

**ESTUDIAR BORONIZADO SOBRE ACERO AISI 1045 EMPLEANDO
DIFERENTES COMBINACIONES SÓLIDAS BORURIZANTES**

**JUAN CAMILO TOLOZA ESPARZA
YEFFERSON ERLEY CARRILLO MONAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDAER
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2021

**ESTUDIAR BORONIZADO SOBRE ACERO AISI 1045 EMPLEANDO
DIFERENTES COMBINACIONES SÓLIDAS BORURIZANTES**

**JUAN CAMILO TOLOZA ESPARZA
YEFFERSON ERLEY CARRILLO MONAR**

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR
ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS
Ingeniero Mecánico, M.Sc, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2021

DEDICATORIA

Dedico éste trabajo primero que todo a mi tía Leidy Milena Carrillo quien fue la participe principal de poder lograr ser un gran profesional y su gran apoyo.

A mis padres Yasmin Monar Alvarado y Wilmer Sandoval Pinzón quienes me apoyaron y guiaron en mis momentos más críticos.

A mi hermano Sebastián Sandoval Monar quien es la persona que me daba fuerza cada día para poder lograr éste objetivo y quién es mi pupilo.

A mis primos Jairo Hernández Monar y Jefferson Esneider Cruz Monar que fueron un gran apoyo moral y emocional en estos años y me motivaron a poder lograrlo.

Y todos mis amigos de la universidad que estuvieron dando su granito de arena para poder lograr culminar éste proceso.

A todos ustedes muchas gracias.

Yefferson Erley Carrillo Monar

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis abuelos maternos Ramon y Maritza, por su apoyo desde pequeño, acompañarme y alentarme a estudiar, aunque alguna vez rígidamente siempre entregándome amor.

A mi madre Andrea la cual me apoyo en toda la carrera con mis altas y bajas, por apoyarme en mis proyectos, respetar mis creencias y permitirme darme ciertos gustos.

A Paula, mi novia, que en el último año ha sido de gran apoyo, en épocas de decaída ha estado ahí y también por ayudarme a visualizar mejor y planear lo que quiero

A mi hermana Silvia también su apoyo y ayudar con algunos conocimientos los cuales fueron de utilidad en este trabajo.

A todos ellos todo mi amor y agradecimiento.

A mis amigos y compañeros que apoyaron, a los que los tengo en aprecio también va dedicado esto.

Juan Camilo Toloza Esparza

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al profesor Alberto Pertuz por su tiempo y sus aclaraciones en medio del proyecto agradecerle por la caridad y sabiduría que nos brindó.

Al estudiante de maestría Duwin Arley García Carrero por su colaboración y tiempo en los ensayos de dureza y en solucionarnos algunas dudas.

Al trabajador del laboratorio de metalistería el señor Don Fredy quien nos ayudó con la utilización del horno y con cualquier cosa que necesitáramos.

A los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por el préstamo de la máquina de microdureza UMT TRIBOLAB para poder realizar las pruebas de microdureza.

A los laboratorios de la universidad industrial de Santander del parque de investigación de Guatiguara, para los ensayos de difracción de rayos x, y de microscopia electrónica de barrido.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 ACERO	17
2.2 COMPORTAMIENTO DEL ACERO A ALTAS TEMPERATURAS.....	18
2.3 CURVAS DE ENFRIAMIENTO	22
2.4 TRATAMIENTOS TERMICOS	24
2.4.1 Normalizado.....	24
2.4.2 Recocido	25
2.4.3 Temple	25
2.5 TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS	25
2.5.1 Carburizado o Cementación	26
2.5.2 Nitruración.....	26
2.5.3 Boronizado.....	26
2.6 BORONIZADO EN ACEROS.....	27
2.6.1 Difusión en aceros	27
2.6.2 Aceros borados.....	29
2.6.3 Boronizado por empaquetamiento	33
2.7 CARACTERIZACIÓN DE ACEROS.....	34
2.7.1 Dureza superficial	35
2.7.2 Cristalografía de rayos x (DRX)	37
2.7.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)	37
3. PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO.....	38
3.1 ASPECTOS DEL ACERO.....	38
3.2 PAQUETES BORONIZANTES	39

