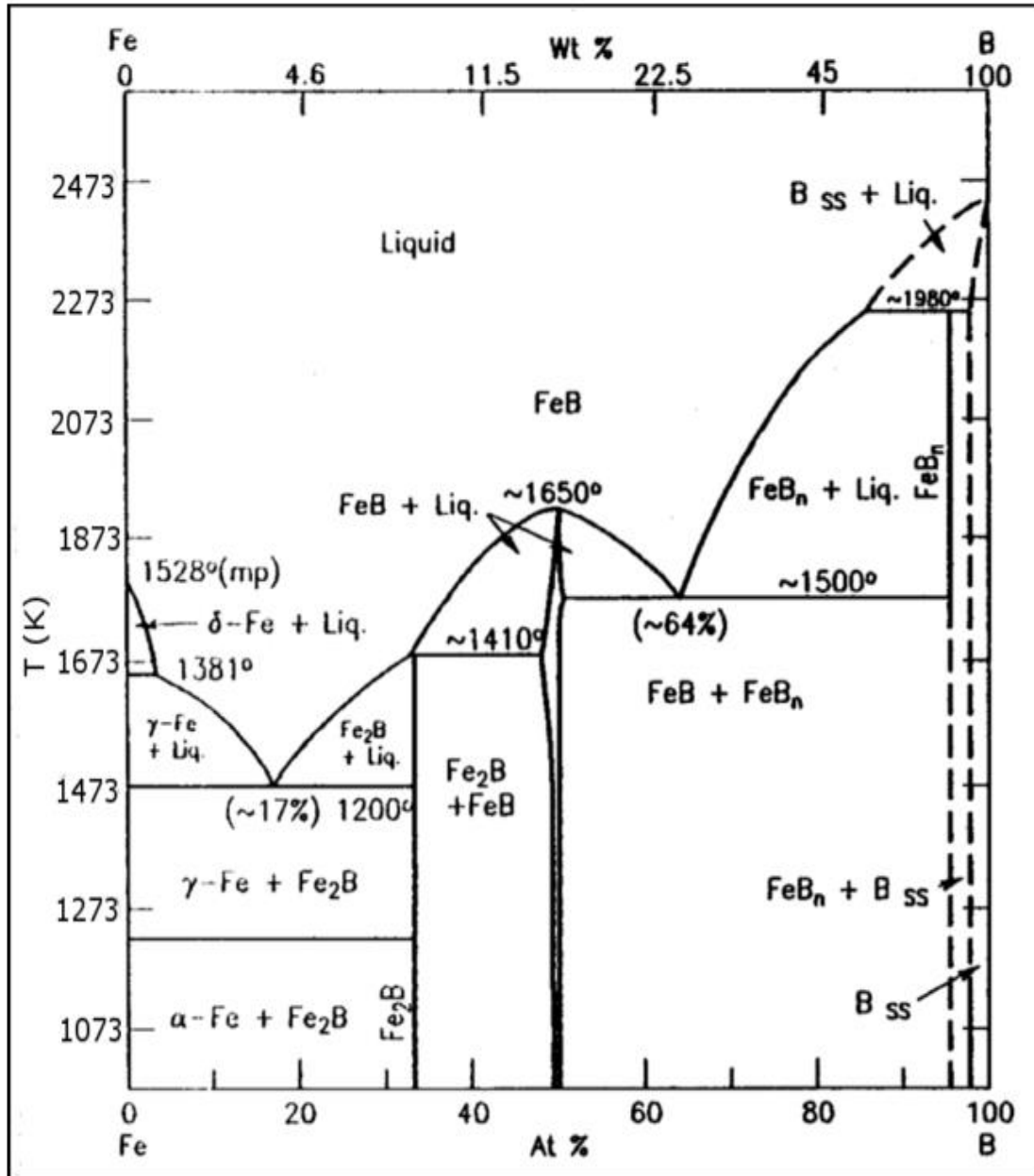


Fig. 2.3. Diagrama de fases Hierro – Boro. [25]



Los boruros de hierro son propensos a generar alta porosidad a elevadas temperaturas de tratamiento. El alto grado de porosidad en las capas boruradas implica un decremento en sus propiedades mecánicas, porque representa puntos de concentración de esfuerzos.

En la tabla 2.1 se presentan algunas de las propiedades químicas y mecánicas de los boruros de hierro.

<b>PROPIEDADES</b>	<b>FeB</b>	<b>Fe<sub>2</sub>B</b>
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	6.75	7.43
<b>Coefficiente de expansión térmica (ppm/°C)</b>	23 en un rango de 200 a 600 °C	7.65 - 9.2 en un rango de 100 y 800°C
<b>Microdureza (HV)</b>	1900 a 2200	1800 a 2000
<b>Modulo de elasticidad (GPa)</b>	590	285 a 295
<b>Resistencia a la fatiga</b>	****	Puede incrementar un 33% para capas con espesores mayores a 40 μm (por ejemplo de 185 a 245 N/mm <sup>2</sup> )
<b>Otros</b>	Incrementa la resistencia a la corrosión en materiales ferrosos sometidos a medios alcalinos y ácidos no oxidantes. Resistencia al desgaste por su tendencia para difundirse en frio y a su elevada dureza.	

Tabla. 2.1. Propiedades químicas y mecánicas de los boruros de hierro [25,27].

### 2.2.1 Tipos de capas boruradas.

Kunst y Schaaber [30], desarrollaron un sistema de evaluación, el cual permite identificar el tipo de capa de boruros, formada en la superficie formada de materiales ferrosos. Para lo cual organizaron la formación de las posibles capas en diferentes grupos de acuerdo a su composición y le asignaron una letra para identificar cada grupo (fig. 2.4)

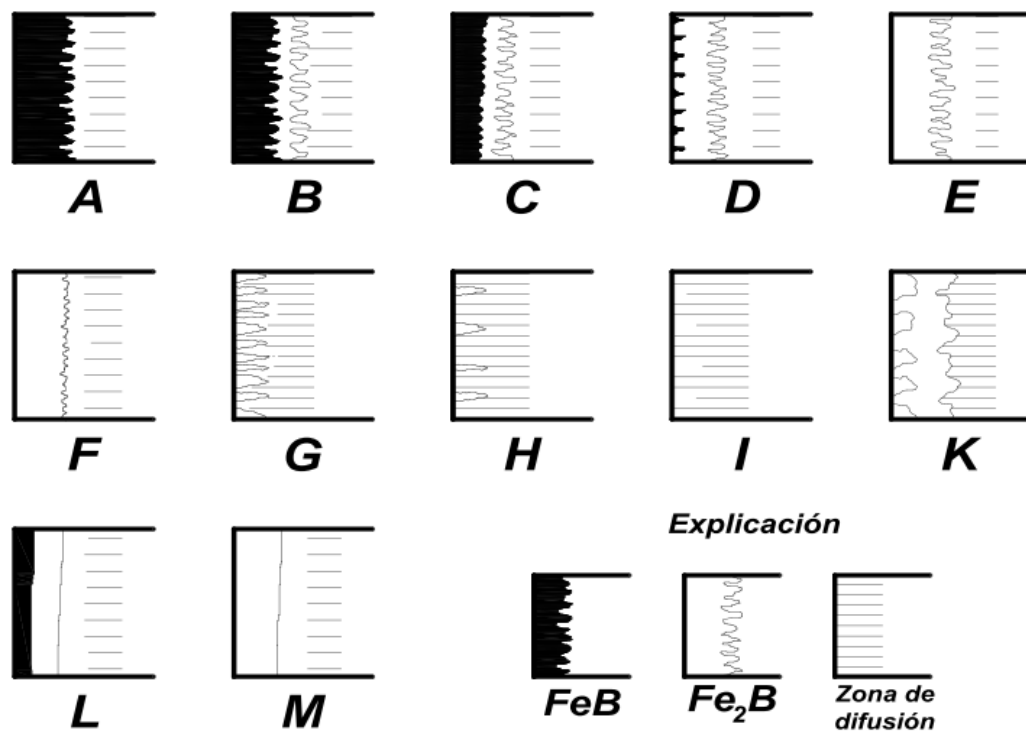


Fig. 2.4. Tipos de capas boruradas [25, 26, 31].

Los tipos de capas se caracterizan de la siguiente forma:

- A) Capa única, exclusivamente formada por FeB.
- B) Capa de dos fases Fe<sub>2</sub>B y FeB (capa completa).
- C) Capa de dos fases, en este caso la capa FeB es más delgada que en la capa de dos fases Fe<sub>2</sub>B y FeB.
- D) Capa de dos fases pero sólo FeB aislada y columnar (morfología tipo dientes de sierra).
- E) Única capa, exclusiva de Fe<sub>2</sub>B, columnar mas marcada.
- F) Única capa, fase exclusivamente Fe<sub>2</sub>B, columnar no tan marcada.
- G) Capa columnar individual de Fe<sub>2</sub>B.
- H) Capa columnar de Fe<sub>2</sub>B más aislada.
- I) Zona de difusión.
- k) Capa degenerada
- L) Capa de dos fases FeB y Fe<sub>2</sub>B, uniformemente establecida, sin formación columnar.
- M) Única capa de FeB y Fe<sub>2</sub>B, uniformemente establecida y sin formación columnar.

Este sistema de evaluación hace posible juzgar la apariencia de las capas de boruro y la forma idónea de un proceso de borurado. La industria se enfoca en conseguir capas tipo E y F con los agentes borurantes disponibles en el mercado. Cuando el material a proteger sufre desgaste causado por minerales, la capa tipo D también puede ser usada. Una capa con una sola fase (Fe<sub>2</sub>B) tiene muchas ventajas, por ejemplo, menor grado de fragilidad; y además permite realizar un

tratamiento térmico posterior sin perjudicar la resistencia y propiedades de la capa en general [31].

### 2.2.2 Efecto de los elementos aleantes.

La morfología de las capas de boruro es intrínsecamente columnar (formación tipo dientes de sierra), acentuándose en hierro puro y aceros de bajo y medio carbono. Cuando el contenido de carbono en el sustrato es muy alto, el espesor de las capas tiende a reducirse, debido a que los átomos de carbono no se difunden en las fases boruradas, por lo que tienden a dirigirse hacia la matriz del sustrato, formando así una zona de difusión justo por debajo de la capa. Elementos como el níquel y cromo, en concentraciones mayores al 9 y 6% de peso en masa respectivamente, favorecen la formación de los boruros de hierro con interfaz plana.

La segregación de los elementos aleantes se lleva a cabo del sustrato hacia la capa de los boruros, formando compuestos intermetálicos con el boro. Los átomos de los elementos aleantes se difunden en la capa sustitucionalmente, y tienden a concentrarse en las puntas de las columnas de los boruros. Esto ocasiona una caída en el flujo de boro activo en esta zona, por ende, las reacciones hierro-boro pierden importancia y la formación columnar decrecen progresivamente hasta formar interfaz más planas.

Asimismo, al aumentar las concentraciones de elementos aleantes como tungsteno, molibdeno y vanadio se produce una reducción en el espesor de capa y la formación columnar del boruro de hierro.

El silicio es desplazado por el boro al iniciar la difusión. En el caso de aceros con alto contenido de Silicio, se puede llevar a cabo el borurado a partir de ocho horas de tratamiento, con una temperatura de 1000 °C. Por otro lado, los aceros con mayor contenido de silicio no son adecuados para realizar el proceso de borurado debido a las condiciones necesarias para realizar el proceso (temperaturas elevadas y tiempos largos de tratamiento).

### **2.3 Tratamiento superficial de borurado en polvo y pasta.**

Los medios de difusión que se emplean son sólidos, líquidos y gaseosos (polvos, pastas, mezclas de sales, óxidos fundidos y gases) [29]. En el borurado en polvo, se cubre la pieza a tratar, colocado en un contenedor adecuado, con polvo de carburo de boro u otro medio aportante. En el borurado en pasta, se realiza una mezcla de agua con pasta de carburo de boro para rellenar el espacio entre el contenedor y la pieza. En comparación con el borurado en polvo, el borurado en pasta es un método particularmente beneficioso para altos volúmenes de trabajo con una ventaja de que la pasta es mucho más conveniente en procesos selectivos de borurizado.