3.4 INDENTACIONES	42
4. RESULTADOS.....	44
4.1 ENSAYO DE MICRODUREZA	44
4.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	57
4.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	64
5. CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades químicas del acero AISI 1045	18
Cuadro 2. Propiedades físicas del acero AISI 1045.....	18
Cuadro 3. Propiedades mecánicas del acero AISI 1045.....	18
Cuadro 4. Microdureza y diferentes puntos de fusión para diferentes fases formadas durante el proceso de boronizado.....	29
Cuadro 5. Medidas de microdureza de aceros boronizados en comparación con otros tratamientos y materiales duros	32
Cuadro 6. Concentraciones en los paquetes boronizantes.....	39
Cuadro 7. Dureza en GPa para el paquete PB1 con 4 horas de boronizado.....	45
Cuadro 8. Dureza en Vickers para el paquete PB1 con 4 horas de boronizado	46
Cuadro 9. Dureza en GPa para el paquete PB2 con 4 horas de boronizado.....	47
Cuadro 10. Dureza en Vickers para el paquete PB2 con 4 horas de boronizado ..	48
Cuadro 11. Dureza en GPa para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado.....	49
Cuadro 12. Dureza en Vickers para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado ..	49
Cuadro 13. Dureza en GPa para el paquete PB4 con 4 horas de boronizado.....	50
Cuadro 14. Dureza en Vickers para el paquete PB4 con 4 horas de boronizado ..	51
Cuadro 15. Dureza en GPa para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado.....	53
Cuadro 16. Dureza en Vickers para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado ..	54
Cuadro 17. Dureza Vickers para los paquetes de boronizado con carburo de boro y carburo de silicio a 850°C por 4 horas	57
Cuadro 18. Dureza Vickers para los paquetes de boronizado con carburo de boro y carburo de silicio a 950°C por 4 horas	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama Hierro-Carbono.....	19
Figura 2. Diagrama Hierro - Carbono para concentraciones de Carbono menores al 2%.....	21
Figura 3. Diagrama TTT para aceros.....	22
Figura 5. Efecto de la temperatura y tiempo en el espesor de la capa difundida usando B ₄ C.....	31
Figura 6. Proceso de calentamiento en el horno.....	40
Figura 7. Comparación de dureza para el paquete PB1 con 4 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos.....	47
Figura 8. Comparación de dureza para el paquete PB2 con 4 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos.....	48
Figura 9. Comparación de dureza para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos.....	50
Figura 10. Comparación de dureza para el paquete PB4 con 4 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos.....	52
Figura 11. Comparación durezas en HV para diferentes paquetes de boronizado	53
Figura 12. Comparación de dureza para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos.....	54
Figura 13. Comparación de dureza para el paquete PB3 con 4 y 6 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos	55
Figura 14. Comparación durezas en HV para boronizado a 4 y 6 horas	56
Figura 15. Espectro DRX para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado	65
Figura 16. Espectro DRX para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado	66

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema del Proceso de Formación de las capas Fe ₂ B y FeB.....	30
Ilustración 2. Empaquetamiento de la matriz de acero	34
Ilustración 3. Indentador Vickers.....	35
Ilustración 4. Pulido de las probetas	39
Ilustración 5. Preparación de las probetas en los crisoles	40
Ilustración 6. Horno para calentamiento en el proceso de boronizado	41
Ilustración 7. Montaje en el UMT TriboLab	42
Fotomicrografía 8. Indentaciones realizadas para los diferentes paquetes boronizados	44
Fotomicrografía 9. MEB para la probeta con el paquete PB3 con 4 horas de boronizado	58
Fotomicrografía 10. Medición de la profundidad de la capa borada para la probeta con el paquete PB3 con 4 horas de tratamiento mediante el software ImageJ	59
Fotomicrografía 11. Medidas tomadas de la capa borada para la probeta con el paquete PB3 con 4 horas de tratamiento mediante el software ImageJ	60
Fotomicrografía 12. MEB para la probeta con el paquete PB3 con 6 horas de boronizado	61
Fotomicrografía 13. Medidas tomadas de la capa borada para la probeta con el paquete PB3 con 6 horas de tratamiento mediante el software ImageJ	62
Fotomicrografía 14. Medidas tomadas de la capa borada para la probeta con el paquete PB3 con 6 horas de tratamiento mediante el software ImageJ	63
Fotomicrografía 15. DRX para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado	64
Fotomicrografía 16. DRX para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado	65

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. FICHA TÉCNICA ACERO AISI 1045	71
ANEXO B. NORMA ASTM E 384 – 17	72

GLOSARIO

FASES CRISTALINAS: una fase es un sólido cristalino con una disposición tridimensional regular de los átomos

HB: dureza brinell

HV: dureza vickers

INDENTACIÓN: Tipo de ensayo que se somete un material, en este caso la probeta

OLIGOELEMENTOS: Elemento químico que se halla en muy pequeñas cantidades en los materiales.