Sin embargo, actualmente también se emplean otros métodos más sofisticados como el CVD y el PVD (deposición química y deposición física de vapor) que representan un costo más elevado. Los medios sólidos son los más utilizados en la industria por razones tecnológicas, económicas y de impacto ambiental. Además facilitan el manejo manual y permiten controlar el potencial de boro (porcentaje de boro presente) sobre la superficie del sustrato; por lo tanto; se consigue que el espesor de la capa borurada sea más homogéneo a lo largo de la pieza.

El borurado por pasta es un proceso empleado para endurecer superficialmente secciones específicas de una pieza. La pasta consiste en una mezcla de carburo de boro ( $B_4C$ ), con poco más de las tres cuartas partes de peso en boro (76%) y con activadores [29]. La aplicación de la pasta se facilita modificando su viscosidad sin alterar el efecto de difusión de boro, al añadir un máximo de agua entre el 10 y 20% de la masa total de la mezcla agua/pasta. La reducción del trabajo manual y selectividad del proceso permiten elevar los índices de producción en la industria.

El rango de temperaturas para llevar a cabo el tratamiento se encuentra entre los 850 y 1050°C, si se exceden estos límites, se produce una fusión de los elementos aleantes en la superficie del material, particularmente en aceros de alta aleación. La pasta se aplica sobre la superficie de la pieza de trabajo, con espesores variables que van desde 1.5 a 5 mm, para controlar el potencial de boro. Así, se pueden generar capas mayores de 200  $\mu m$  de espesor [29]. Los boruros de hierro ( $FeB$  y  $Fe_2B$ ) son propensos a generar alta porosidad a elevadas temperaturas de tratamiento, esto se debe a que el oxígeno, presente en la atmósfera de tratamiento, reacciona con los componentes químicos de la pasta de carburo de boro ( $B_4C$ ), formando monóxido de carbono ( $CO$ ), que obstaculiza el proceso de borurado al consumir el boro activo para formar trióxido de diboro ( $B_2O_3$ ). Debido a esto, el tratamiento tiene que llevarse bajo una atmósfera controlada. Dicha atmósfera puede ser de gas argón o una mezcla de nitrógeno e hidrógeno [29].

El método de borurado en polvo, es la técnica más ampliamente favorecida debido a sus simplicidades y su economía [25]. Consiste en introducir la pieza a borurar en una caja de acero resistente al calor, sellada, que en su interior contenga una mezcla de sales en polvo, un agente borurante y un activador. Después de llegar a la temperatura de borurado y ya transcurrido el tiempo de tratamiento el recipiente, es sacado del horno y es enfriado a temperatura ambiente. Es un procedimiento altamente ventajoso ya que es muy fácil de llevar a cabo y de relativa seguridad, además el método no requiere la inducción en la cámara del horno de atmosfera controlada.

En la composición típica de mezclas comerciales de agentes sólidos, para el borurado en polvo se establecen los siguientes [31].

- 5%  $B_4C$ , 90%  $SiC$ , 5%  $KBF_4$ .
- 50%  $B_4C$ , 45%  $SiC$ , 5%  $KBF_4$
- 85%  $B_4C$ , 15%  $Na_2CO_3$
- 95%  $B_4C$ , 5%  $Na_2B_4O_7$
- 84%  $B_4C$ , 16%  $Na_2B_4O_7$ .
- Boro amorfo (contenido 95 a 97% B).
- 95% Boro Amorfo, 5%  $KBF_4$ .

Donde el carburo de silicio actúa como diluyente, el cual controla el flujo de boro activo. Los otros compuestos actúan como activadores (sustancias que



inducen la reacción de boro con el sustrato ferroso para la formación de una capa borurada).

En el proceso de borurado por medios sólidos, el polvo puede ser reutilizado mediante una mezcla que contenga de un 20% a un 50% en peso de polvo fresco. En este caso el polvo debe ser desechado después de 5 o 6 ciclos [3, 25].

En un horno convencional, el tiempo de tratamiento puede estar en un rango de 1 a 12 horas, pero si el calentamiento es por inducción, el tiempo puede reducirse de 5 a 15 minutos. Bajo las mismas condiciones de tratamiento (tiempo y temperatura), las capas producidas por una gas son más pequeñas que las obtenidas por pasta o polvo, en general, representa un 50% de reducción en tiempo de tratamiento [29].

La fase externa, FeB, tiene un contenido en peso de boro aproximadamente del 16.23%, y la fase interna, Fe<sub>2</sub>B, un porcentaje en peso de boro aproximadamente del 8.835%. La morfología de las capas es columnar (tipo dientes de sierra) (ver figura 3.1). En donde el grado de penetración entre la capa y el sustrato dependen esencialmente de la cantidad de elementos aleantes que se tengan en el material, generalmente los aceros de baja y media aleación, generan capas de mayor aserración, en comparación con los aceros de alta aleación, cuyos frentes de crecimiento de las fases tienden a ser planos.

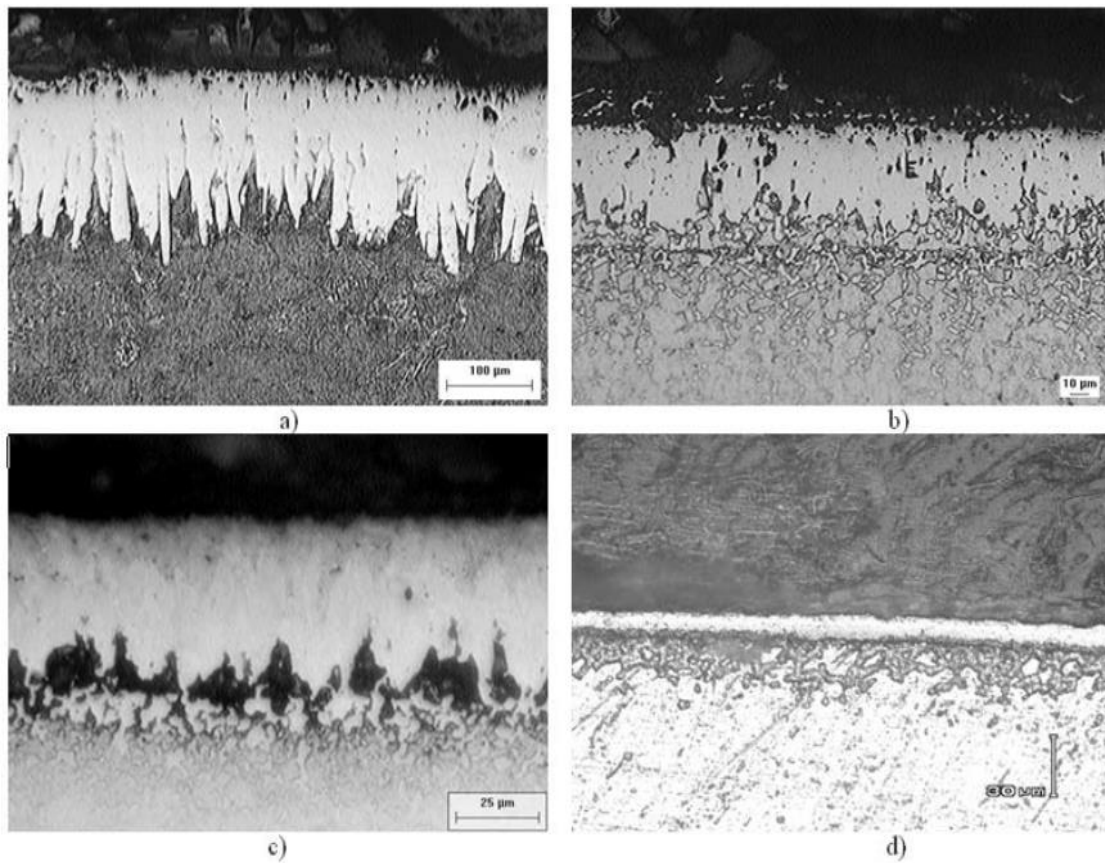


Fig. 3.1. Muestras de acero sometidas al tratamiento de borurado a) acero AISI 1018, b) acero AISI H13, c) acero inoxidable M2, d) acero inoxidable 304. Los aceros están ordenados de baja aleación a alta aleación y por tanto de mayor morfología columnar a menor morfología columnar [29].

La morfología columnar (estructura tipo dientes de sierra) de la capa de boruro de hierro, ayuda significativamente a incrementar la adherencia de la capa sobre el metal base del material. La combinación de un bajo coeficiente de fricción y una alta dureza de este tipo de capas contribuyen a combatir la abrasión, oxidación, adhesión y fatiga en la superficie de la pieza.

La importancia del análisis de la cinética de crecimiento de las fases boruradas permite la optimización y automatización del proceso de borurización en pasta, en donde, conociendo los parámetros experimentales del proceso (esencialmente tiempo de tratamiento y espesor de capa), es factible predecir los valores de los coeficientes de difusión del boro en las interfases de boruros de hierro (FeB y Fe<sub>2</sub>B). Considerando que después de un cierto periodo de tiempo, el sustrato es saturado de boro, entonces en las interfases de crecimiento entre la capa borurada y el sustrato se obedece a la ley de crecimiento parabólico (ecuación 2.1).

$$u = k_1\sqrt{t}$$

**Ecuación 2.1**

Siendo  $k_1$ , la constante de crecimiento para la capa borurada,  $u$  representa el espesor de la capa borurada, y  $t$  el tiempo del tratamiento, respectivamente.

### 2.3.1 Principales variables del proceso de borurado en polvo y pasta.

Las variables que influyen en el tratamiento termoquímico de borurado son [29, 25]:

1. Composición química de la mezcla borurante ya sea en polvo o pasta.
2. Recipientes y/o moldes que alojaran las probetas y el agente borurante.
3. Geometría de las probetas

- 4.** Tiempo y temperatura de secado de la pasta para eliminar el exceso de humedad.
- 5.** Medio donde se lleva a cabo el tratamiento termoquímico (atmósfera inerte) u horno convencional
- 6.** Temperatura del proceso
- 7.** Tiempo de tratamiento.
- 8.** Espesor entre el recipiente y/o molde y la muestra, zona donde se alojara el agente borurante.
- 9.** Composición y constitución físico-químico del sustrato.
- 10.** El medio de enfriamiento para el temple de las muestras boruradas.

## CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Preparación del sustrato.

Los aceros seleccionados fueron los aceros AISI 1045, AISI 8620, AISI 9840 y el AISI P20. EL 1045 es un acero al carbono grado maquinaria. Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de algunos componentes de maquinaria. El AISI 8620 es un acero de baja aleación también es de grado maquinaria, idóneo para la fabricación de cigüeñales, engranes, tornillos sin fin, elementos de máquinas que están sometidos a largas cargas de trabajo y donde se tiene presencia de desgaste, tanto abrasivo, como adhesivo. Es también usualmente sometido a procesos de carburización, dado su bajo contenido de carbono. Los AISI P20 y 9840 son aceros de bajo contenido de carbono (0.30 C y 0.40 C respectivamente). El primero se usa para manufacturar herramienta y el segundo se utiliza en la industria del plástico, más específicamente para la producción de los moldes de inyección; Estos varios elementos que se encuentran sometidos a altos niveles de fricción, lo que puede generar altos niveles de desgaste. (Ver anexos 2, 3, 4 y 5).

La composición química típica de estos aceros, proveniente de especificaciones se muestra en la tabla 3.1 y anexos.

COMPOSICION %	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
8620	0.2	0.8	0.25	0.6	0.5	0.2
COMPOSICION %	C	Mn	P	S		
1045	0.43-0.50	0.6-0.9	0.004	0.005	N/A	N/A
COMPOSICION %	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
P20	0.3	0.75	0.5	N/A	1.7	0.4
COMPOSICION %	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
9840	0.4	0.3	0.8	1	0.8	0.25

Tabla 3.1: Composición química de los aceros 8620, 1045, P20, y 9840. (Ver anexo 2, 3, 4, 5).

Las probetas que se obtuvieron de estos aceros, (figura 3.1) fueron maquinadas en un torno convencional marca Doall, y desbastadas, con lijas de carburo de silicio hasta grado 600, [25]. Posteriormente, las piezas fueron sometidas a limpieza ultrasónica empleando una disolución de alcohol etílico para tal propósito.