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIAR BORONIZADO SOBRE ACERO AISI 1045 EMPLEANDO DIFERENTES COMBINACIONES SÓLIDAS BORURIZANTES *

AUTOR: YEFFERSON ERLEY CARRILLO MONAR Y JUAN CAMILO TOLOZA ESPARZA**

PALABRAS CLAVE: MICRODUREZA, DRX, SEM-MEB, BORONIZADO SÓLIDO.

DESCRIPCIÓN

En este estudio se realizó el tratamiento termoquímico de boronizado, el cual fue hecho en un horno eléctrico a una temperatura de 950°C, algunas a 850°C y por un tiempo de 4 horas. El experimento se hizo sobre probetas de acero AISI 1045, éste es un acero de bajo carbono con una dureza nominal entre 180 y 200 HV. Durante el proyecto se lograron durezas superiores a 1000 HV con una mejoría del 500% a 800%, usando materiales de bajo costo como lo son el bórax y el carburo de silicio, también poco convencionales como óxido de boro y carburo de boro estos resultados fueron obtenidos mediante UMT Tribolab sometiendo el acero a ensayos de indentación usando como referencia la norma ASTM- E384. Las pruebas de microdureza fueron realizadas en alrededor de 28 probetas las cuales fueron tratadas con diferentes paquetes boronizantes. Por cada paquete boronizante se crearon 3 probetas para determinar cómo influye el tratamiento térmico usado al terminar el tiempo de borado, sometiéndolas a temple, normalizado y recocido. Una vez obtenidos los resultados de las indentaciones se hallaron durezas de entre 200 y 2000 HV, donde los mejores resultados fueron para el paquete boronizante con carburo de silicio y bórax a 6 horas el cual tuvo rangos de dureza de entre 1500 a 2000 HV.

Para complementar el estudio se realizaron también boronizados de 5 y 6 horas para determinar cómo influía el tiempo en el espesor de las capas formadas en el sustrato, estos fueron observados mediante microscopía de barrido (SEM) realizando un corte transversal en las muestras. Concluyendo con la difracción de rayos x (DRX) y corroborar así formación de estructuras de FeB y Fe₂B.

* Trabajo de grado

** Facultad De Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director. Alberto David Pertuz Comas Ingeniero Mecánico, PhD.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE BORONIZING EFFECT OF DIFFERENT COMBINATIONS OF SOLID BORIDING AGENTS ON AISI 1045 STEEL *

AUTHOR: YEFFERSON ERLEY CARRILLO MONAR AND JUAN CAMILO TOLOZA ESPARZA**

KEY WORDS: MICROHARDNESS, XRD, SEM-SEM, SOLID BORONIZED.

DESCRIPTION

In this study, we performed a thermochemical treatment of boronized, using an electrical oven set at a temperature of 950°C and for a total of 4 and 7 hours respectively. The experiment was done on AISI 1045 steel which is low-carbon steel with a nominal hardness between 180 and 200 HV. During the project, hardnesses higher than 1000 HV were achieved, using low-cost materials such as borax and silicon carbide.

These results were obtained by UMT TriboLab, the steel was subjected to non-destructive microhardness tests using the ASTM-E384 standard as a reference. Microhardness tests were performed on about 28 specimens that were treated with boronizing packages. For each boronizing package, three burettes were created to subject each one to different forms of cooling at the end of the time in the oven, subjecting them to quenching, normalizing, and annealing. A cross-section was made in the samples for analysis by scanning electron microscopy (SEM) to determine how time influenced the thickness of the layers formed on the substrate. X-ray diffraction (XRD) was also implemented to corroborate the formation of FeB and Fe₂B structures.

* Degree work.

** Faculty of Physical-mechanics Engineering, School of Mechanical Engineering. Advisor: Dr. David Alberto Pertuz Comas, Mechanical Engineer, PhD.