A)



B)

Fig. 3.1. a) Maquinado y desbastado de las probetas, b) Probetas lisas y limpias para el tratamiento

### 3.2 Realización del recubrimiento de borurado

Para este trabajo se utilizó la técnica de borurado en solido (polvo), debido a su simplicidad de manejo; además, permite modificar fácilmente la composición de la mezcla de los medios de aporte y de los activadores, con lo que no se requiere equipo complicado y puede brindar un ahorro económico al proceso.

### 3.2.1 Preparación de la mezcla.

Usualmente, para llevar a cabo el borurado se utilizan diversos agentes borurantes. Las mezclas más usadas, son compuestos de boro que pueden estar en estado sólido, líquido y gaseoso [26].

Algunos de los agentes borurantes más utilizados para realizar el borurado son:

- Ferroboro
- Boro Amorfo
- Carburo de Boro

Para este trabajo, se utilizó Bórax (Tetraborato de Sodio Decahidratado) como agente borurante, debido a su bajo costo y facilidad de obtención.

Para la preparación de la mezcla utilizada para el borurado, se utilizó un crisol como recipiente para posteriormente fundir el bórax (previamente deshidratado) y el carburo de silicio. La mezcla consistió de 75% (en peso) de bórax, y 25% (en peso) de carburo de silicio, que servirá como diluyente ya que controla el flujo de boro activo. [32]. Figura 3.2.





Fig. 3.2. Preparación de la mezcla utilizada para el borurado.

Las principales propiedades del bórax se muestran en la tabla 3.2.

<b>Formula</b>	<b>Masa Molar</b>	<b>Punto de fusión</b>	<b>Densidad</b>	<b>Punto de ebullición</b>
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381,37 g/mol	743 °C	1,73 g/cm <sup>3</sup>	1.575 °C

Tabla 3.2. Propiedades físicas y químicas del bórax [39].

### 3.2.2 Realización del revestimiento superficial de Borurado.

El crisol que contiene la mezcla fue introducido en un horno convencional marca THERMOLYNE (fig. 3.3), a una temperatura de  $950^{\circ}$  por un tiempo de 45 minutos para fundir el bórax, junto con el carburo de silicio y tener una mezcla líquida.



Fig. 3.3. Introducción del crisol con la mezcla borurante.

Después se fueron introduciendo una probeta de cada acero a la vez en la mezcla. Para este trabajo se mantuvieron constantes todas las variables que se encuentran involucradas en el proceso. En la tabla 3.3, se muestran los parámetros experimentales utilizados.

ACERO	TEMPERATURA	TIEMPO DE EXPOSICION
1045	950 °C	5 HRS
8620	950 °C	5 HRS
P20	950 °C	5 HRS
9840	950 °C	5 HRS

Tabla 3.3. Parámetros experimentales en el proceso



Fig. 3.3 Introducción de las probetas en la mezcla borurante para realizar el revestimiento.

Al término del tratamiento se fueron extrayendo los contenedores de los hornos y fueron enfriadas lentamente a temperatura ambiente.

A partir de esto, la preparación metalográfica consistió, en lijar las probetas, con lijas de carburo de silicio, grado 80, 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, y 1500 y al final se realizó un pulido con un paño micro-cloth, donde se utilizó como abrasivo alúmina con un tamaño de partícula de 1  $\mu\text{m}$ , para obtener un acabado espejo en las probetas.

Después se procedió a observar las probetas en un microscopio óptico Microscopio invertido marca Leitz wetzlar, modelo Epivert que incluye una cámara con un sistema de de adquisición Olympus UC30 y que emplea un Software de análisis de datos: Iworks Lanoptik Technologie. También se empleó un microscopio electrónico de barrido Philips XL20 así como un microscopio electrónico de barrido JEOL 5900 LV.

Para realizar la medición de microdureza Vickers se utilizó un microdurómetro Shimadzu HMV-G con cargas de 50 y 100 g, en función del espesor de las capas conseguidas. Para poder realizar estas mediciones las probetas fueron acondicionadas (niveladas cara de estudio paralela a la de apoyo), para tener una correcta medición. Se tomaron datos a distintas profundidades (tomadas al azar).

Las distintas cargas utilizadas para hacer la prueba de microdureza, se indican en la Tabla 3.4.

CONDICIONES PARA LA PRUEBA DE MICRODUREZA	
ACERO	CARGA EMPLEADA
1045	100 gramos
8620	100 gramos
P20	50 gramos
9840	50 gramos

Tabla. 3.4. Cargas utilizadas para la realización de la prueba de Microdureza.

Se tomaron de 5 a 10 mediciones para cada acero tratado y a partir de ello, se obtuvieron promedios.

## **CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **4.1. Caracterización**

Se presentan los resultados obtenidos a partir de la caracterización que se realizó a las probetas después del borurado usando bórax como medio de aporte.

Las pruebas de caracterización que se realizaron fueron, microscopia óptica y microscopía electrónica de barrido, para poder visualizar el aspecto de la capa formada en la superficie del sustrato y determinar el espesor de la capa obtenida con base en los parámetros utilizados en el experimento y realizar una valoración del aspecto de las capas.

Se presentan, asimismo, resultados de ensayos de microdureza Vickers, para poder determinar la dureza del revestimiento generado en la superficie de las probetas.

#### 4.1.1 Microscopia electrónica de barrido.

Se prepararon metalográficamente los sustratos revestidos, para poder obtener microfotografías, para poder evaluar si hubo formación de una capa difusiva, y en caso de haber presencia de esta capa, poder determinar su espesor.

Después se procedió a observar las probetas en un microscopio electrónico de barrido Philips XL20.

Para el acero 1045 (ver figura 4.1 A, B y C). Destaca la morfología columnar de la capa borurada, muy característica de aceros de bajo o medio carbono borurados [29]. La apariencia permite intuir la presencia de una capa de boruros, posiblemente  $\text{Fe}_2\text{B}$ . El tiempo de tratamiento [25, 26, 31] que fue relativamente corto (5 horas), y en tal sentido se considera que muy probablemente no se alcanzó a formar la capa exterior de boruros  $\text{FeB}$  [25, 26, 31].

En la Figura 4.1- C, se tomaron mediciones de espesor de la capa borurada lo cual arrojó datos entre  $12\mu\text{m}$  y  $50\mu\text{m}$ , obteniendo un promedio de  $44.5\mu\text{m}$  de espesor para el acero 1045, lo cual representa un espesor coherente, en función del tiempo de tratamiento. Probablemente, conforme se incremente el tiempo de proceso, la capa borurada tenderá a crecer, y probablemente aparecerá la fase de boruros  $\text{FeB}$ , lo cual se podrá verificar en un trabajo posterior a éste.

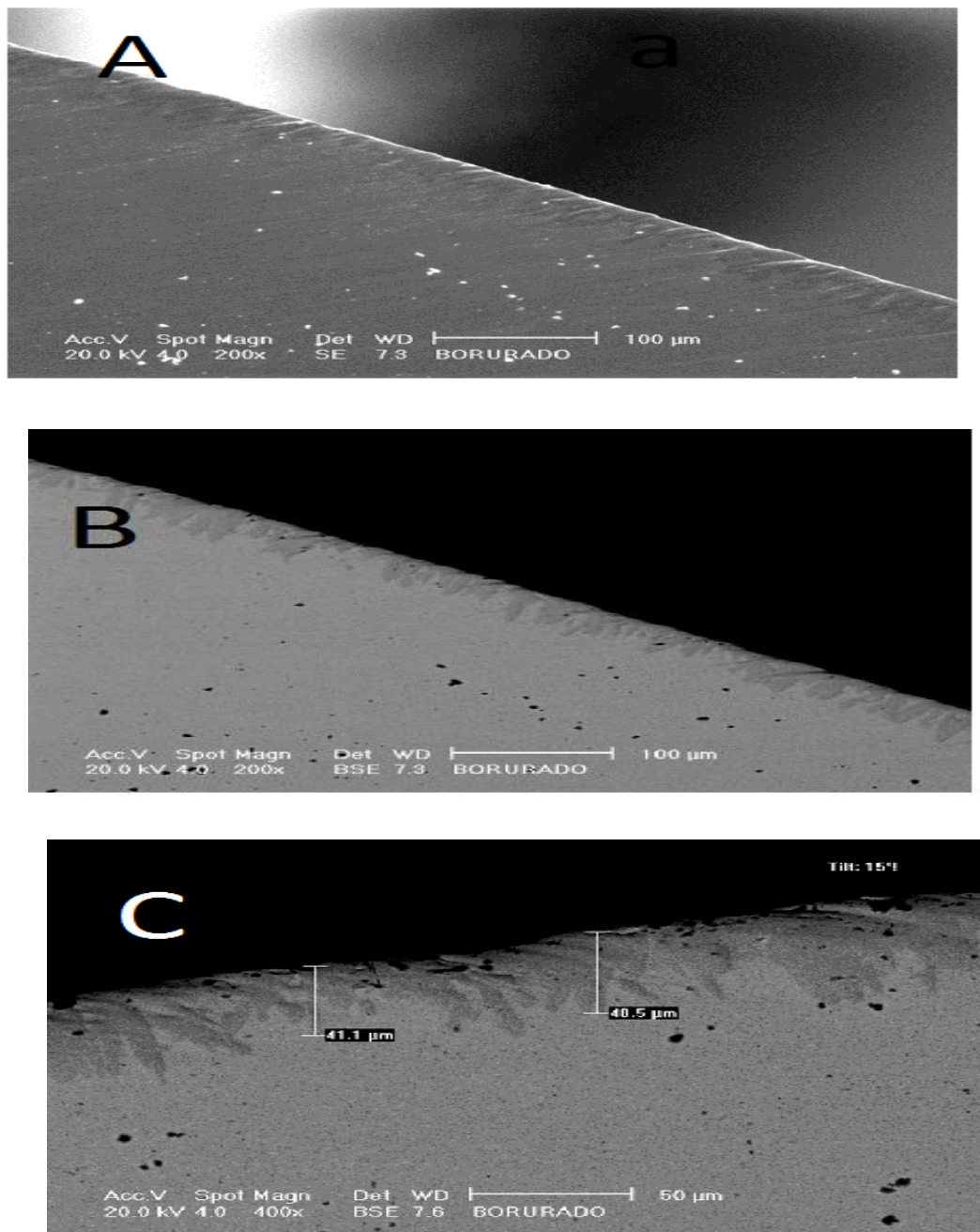


Fig. 4.1. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de acero 1045 borurado a 950°C, 5 horas. A) Microfotografía a un aumento de 200x, electrones secundarios. B y C) Microfotografía con aumentos de 200 y 400x. Electrones retrodispersados.



Para el acero 8620 (Fig.4.2 A, B y C), se muestra una capa de borurado con características columnares, aunque, en menor grado que la observada en el acero 1045. Se puede apreciar la posible formación de boruros de hierro igualmente  $Fe_2B$  pero, con menor grado de penetración. Se puede hablar de alguna tendencia a la formación de una interfase plana, lo que se considera asociado a la presencia de los elementos aleantes de este acero, como el Níquel y el Cromo respectivamente. Estos elementos favorecen la formación de boruros con interfases planas [25, 26]. La presencia de Molibdeno en la composición química del acero en cuestión favorece la morfología columnar [25], lo que se considera contribuye, a la presencia de una interfase entre el revestimiento y el sustrato.

También se obtuvieron datos del espesor de la muestra borurada, que van desde  $10.32 \mu m$  a  $29.8 \mu m$ , con un promedio de  $19.46 \mu m$ . Estos valores representan un espesor reducido, lo cual se puede atribuir, desde nuestro punto de vista, al poco tiempo de tratamiento aplicado (cinco horas).

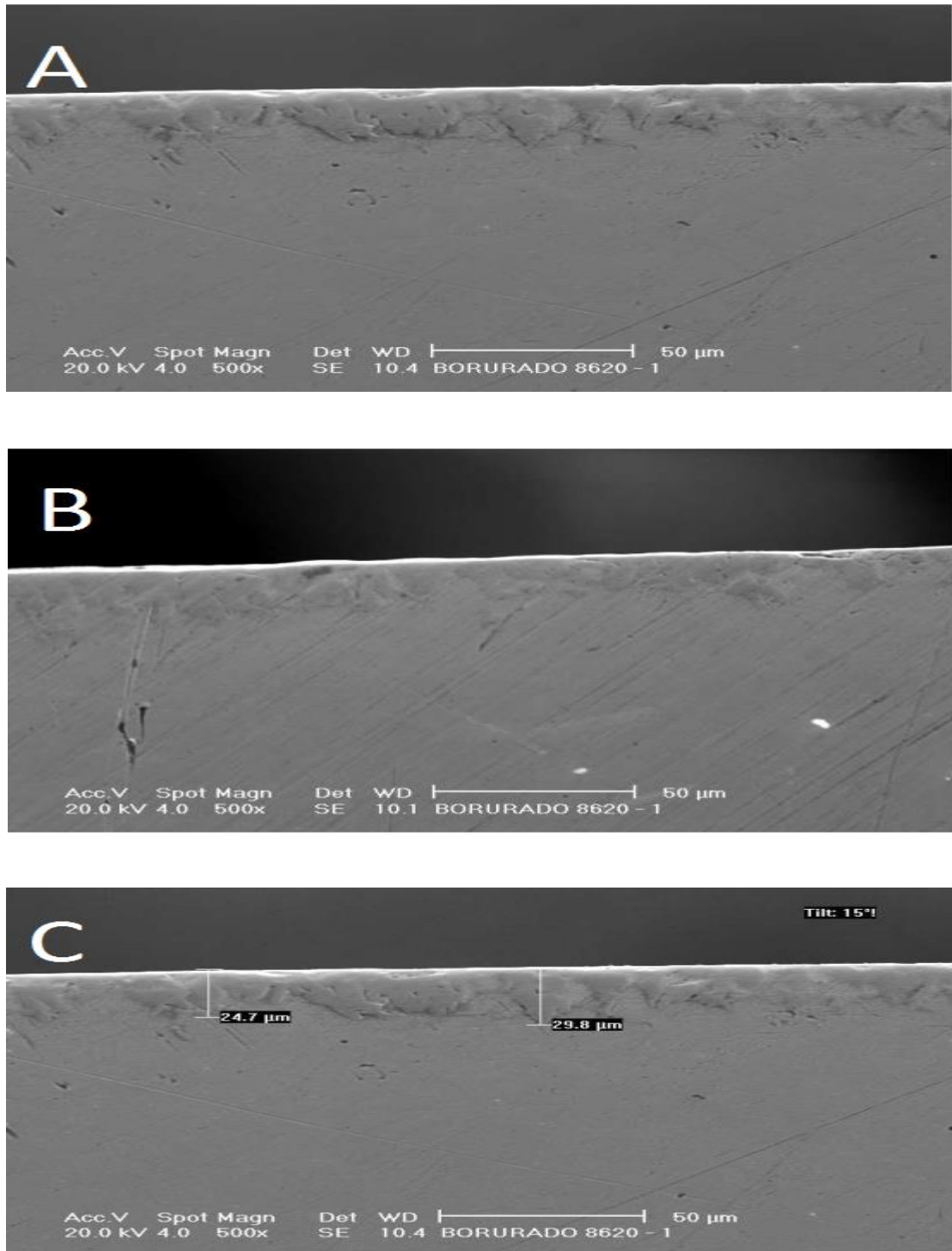


Fig.4.2. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de acero de baja aleación 8620 borurado 5 horas a 950 °C. (A, B y C) Microfotografías con un aumento de 500x.

Para el acero P20, fue necesario utilizar un mayor aumento, 1500x para poder distinguir capa borurada superficial. En la microfotografía obtenida (figura 4.3), se logra observar una capa porosa. Se menciona en la literatura que los boruros de hierro pueden llegar a generar cierto grado de porosidad debido a la presencia de oxígeno en la atmosfera de tratamiento, particularidad que, se tiene en este caso.

Para complementar los resultados anteriores, se procedió a realizar un ataque químico a la superficie con Nital al 2% (solución de alcohol y ácido nítrico), durante 5 segundos, para poder revelar la microestructura y, en su caso, corroborar si existe alguna interfase entre la capa borurada y el sustrato.

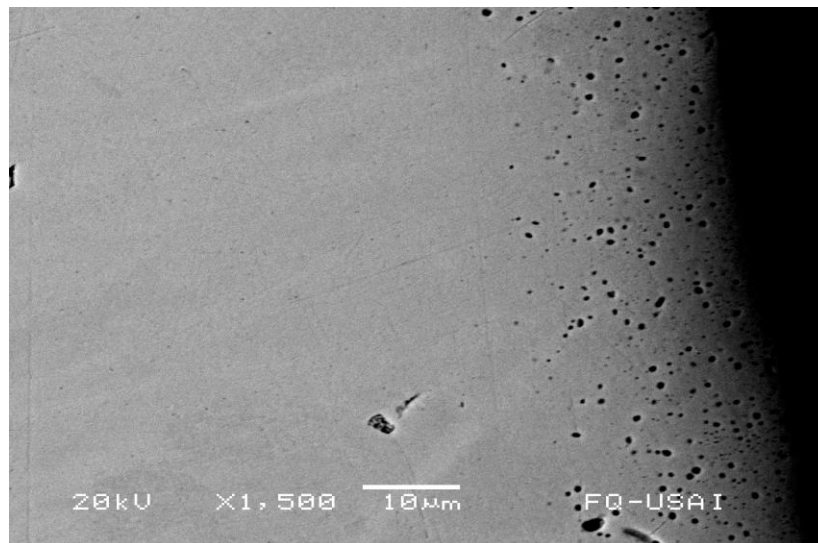


Fig.4.3 Imagen de microscopía electrónica de barrido de acero P20 borurado a 950°C, 5 horas.

1500x. Electrones secundarios.

En la figura 4.4. Se muestran micrografías obtenidas del microscopio invertido óptico. Se puede observar una capa borurada con una interfase plana bien definida, esto debido a la presencia de elementos aleantes que favorecen la formación de interfases planas entre la capa y sustrato [25]. Además se observa la presencia de una capa difusiva por debajo de la capa borurada; esto se debe a que los átomos de carbono no se difunden en las fases boruradas, y tienden a dirigirse hacia el sustrato, formando una zona difusiva justo por debajo del posible revestimiento. [26].

También se midió el espesor de la capa formada (figura 4.5). Se obtuvieron datos entre  $26.86 \mu\text{m}$  y  $35.68 \mu\text{m}$  con un promedio de  $31.34 \mu\text{m}$ ; lo cual corrobora los datos obtenidos mediante SEM. Estos valores representan un buen valor de espesor a pesar del corto tiempo de tratamiento (5 horas) y del bajo contenido de carbono del acero.

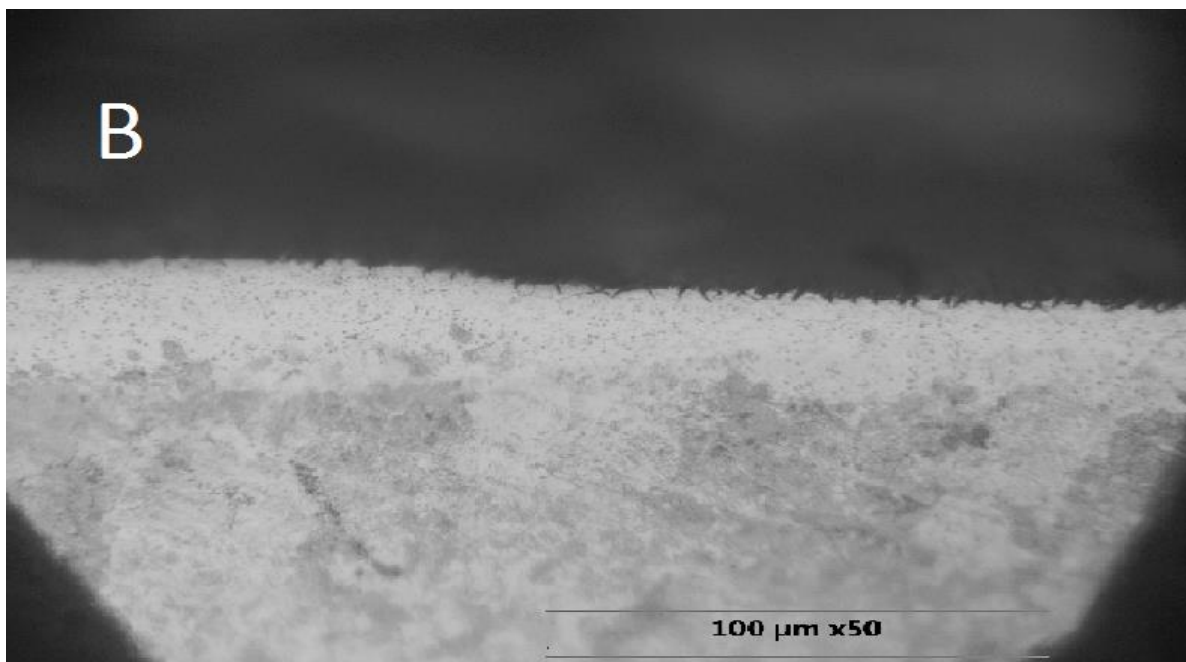
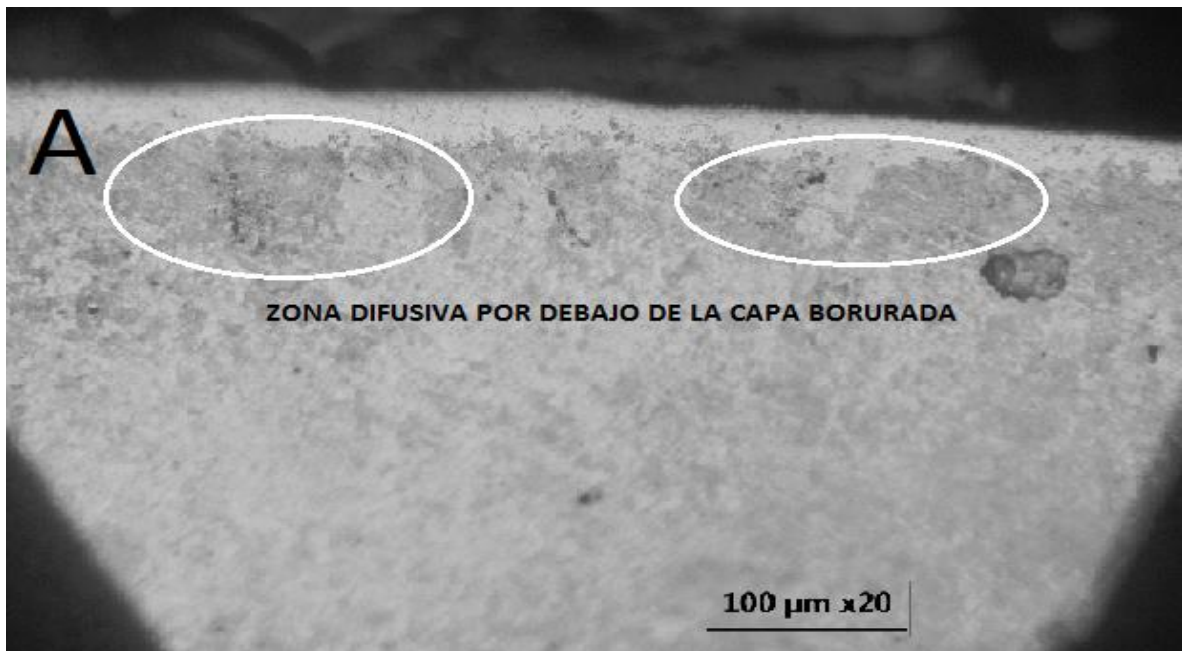


Fig. 4.4. Micrograffías del acero P20 borurado a 950°C, 5 horas obtenidas mediante microscopía óptica con aumento de A) 20x y B) 50x.