INTRODUCCIÓN

A medida que ha pasado el tiempo el uso del acero ha venido en incremento ya sea en estructuras, tuberías, elementos de máquina, etc. Es de vital importancia que este sea más resistente, esto nos lleva a buscar una mejora constante de los aceros, ya sea con aditivos o diferentes tratamientos térmicos o termoquímicos, que conlleven un aumento en las diferentes propiedades tales como fluencia, dureza, entre otras.

Tenemos como ejemplo diferentes fenómenos que se presentan en elementos que son manufacturados en base acero. Empecemos con las tuberías sometidas al paso constante de fluidos las cuales se ven afectadas por la erosión. Al elevar la dureza superficial de estas, el desgaste presentado es menor.

El mismo caso se presenta en elementos de máquina que al estar sometidas a diferentes cargas dinámicas y en contacto con otras piezas o suelos (como se observa en la maquinaria de gran tamaño como lo es la agrícola, la industrial, entre otras) el aumento de la dureza superficial ayuda a elevar su durabilidad ya que sufren menos en la capa externa (debido al aumento de dureza superficial) y conservan sus propiedades internas.

Por esto se plantea realizar un estudio de los efectos del tratamiento termoquímico de boronizado sólido con dos diferentes paquetes de boronizantes (carburo de silicio con carburo de boro y carburo de silicio con óxido de boro) sobre un acero AISI 1045 (acero bastante usado en la industria Colombiana), con el fin de analizar las variaciones de algunas propiedades tales como dureza superficial, morfología y fases cristalinas, además con esto solo se modificara la capa exterior con un espesor de entre 20 y 50 micras de grosor.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la variación de las características mecánicas y morfológicas en el acero AISI 1045 al ser tratado termoquímicamente con diferentes formulaciones de boronizado sólido.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar el tratamiento de boronizado sólido con la formula carburo de silicio y oxido de boro en ocho (8) probetas variando la temperatura de tratamiento y las concentraciones de los componentes de la aleación

Aplicar el tratamiento de boronizado sólido con la formula carburo de silicio y carburo de boro en ocho (8) probetas variando la temperatura de tratamiento y las concentraciones de los componentes de la aleación.

Caracterizar las propiedades de dureza superficial en las probetas del acero AISI 1045 antes y después del boronizado solido mediante un ensayo de microdureza usando UMT TriboLab bajo la norma ASTM-E384-17.

Determinar las fases cristalinas y/o compuestos que se encuentren en la estructura cristalográfica después del tratamiento de boronizado mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX).

Analizar la morfología de las difusiones obtenidas para cada una de las formulaciones de boronizado mediante microscopia electrónica de barrido (MEB).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ACERO

El acero es una aleación entre el elemento metálico hierro y el carbono el cual es un no metal. La adición de diferentes elementos en el hierro permite que este se vea afectado en una mejora de sus propiedades físico-químicas.

Hay diferentes tipos de acero que van de acuerdo a los elementos de la aleación. Cada uno de estos tipos tiene diferentes usos y aplicaciones, haciendo el acero una aleación muy versátil. La presencia o ausencia de diferentes elementos en el acero logran diferentes resultados tales como:

- Mayor resistencia y dureza
- Mayor resistencia al impacto
- Mayor resistencia al desgaste
- Mayor resistencia a altas temperaturas
- Mayor resistencia a la corrosión

El acero se encuentra presente prácticamente en todos los elementos o utensilios que se usan a diario esto debido a sus propiedades mecánicas, facilidades para mecanizar y conformar, alta disponibilidad y bajo costo de producción con respecto a otros metales como el aluminio. Dentro de estas aleaciones encontramos el acero AISI 1045 el cual es un acero de medio carbono, de bajo costo y altamente utilizado en elementos de máquina.

Cuadro 1. Propiedades químicas del acero AISI 1045

Elemento	Composición %
C	0,43 - 0,50
Mn	0,60 - 0,90
Si	0,20 - 0,40
P	0,04 Max
S	0,05 Max

Fuente: Ficha Técnica Aceros Grado Ingeniería proporcionado por la Cía. General de Aceros

Cuadro 2. Propiedades físicas del acero AISI 1045

Densidad	Calor Específico	Conductividad térmica
7,85 [gr/cm ³]	460 [J/Kg.°K]	52 [W/m.°C]

Fuente: Ficha Técnica Aceros Grado Ingeniería proporcionado por la Cía. General de Aceros

Cuadro 3. Propiedades mecánicas del acero AISI 1045

Resistencia a la tracción	Dureza Brinell HB	Alargamiento antes de rotura	Módulo de elasticidad
60 [Kg/mm ²]	180	16%	200 [Gpa]

Fuente: Ficha Técnica Aceros Grado Ingeniería proporcionado por la Cía. General de Aceros

Se presentan las diferentes propiedades del acero AISI 1045 ya que este será el utilizado en los experimentos y estos servirán como referencia para algunas de las pruebas que se realizarán más adelante, además se mostrara en los anexos la ficha técnica suministrada por la Cía. General de Aceros pues fue la empresa en la que se adquirió el acero.