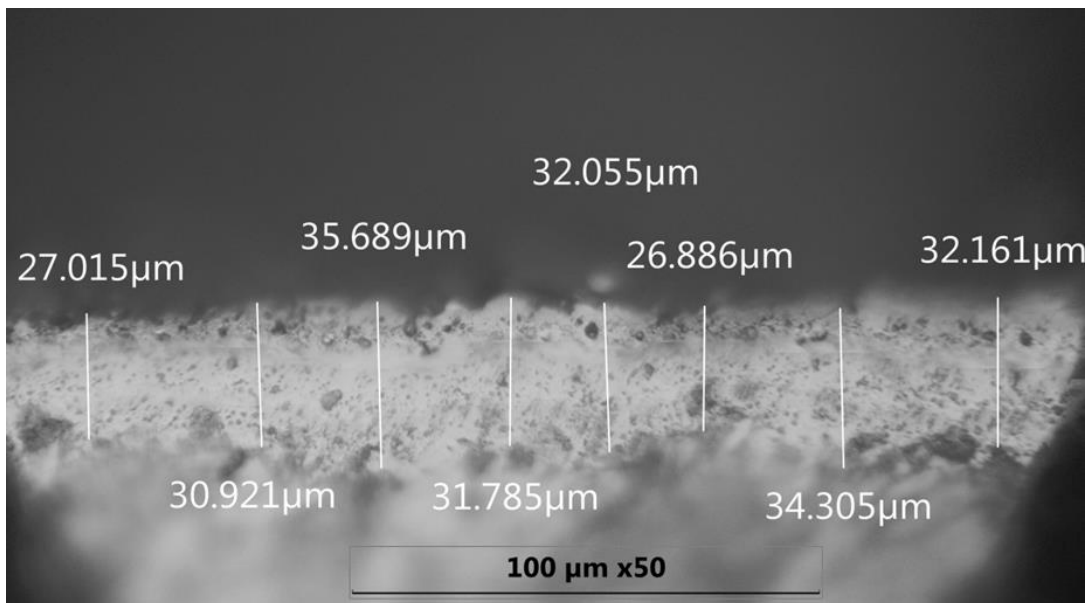


Fig.4.5. Micrografía del acero P20 borurado a 950°C 5 horas, que muestra el espesor de la capa formada. Microscopía óptica, 50 X.

Para el caso del acero 9840, también se hizo necesario recurrir al empleo de mayores aumentos (ver figura 4.6 A, B). Como pasa en el acero P20, también se detectó cierto nivel de porosidad en la zona superficial. Además no se logra distinguir claramente una interfase entre el revestimiento y el sustrato. Por lo que se procedió a realizar el ataque químico, de modo semejante, (con Nital al 2%, durante 5 segundos). Posteriormente, se realizaron observaciones a través del microscopio óptico y se obtuvieron las siguientes micrografías (figura 4.7 A, B y 4.8).

En las micrografías del microscopio electrónico de barrido (figura 4.6) se logra observar una capa muy bien definida de boruros de hierro probablemente  $\text{Fe}_2\text{B}$ , y se percibe claramente una interfase plana bien delimitada. Esta morfología puede ser causada por la presencia de los elementos aleantes Cromo y Níquel con un porcentaje de 1% y 0.8%, respectivamente.

También se observa puntos negros en la zona del recubrimiento; al igual que en el caso del acero anterior (P20), esta morfología puede ser debida a la presencia de algún nivel de porosidad

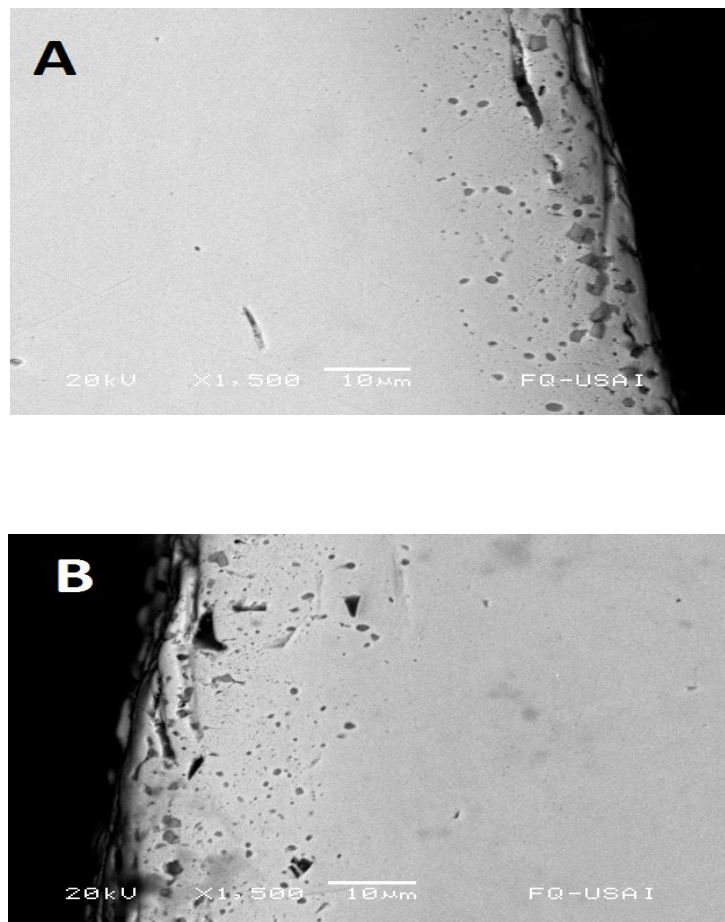


Fig.4.6. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de acero 9840 borurado a  $950^{\circ}\text{C}$  durante 5 horas. A,B) micrografías con aumento 1500x. Electrones retrodispersados.

Tras el ataque químico (figura 4.7) se logra detectar una capa borurada plana y una zona difusiva por debajo del revestimiento debido a que los átomos de carbono que no se logran difundir en las fases boruradas se dirigen hacia el interior del sustrato [3].

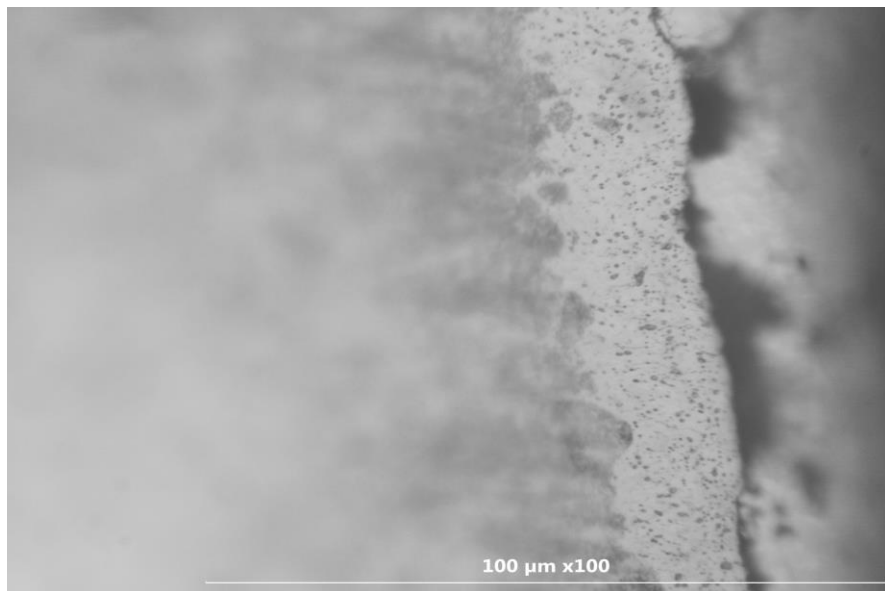


Fig.4.7. Micrografías de acero 9840 borurado a 950°C, durante 5 horas. 100x, obtenidas mediante microscopía óptica.



Para obtener el espesor aproximado del recubrimiento se utilizó el mismo microscopio óptico (figura 4.8), y se obtuvieron valores de espesor entre  $12.97\mu\text{m}$  y  $21.52\mu\text{m}$  con un promedio de  $17.20\mu\text{m}$ . Estos valores representa un espesor bajo, que se puede atribuir al contenido de Silicio 0.8% en el acero. El Silicio es desplazado por el Boro hacia la matriz del sustrato y para poder obtener un borurado con buen espesor se requieren tiempos mayores a 8 horas así como temperaturas del orden de  $1000^{\circ}\text{C}$  [25, 26, 31].

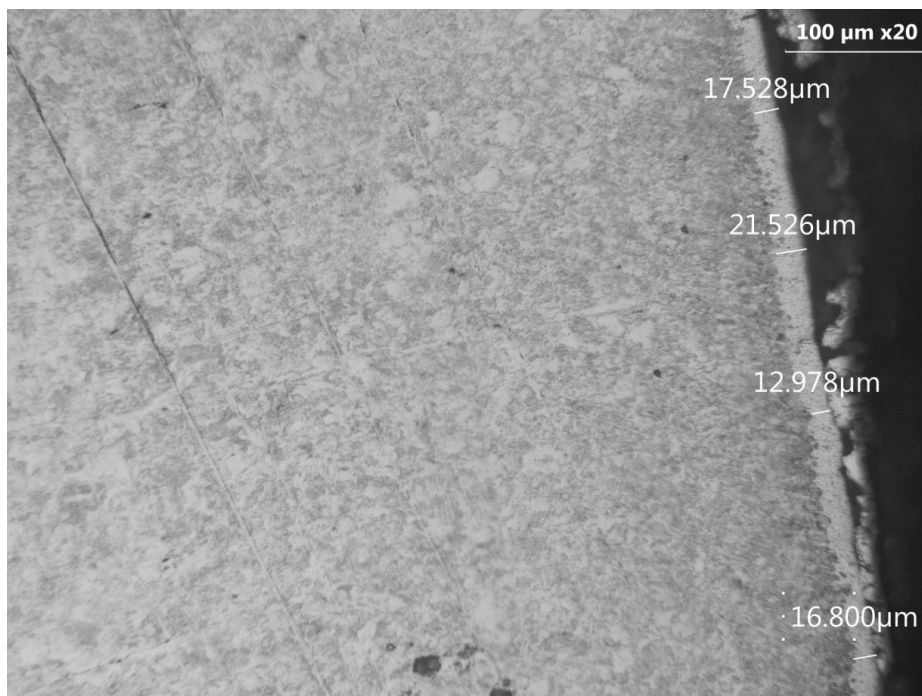


Fig.4.8. Perfil de espesores del acero 9840 borurado  $950^{\circ}\text{C}$  durante 5 horas, microscopía óptica. 20 X.

#### 4.1.2 Microdureza.

Para realizar la medición de microdureza Vickers se utilizó un microdurómetro Shimadzu HMV-G, con cargas de 50 y 100 g, como se indicó previamente.

En la figura 4.9, se muestran los datos obtenidos del microdurómetro.

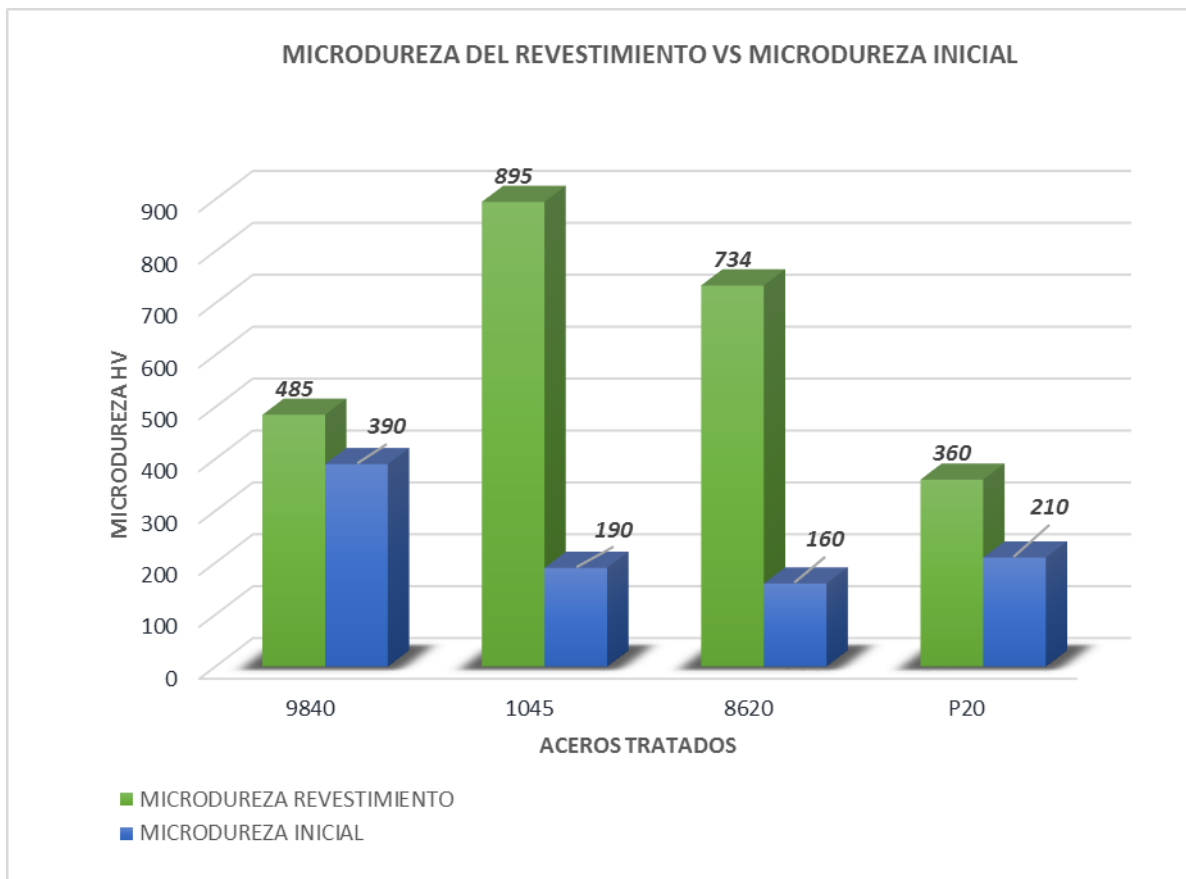


Fig. 4.9. Gráfico que muestra los valores obtenidos de la prueba de microdureza en el revestimiento vs microdureza inicial.

En la gráfica anteriormente mostrada, se destaca que el acero 1045 en el que sufre una mayor variación; muestra un incremento de un casi 370% en la microdureza obtenida sobre el recubrimiento. Tras el tratamiento se alcanzan valores de casi 1000 HV, contra un valor de 190 HV antes de realizar el recubrimiento, lo cual permite esperar la muy probable existencia de boruros de hierro del tipo  $Fe_2B$  (cuyos valores registrados en la literatura se encuentran entre los 1400 y 2000 HV escala Vickers) en el recubrimiento de borurado [25]. Para este acero se utilizó una carga de 100 gramos.

Para el acero 8620 (figura 4.9), se muestra un claro incremento en la Microdureza Vickers de un casi 360% comparada a la que se midió antes del tratamiento. Los valores obtenidos en la capa del borurado superan los 800 HV, contra 160 HV (los valores que se encuentran registrados en la literatura van desde los 750 a 1800 HV escala Vickers) medida antes de realizar el recubrimiento. Teniendo en cuenta estos resultados podemos deducir que, es probable, la presencia de boruros de hierro ( $Fe_2B$ ), lo que ha sido corroborado y presentado en trabajos anteriores [25, 26, 31, 36,]. Para este acero se utilizó una carga de 100 gramos.

Para el acero P20 (figura 4.9), se muestran datos muy distintos a los aceros descritos anteriormente. En este caso el incremento en la Microdureza Vickers es de 71%, muy por debajo de los resultados anteriores. Por lo tanto, se llega a la deducción que la zona del revestimiento, obtenida en el acero P20, es muy viable

la presencia de otros posibles boruros como; boruro de cromo CrB y boruro de manganeso MnB [37, 38]. Como se muestra en la micrografía (figura 4.3) hay presencia de porosidad generada. Este defecto contribuye a la disminución del valor de dureza obtenido. La presencia excesiva de oxígeno durante el proceso debido a que el tratamiento no fue realizado en una atmósfera controlada; pudo contribuir a la producción de este tipo de morfología. Este acero es de grado de aleación alto tanto en cromo como manganeso (0.75 y 1.7 respectivamente) y estos no permitieron la formación de suficientes boruros de hierro, probablemente y si la de otros boruros (CrB, MnB) debido a que el cromo y manganeso son altamente solubles en el boruro de hierro Fe<sub>2</sub>B y hace que se dé el reemplazo de hierro por el cromo y manganeso [3, 37, 38] ligado todo ello, al poco tiempo de tratamiento.

Para el acero 9840 (figura 4.9), se puede apreciar que los resultados de la microdureza son muy distintos a los del P20, 1045, 8620, pues en la zona del recubrimiento aparece un incremento de un 25 % en la Microdureza Vickers. Al igual que el acero P20 en la micrografía (figura 4.6) se observa la presencia de cierta porosidad en la zona del revestimiento. Adicional a ello cabe mencionar que el corto tiempo de tratamiento pudo incidir en la formación insuficiente de boruros de hierro, lo cual puede estar asociado con la presencia de boruros de otros elementos aleantes como CrB (boruro de cromo), y un posible efecto de la presencia también de silicio y níquel cuyo contenido en el acero es de 0.8% y 1% respectivamente. En cuanto al primero se sabe que el silicio es insoluble en las capas de boruros de hierro Fe<sub>2</sub>B y los contenidos de silicio (mayores a 0.8%)

pueden formar por debajo de la capa de boruro  $\text{Fe}_2\text{B}$  una fase de ferrita blanda que tiene una capacidad de carga baja. En cuanto al níquel restringen la solubilidad del boro en el hierro e impide la formación de boruros de hierro tipo  $\text{FeB}$  cuya fase representa el mayor valor de microdureza. (3, 36, 37, 38) y todo ello colaborar a la baja microdureza medida.

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS OBTENIDOS				
ACERO	MORFOLOGIA	ESPEJOR PROMEDIO	MICRODUREZA	OBSERVACIONES VS LITERATURA
1045	Estructura columnar (tipo dientes de sierra)	44.5 $\mu\text{m}$	895 HV incremento de 370%	<p>1- Morfología característica de los aceros al carbono (estructura tipo dientes de sierra) [25].</p> <p>2- Se tiene un espesor coherente con la literatura, cuyo valores se encuentran entre 50 y 115 <math>\mu\text{m}</math>. [25].</p> <p>3- Valor muy cercano a 1000HV; en la literatura se muestran valores de 1400 a 1800 HV . [25].</p>
8620	Estructura columnar y en ciertas partes plana	19.46 $\mu\text{m}$	734 HV incremento de 360%	<p>1- Morfología columnar y plana, característica en este tipo de acero de baja aleación. [36]</p> <p>2- Espesor muy pequeño comparado contra la literatura que reporta entre 55 y 65 <math>\mu\text{m}</math>.</p> <p>3- En dureza se obtiene un buen incremento y se encuentra cerca por lo reportado en trabajos anteriores (750-1800 HV). [36].</p>
P20	Estructura plana y porosa	31.34 $\mu\text{m}$	485 HV incremento de 71%	<p>1- Estructura plana y porosa, debido a la presencia de oxígeno y elementos aleantes que favorecen la estructura plana (cromo, carbono) [3].</p> <p>2- Se tiene un espesor muy favorable aun debido al cromo presente y tiempo de exposición bajo.</p> <p>3- Microdureza muy por debajo a los reportados (600 - 1600 HV) debido a la porosidad presente en el revestimiento. [37]</p>
9840	Estructura plana y porosa	17.20 $\mu\text{m}$	360 HV incremento de 25%	<p>1- Estructura plana y porosa debido a la presencia de oxígeno y elementos aleantes que favorecen la estructura plana (cromo, níquel y silicio).</p> <p>2- Se tiene un espesor muy pobre provocado por el Silicio existente y el corto tiempo de exposición.</p> <p>3- Valor de microdureza bajo, debido a la porosidad presente en el revestimiento y posible formación de otros tipos de boruros como CrB y los elementos aleantes como el Silicio y Níquel. [3]</p>

Tabla 4.1. Tabla comparativa de los resultados obtenidos versus lo reportado con la literatura.

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se llevó a cabo un tratamiento termoquímico de borurado, con la finalidad de difundir boro en diferentes sustratos. El agente borurante utilizado para el revestimiento fue Bórax comercial. Utilizando un mezcla de 75% en peso de Bórax y 25% en peso de Carburo de Silicio. Mediante este método fue posible obtener capas boruradas de bajo costo sobre diversos aceros al carbono (AISI 1045, 8620, P20, 9840), en comparación con las obtenidas si se utilizara algún otro agente borurante como; Carburo de Boro, Boro Amorfo, o Ferroboro.

En los resultados obtenidos en esta tesis se logró difusión, determinado por la morfología obtenida en microscopía electrónica de barrido, en los cuatro aceros utilizados. Donde esta capa cumple con las características tanto visuales y de valores de microdureza, pero no se pudo comprobar al 100% que existieran los boruros de hierro, se utilizaron técnicas adicionales para poder corroborar la presencia de estos boruros de hierro las cuales fueron análisis químico por Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS) y Fluorescencia de Rayos X (XRF) cuyos resultados se muestran en los anexos [6, 7, 8], mismos que no detectaron Boro en la superficie, lo cual se le puede atribuir a que el potencial de boro existente en el revestimiento es muy ligero o escaso y con ello imperceptible a los equipos.

Los elementos aleantes jugaron un papel muy importante en las capas obtenidas. Se puede vislumbrar que mejorando los parámetros experimentales del tratamiento, se puede lograr un mejor recubrimiento (mayor espesor y morfología) y un significativo incremento en sus propiedades mecánicas.

Se logra comprobar que los aceros no aleados al carbono son ideales para el borurado. Además se logra detectar que la interfase entre revestimiento y matriz muestra una morfología predominantemente columnar o de "dientes de sierra". En el caso de los aceros aleados (bajo contenido de carbono) se encontró que conforme la cantidad de elementos aleantes se va incrementando, la interfase entre el revestimiento y el sustrato se vuelve plana.

Se puede agregar también que los parámetros experimentales y el equipo utilizado juega un papel importante, para la obtención de resultados óptimos, en este trabajo se tuvo presencia de cierta porosidad y de capas con espesores muy bajos. La porosidad observada se asoció a la presencia de oxígeno dentro del sistema usado. El espesor delgado está relacionado con el corto tiempo de tratamiento.

Para finalizar se puede decir que se obtuvieron resultados favorables; aunque es necesario, llevar a cabo más pruebas de evaluación para poder determinar si este recubrimiento puede tener una posible aplicación a nivel industrial, y para poder optimizar este tratamiento en los aceros que fueron utilizados en este trabajo. En la búsqueda de alternativas para elevar su vida útil, en este tipo de aleaciones se ha mostrado que este tratamiento puede lograr una interesante



mejora las propiedades mecánicas. Además; dado que el Bórax es más económico que cualquier otro agente borurante anteriormente descrito, como; el Carburo de Boro, o Boro Amorfo, este proceso podría representar una reducción en costos de obtención de la capa con lo que se reducirían el costo de los mantenimientos correctivos de las piezas mecánicas, cuyo principal problema sea el desgaste.

En los siguientes trabajos se sugiere añadir componentes a la mezcla como activadores (sustancias que inducen la reacción de boro en el sustrato ferroso para la formación de una capa borurada) como  $\text{KBF}_4$  (tetrafluorborato de potasio) o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (carbonato de sodio) [31] usando el mismo medio de aporte, incrementar el tiempo de proceso y utilizar otras temperaturas, complementar la caracterización y finalmente, iniciar trabajos orientados a obtener revestimientos de elevada dureza.

## CAPITULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Sepulveda C. "Mas resistente es posible, boracion de metales". *Metal Actual [en linea]*, No 23, p 39-42. [Consulta Agosto 2014]. Disponible en: [http://www.metalactual.com/revista/23/procesos\\_boracion.pdf](http://www.metalactual.com/revista/23/procesos_boracion.pdf).

[2] Diaz del Castillo, F. "Lecturas de ingenieria 1. Endurecimiento superficial del acero". FES-Cuautitlan. 2007, 48 pp.

[3] Suwattananont N. Thesis: "Surface treatment of ferrous alloys with boron". Faculty of New Jersey Institute of Technology. New Jersey EE.UU. 2004.

[4] Davis, J. R. "Boriding" in "Surface hardening of Steels – Understanding the basics". *Ohio: ASM International*. (2002), p 213 – 226.

[5] Sinha, A. K. "Boriding (Boronizing). Heat Treatment" *Vol. 4, ASM Handbook*. *Ohio: ASM International*. (1991). P 437 – 447.

[6] Stewart, K. "Boronizing Protect Metals Against Wear". *Adv. Mater. Process*. 155(3). (1997), p 23 – 25.

[7] Kulka, M. & Pertek, A. "Microstructure and properties of boride 41Cr4 steel after surface modification with re-melting". *Appl. Surf. Sci*. 214. (2003), p278-288.

[8] Anthymidis, K. G., Stergioudis, E., & Tsipas, D.N. "Boriding in a fluidized bed reactor". *Mater. Lett.*, 3. (2001), p 303-311.

[9] Anthymidis, K. G., Zinoviadis, P., Roussos, D. & Tsipas, D.N. "Boriding of Nickel in a fluidized bed reactor". *Mater. Res. Bull.*, 37. (2002), p 512-522.

[10] Anthymidis, K. G., Stergioudis, G., & Tsipas, D.N. "Boride coatings on non-ferrous materials in a fluidized bed reactor and their properties". *Sci. Technol. of Surf. Sci.*, 200. (2002), p 203-218.

[11] Bourithis, L., Papaefthymiou, S. & Papadimitriou, G.D. "Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties". *Appl. Surf. Sci.*, 200. (2002), p 203-218.

[12] Bourithis, L. & Papadimitriou, G.D. "Boriding a plain carbon steel with the plasma transferred arc process using boron and chromium diboride powders: microstructure and wear properties". *Mater. Lett.*, 157. (2003), p 1835-1839.

[13] Yu, L.G., Khor, K.A & Sundararajan, G. "Boriding of mild steel using the spark plasma sintering (SPS) technique". *Surf. Coat. Technol.*, 157. (2002), p 226-230.

[14] Cabeo, E.R., Audien, G., Biemer, S., Rie, K. -T. & Hoppe, S. "Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed d.c. glow discharge". *Surf. Coat. Technol.* 116-119. (1999), p 229-233.

[15] Löbig, G. & Hunger, H. -J. "Generation of boride layers on steel and nickel alloys by plasma activation of boron trifluoride". *Thin Solid Films*, 310. (1997), p 244-250.

- [16] Batsch, K. & Leonhardt, A. "Formation of iron boride layers on steel by d.c.-plasma boriding and deposition processes". *Surf. Coat. Technol.*, 116-119. (1999), p 386-390.
- [17] Yoon, J. H., Jee, Y. K. & Lee, S. Y. "Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304". *Surf. Coat. Technol.*, 112. (1999), p 71-75.
- [18] Davis, J. A., Wilbur, P. J., Williamson, D.L., Wei, R. & Vajo, J.J. "Ion implantation boriding of iron and AISI M2 steel using a high-current density, low energy, broad-beam ion source". *Surf. Coat. Technol.*, 103-104. (1998), p 52-57.
- [19] Lee, S.Y., Kim, G.S & Kim, B.-S. "Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment". *Surf. Coat. Technol.*, 177-178. (2004), p 178-184.
- [20] Maragoudakis, N.E., Stergioudis, G., Omar, H., Pavlidou, E. & Tsipas, D.N. "Boro-Nitriding of steel US 37-1". *Mater. Lett.*, 57. (2002), p 949-952.
- [21] Gidikova, N. "Vanadium boride coatings on steel". *Mater. Sci. Eng. A*, 278. (1999), p 181-186.
- [22] Yan, P.X. & Su, Y.C. "Metal surface modification by B-C-N in a two temperature- stage process". *Mater. Chem. Phys.*, 39. (1995), p 304-308.
- [23] Kulka M. & Pertek, A. "Characterizacion of complex (B+C+N) diffusion layers formed on chromium and nickel-based low-carbon steel". *Appl. Surf. Sci.*, 218. (2003), p 114-123.

[24] Pertek, A. & kulka, M. "Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel". *Surf. Coat technol.*, 173. (2003), p 309-314.

[25] Bravo D. Tesis: "Formacion y caracterizacion de capas duras en aceros AISI 1045". IPN. Mexico, D.F. 2010.

[26] Bravo O. Tesis: "Endurecimiento superficial de una aleacion base Fe-Cr-Ni cinetica de crecimiento y caracterizacion mecánica de las capas boruradas". IPN. Mexico, D.F. 2010

[27] López N. Tesis: "Evaluación de tenacidad a la fractura por microidentacion en aceros borurizados AISI 4140" IPN. México, D.F. 2008.

[28] Rodríguez G. Tesis: "Estudio del comportamiento bajo condiciones de fatiga en un acero AISI 1045 endurecido superficialmente por difusión del boro". IPN. México, D.F. 2010.

[29] Hernández A. Tesis: "Análisis fractal, simulación y predicción del crecimiento de interfases complejas obtenidas por borurado". IPN. México, D.F. 2010.

[30] William F. Smith, Javad Hashemi. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Editorial McGraw-Hill, México, Cuarta Edición (2006).

[31] López C. Tesis: "Formulación numérica de la difusión del boro en capas duras de boruros de hierro formados en una configuración cilíndrica de acero AISI D2". IPN. México, D.F. 2012.

[32] Ordoñez U. Parada S. Diez C. Barba A. Valdez R. Hernández M. Covelo A. "Austenitización y Borurado de un hierro nodular austemperizado" SOMIM. Pachuca Hidalgo. México. 2013. p.625-632. ISBN: 978-607-95309-9-0

[33] Campos- Silva. G. A. Rodríguez- Castro: "Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels". IPN. México. 2012.

[34] Frank C. Thermochemical treatment of metals. 2012. Ontario Canadá. Canadá.

[35] Campos I. Torres R. Ramírez G. Martínez J. Sánchez M. "Evaluación de la movilidad del boro en aceros al carbono y herramientas en el proceso de borurización en pasta". ESIME IPN. México. 2006, pp, 123-130.

[36] A. Calik, A. Duzgun, A.E. Ekinci, S. Karakas and N. Ucar. "Comparison of Hardness and Wear Behaviour of Boronized and Carburized AISI 8620 Steels. *ACTA PHYSICA POLONICA A*. Vol. 16. No 6. p. 1029-1032. (2009).

[37] I. Uslu, H. Comert, M. Ipek, O. Ozdemir, C. Bindal. "Evaluation of borides formed on AISI P20 steel". *Materials & Design*. Volume 28, Issue 1, 2007, Pages 55–61.

[38] I. Uslu, H. Comert, M. Ipek, O. Ozdemir, C. Bindal. "A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels". *Materials & Design*. Volume 28, Issue 6, 2007, Pages 1819–1826

[39] [www.cosmopolita.com.mx](http://www.cosmopolita.com.mx). Drogueria Cosmopolita S.A de C.V. Fecha de consulta 15-Abril-2016.

[40] [www.goodfellow.com](http://www.goodfellow.com). Distribuidores de metales y materiales para la investigacion y la industria. Fecha de consulta 15 de Abril de 2016.

[41] [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com). Sigma- Aldrich Quimica S de R.L de C.V. Fecha de consulta 15 de Abril de 2016

[42] [www.durferferrit.com](http://www.durferferrit.com). Hef-Durferferrit De México, S.A. De C.V. Fabricantes de productos químicos. Fecha de consulta 15 de Abril de 2016

[43] [www.sisa1.com](http://www.sisa1.com). Distribuidor de aceros especiales. Fecha de consulta 15 de Abril de 2016.

## ANEXOS


<b>COSTO DE AGENTES BORURANTES</b>		
<b>Reactivo</b>	<b>Presentacion</b>	<b>Costo MXN</b>
Carburo de Boro (B <sub>4</sub> C)	Granulado 1 Kg	\$183.93
Carburo de Boro (B <sub>4</sub> C)	Granulado 2 Kg	\$288.70
Carburo de Boro (B <sub>4</sub> C)	Polvo malla 180 500 grs	\$723.06
Carburo de Boro (B <sub>4</sub> C)	Polvo malla 200 100 grs	\$1,126.00
Carburo de Boro (B <sub>4</sub> C)	Polvo malla < 10 µm 50 grs	\$1,491.00
Boro Amorfo	Polvo 1 micra 5 g	\$1,094.00
Boro Amorfo	Polvo 1 micra 50 grs	\$3,121.00
Boro Amorfo	Polvo 1 micra 250 grs	\$9,540.00
Borax Decahidratado Puro	Polvo 250 grs	\$68.62
Borax Decahidratado Tecnico	Polvo 500 grs	\$23.61
Borax Pentahidratado Tecnico	Polvo 1 Kg	\$33.64

**Anexo 1.** Costo de diferentes agentes borurantes existentes en el mercado mismo que fueron utilizados en trabajos anteriores. [27, 28, 29, 30, 31]. Algunos de ellos no se encuentran en México y se tienen que importar. [39, 40, 41, 42]



**Acero SISA P20**  
*acero para moldes de plástico*

ACEROS



din 1.2311

---

**SERVICIO INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.**

---

Color de distinción blanco rojo blanco

---

**CARACTERÍSTICAS**

El acero SISA P20 pre-templado es de uso general para la fabricación de moldes. Utilizado para el maquinado y electro-erosionado de moldes de plástico y componentes para la fundición de zinc. Se surte pre-templado a una dureza estándar de aprox. BHN 293-321 (HRC 30-34).

Normalmente no requiere un tratamiento térmico adicional, sin embargo el acero SISA P20 se puede templar a durezas mayores para incrementar su resistencia. Cuando enfriamiento al aceite es requerido, cuidado especial es necesario para reducir la distorsión o fractura.

Provee excelente pulibilidad y buen texturizado.

**APLICACIONES TÍPICAS**

Moldeo por Compresión	Moldes para Inyección de Plástico
Porta Moldes y Piezas de Apoyo	Herramientas para Fundición a Presión de Zinc
Piezas para la Construcción de Maquinaria y Útiles en General	Moldeo en Dos Fases

---

**COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO**

C	Si	Mn	Cr	Mo
0.30	0.50	0.75	1.70	0.40

---

**NORMAS**

AISI	DIN	JIS
P20	1.2311	---

---

**MAQUINABILIDAD Y RECTIFICABILIDAD**

La maquinabilidad y rectificabilidad en estado recocido es aproximadamente un 80% de un acero tipo W1(1% C).

*Nota: Las propiedades indicadas en esta hoja técnica son valores típicos. Variaciones normales en la química, tamaño y condiciones de tratamiento térmico pueden producir desviaciones de estos valores. Para datos adicionales o asistencia en ingeniería metalúrgica, acudir al departamento técnico de SISA.*

**SISA P20**

**PROPIEDADES FÍSICAS**

**Módulo de Elasticidad** 30 psi x 10<sup>6</sup> (207 GPa)  
**Densidad** 7860 kg/m<sup>3</sup> (0.284 lb/in<sup>3</sup>)  
**Conductividad Térmica**

	cal/cm-s-°C	BTU/hr-ft-°F	W/m-°K
a 95°C (200°F)	0.990	24	42

**Coefficiente de Dilatación Térmica**

	mm/mm-°C	in/in-°F
20-260°C / 70-500°F	12.3 x 10 <sup>-6</sup>	6.84 x 10 <sup>-6</sup>
20-425°C / 70-800°F	12.8 x 10 <sup>-6</sup>	7.10 x 10 <sup>-6</sup>
20-540°C / 70-1000°F	13.7 x 10 <sup>-6</sup>	7.60 x 10 <sup>-6</sup>

---

**TRATAMIENTOS SUPERFICIALES**


**Cementado:** El acero SISA P20 también es apto para el cementado, resultando en dureza de cementado de 53-57 HRC, como se muestra en la siguiente tabla:

**Dureza Obtenible:**  
*Cementado con Gas a 870°C (1600°F) y enfriado en horno a 800°C (1475°F), posterior enfriamiento al aceite y revenido 4-4 hrs.*

Temperatura (°C)	Dureza de Cementado HRC	Dureza al Núcleo
315°C (600°F)	57-58	47-48
345°C (650°F)	57-58	46-47
370°C (700°F)	55-56	45-46
400°C (750°F)	54-55	44-45
425°C (800°F)	53-55	43-44
485°C (900°F)	52-53	39-40

*Durezas mostradas son típicas para una barra con diámetro de 4" (102 mm). Secciones mayores pueden mostrar durezas ligeramente más bajas. La dureza al núcleo también puede ser incrementada en el tratamiento térmico asociado con el cementado, resultando en una pérdida de tenacidad al núcleo.*

**Nitrurado:** El acero SISA P20 es apto para el nitrurado por medio de la mayoría de procedimientos comerciales, resultando en una dureza superficial de 55-65 HRC. La penetración de dureza típica después de nitrurado a 525°C (975°F) se muestra a continuación:



Penetración de la Dureza en Milímetros

Dureza HRC

**SISA P20 BHN 300**

Anexo 2. Hoja técnica del acero P20 [43].

<b>Acero SISA 9840R</b>		<b>SISA 9840 R</b>			
<b>Recocido</b>					
<small>acero grado maquinaria</small>					
					
<b>SERVICIO INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.</b>					
Color de distinción	amarillo	rojo			
<b>CARACTERÍSTICAS</b>					
Acero grado maquinaria al Cromo-Níquel-Molibdeno de buen rendimiento. Sus elementos de aleación debidamente balanceados lo hacen de buena resistencia a la fatiga.					
<b>APLICACIONES TÍPICAS</b>					
Piezas para Maquinaria en General Cigüeñales Engranajes Engranajes de Transmisión Ejes Bielas Portamoldes Moldes y Corazones para la Industria del Plástico					
<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO</b>					
C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni
0.40	0.80	0.30	0.80	0.25	1.00
<b>NORMAS:</b>					
SAE / AISI			DIN		
9840	1.6511		- 36CrNiMo4		
			<small>Nota: Las propiedades indicadas en esta hoja técnica son valores típicos. Variaciones normales en la química, tamaño y condiciones de tratamiento térmico pueden producir desviaciones de estos valores. Para datos adicionales o asistencia en Ingeniería Metalúrgica, acudir al departamento técnico de SISA.</small>		
			<b>Servicio Industrial, S.A. de C.V.</b> <small>www.acerosisa.com.mx</small>		
<b>Aceros Especiales Grados Herramienta y Maquinaria</b> <b>Aceros SISA-MET® de Metalurgia en Polvo (PM)</b> <b>Piezas Industriales Forjadas</b>					
<b>Ciudad de México:</b> Naranjos 6 - Col. San Francisco Cuautlalpan, Naucalpan - cp 53569, Estado de México Tel - (55) 5576-4011 Fax - (55) 5576-4997 <a href="mailto:sisa@sisa1.com.mx">sisa@sisa1.com.mx</a>					
<b>Monterrey:</b> Guerrero Norte 4120 - Col. del Norte, Monterrey - cp 64500, Nuevo León Tel - (81) 8351-7220 Fax - (81) 8351-2981 <a href="mailto:sisamty@sisa1.com.mx">sisamty@sisa1.com.mx</a>					
<small>Cat. 9840R 02/13 © Derechos Reservados, México DF, 2013 Servicio Industrial, S.A. de C.V. SISA® y SISA-MET® son Marcas Registradas. Impreso en México</small>					



## ACEROS AL CARBÓN

SAE Número	C	Mn	P Max	S Max	AISI Número
.....	0.06 max	0.35 max	0.040	0.050	C1005
1006	0.08 max	0.25-0.40	0.040	0.050	C1006
1008	0.10 max	0.25-0.50	0.040	0.050	C1008
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.040	0.050	C1010
.....	0.10-0.15	0.30-0.60	0.040	0.050	C1012
.....	0.11-0.16	0.50-0.80	0.040	0.050	C1013
1015	0.13-0.18	0.30-0.60	0.040	0.050	C1015
1016	0.13-0.18	0.60-0.90	0.040	0.050	C1016
1017	0.15-0.20	0.30-0.60	0.040	0.050	C1017
1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.040	0.050	C1018
1019	0.15-0.20	0.70-1.00	0.040	0.050	C1019
1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.040	0.050	C1020
....	0.18-0.23	0.60-0.90	0.040	0.050	C1021
1022	0.18-0.23	0.70-1.00	0.040	0.050	C1022
....	0.20-0.25	0.30-0.60	0.040	0.050	C1023
1024	0.19-0.25	1.35-1.65	0.040	0.050	C1024
1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.040	0.050	C1025
.....	0.22-0.28	0.60-0.90	0.040	0.050	C1026
1027	0.22-0.29	1.20-1.50	0.040	0.050	C1027
.....	0.25-0.31	0.60-0.90	0.040	0.050	C1029
1030	0.28-0.34	0.60-0.90	0.040	0.050	C1030
1033	0.30-0.36	0.70-1.00	0.040	0.050	C1033
1034	0.32-0.38	0.50-0.80	0.040	0.050	C1034
1035	0.32-0.38	0.60-0.90	0.040	0.050	C1035
1036	0.30-0.37	1.20-1.50	0.040	0.050	C1036
1038	0.35-0.42	0.60-0.90	0.040	0.050	C1038
.....	0.37-0.44	0.70-1.00	0.040	0.050	C1039
1040	0.37-0.44	0.60-0.90	0.040	0.050	C1040
1041	0.36-0.44	1.35-1.65	0.040	0.050	C1041
1042	0.40-0.47	0.60-0.90	0.040	0.050	C1042
1043	0.40-0.47	0.70-1.00	0.040	0.050	C1043
<b>1045</b>	<b>0.43-0.50</b>	<b>0.60-0.90</b>	<b>0.040</b>	<b>0.050</b>	<b>C1045</b>
1046	0.43-0.50	0.70-1.00	0.040	0.050	C1046
1050	0.48-0.55	0.60-0.90	0.040	0.050	C1050

Anexo 4. Composición química del acero 1045 [43].

**Acero SISA 8620**

acero grado maquinaria

ACEROS



desde 1941

**SERVICIO INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.**Color de  
distinción

aluminio

verde

**CARACTERÍSTICAS**

Acero grado maquinaria al Níquel-Cromo-Molibdeno para cementado. Ofrece muy buena dureza superficial y gran tenacidad al núcleo. El proceso de cementado se aplica para incrementar el contenido de carbón en la superficie para que con un tratamiento térmico adecuado, la superficie sea substancialmente mas dura que el núcleo.

**COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO**

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0.20	0.80	0.25	0.60	0.50	0.20

**NORMAS:**

SAE / AISI	DIN
8620	1.6523 - 21NiCrMo2

**APLICACIONES TÍPICAS**

Cigüeñales	Tornillos Sin Fin
Piñones	Pernos
Engranés	Pistones
Engranés para Reductores	Flechas

*Nota: Estas son algunas de las aplicaciones típicas. No debe intentar su aplicación específica sin un estudio independiente y una evaluación de funcionalidad.*

**PROPIEDADES FÍSICAS**

Módulo de Elasticidad	30 psi x 10 <sup>6</sup>	(207 GPa)
Gravedad Específica		(7.84)
Densidad	7840 kg/m <sup>3</sup>	(0.283 lb/in <sup>3</sup> )

**TRATAMIENTO TÉRMICO****Forjar**

1050-850°C (1920-1560°F)

No forjar por debajo de 825°C (1520°F), enfriamiento lento en horno o material termoaislante.

**Recocer**

Calentar a 870°C (1600°F), mantener 2 horas, enfriamiento lento de 30°C (50°F) por hora hasta 650°C (1200°F), dejar enfriar en el horno o en aire quieto a temperatura ambiente.

**Dureza en Estado Recocido**

Aprox. BHN 143/163

**Relevado de Esfuerzos**

**Piezas Recocidas:** Calentar a 1100-1300°F (595-740°C), mantener 2 horas, dejar enfriar en aire quieto.

**Piezas Templadas:** Calentar a 30-55°C (50-100°F) debajo de la temperatura original de revenido, mantener 2 horas, dejar enfriar en aire quieto.

**Enderezado:** Recomendable hacerlo entre 205-425°C (400-800°F)

**CEMENTAR - Carburizado**

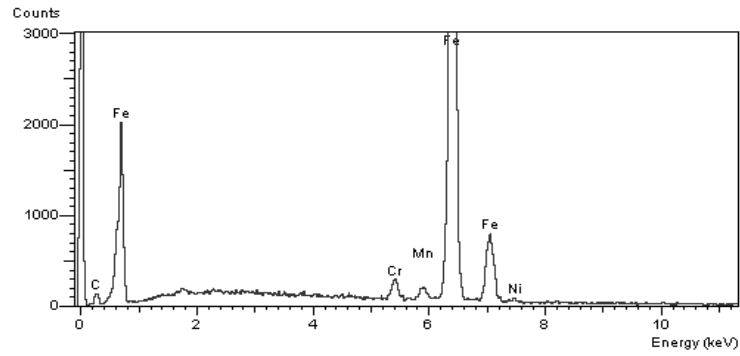
En caja o en sales a la profundidad deseada a 880-925°C (1615-1700°F). Enfriamiento en aceite o al ambiente. Revenir inmediatamente.

**Revenir**

Durante 1 hora mínimo a 150-260°C (300-500°F).

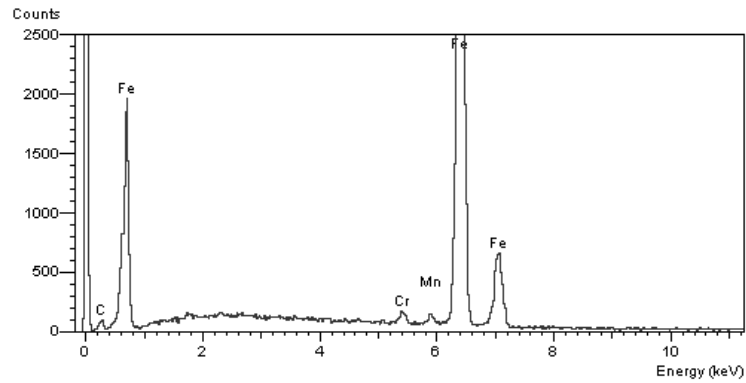
El proceso de cementado se aplica para incrementar el contenido de carbón en la superficie para que a través de un tratamiento térmico adecuado, la superficie cementada se vuelve substancialmente mas dura que el núcleo. El proceso combinado de carburizar y de templar por medio del tratamiento térmico es generalmente conocido como "cementado". El proceso de tratamiento térmico es seleccionado para cada aplicación en particular, de acuerdo a las propiedades requeridas tanto en la superficie como en el núcleo. Aunque existen muchos tratamientos térmicos para los aceros de cementado, los siguientes tratamientos son algunos de los típicamente usados.

### Acero 9840



Anexo 6. Espectro obtenido del EDS para el acero 9840.

### Acero P20



Anexo 7. Espectro obtenido del EDS para el acero P20

File Trigger Pull (F6) Display Help

**8620**

364 Igualar 9.9 06-06 11:02  
Hora 45.0

El	Mín.	%	Máx.	+/- [*2]
Fe	93.00	97.32	100.00	0.26
Mn	0.70	0.86	0.90	0.03
Cr	0.40	0.55	0.60	0.02
Ni	0.40	0.43	0.70	0.03
Si	0.15	0.36	0.35	0.06
Cu		0.18		0.02
Mo	0.15	0.16	0.25	0.01
S	0.00	0.06	0.04	0.01
Sn		0.01		0.01

Usar en Promedio

De promedio Calcular el Promedio

Espectro Editar info Atrás

**8620**

364 Igualar 9.9 06-06 11:02  
Hora 45.0

El	Mín.	%	Máx.	+/- [*2]
Mn	0.70	0.86	0.90	0.03
Cr	0.40	0.55	0.60	0.02
Ni	0.40	0.43	0.70	0.03
Si	0.15	0.36	0.35	0.06
Cu		0.18		0.02
Mo	0.15	0.16	0.25	0.01
S	0.00	0.06	0.04	0.01
Sn		0.01		0.01

Usar en Promedio

De promedio Calcular el Promedio

Espectro Editar info Atrás

Anexo 8. Resultados obtenidos en la técnica de Fluorescencia de Rayos X para el acero

8620.