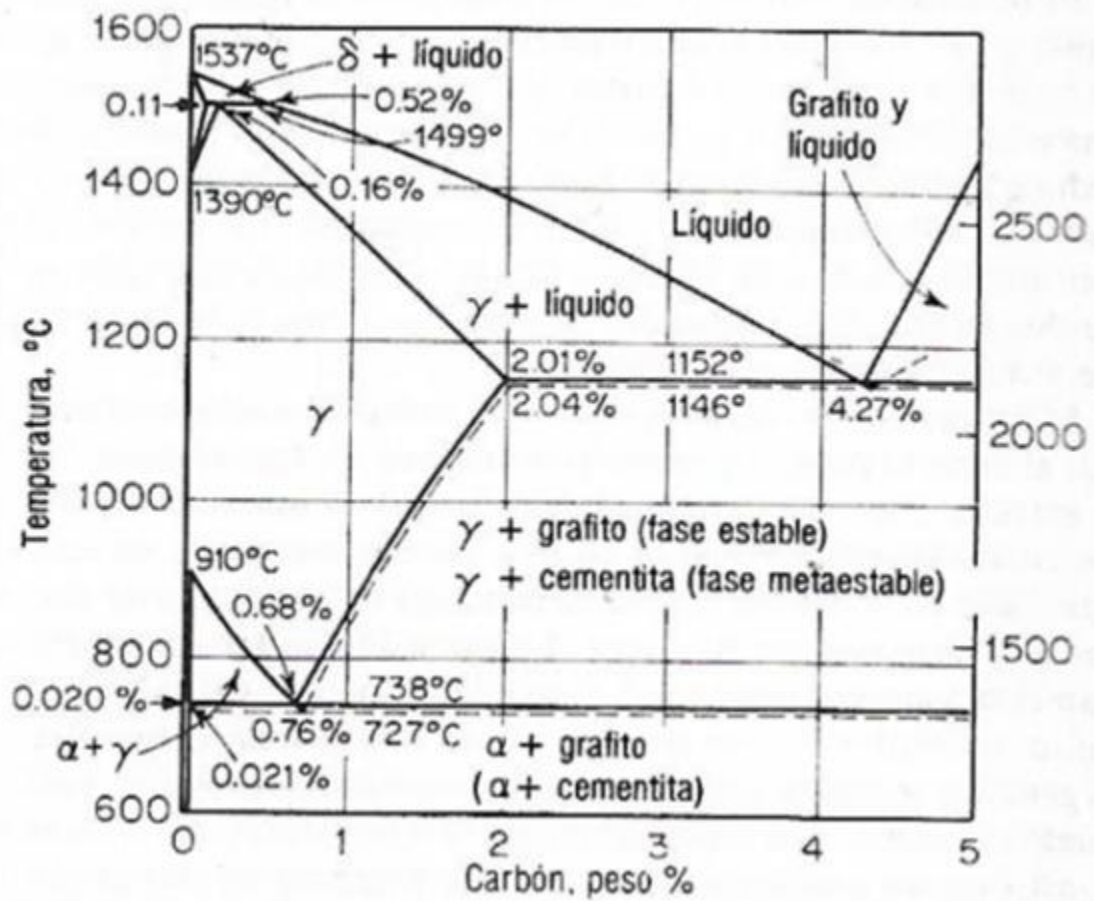
2.2 COMPORTAMIENTO DEL ACERO A ALTAS TEMPERATURAS

En los procesos de calentamiento en aceros se debe tener en cuenta la temperatura, ya que este reacciona de diferentes formas dependiendo de esta. Para esto se tienen diferentes diagramas los cuales comparan la temperatura con el

porcentaje de carbono para determinar la fase en la que se encuentra la aleación, a este se le llama el diagrama de fases hierro-carbono

El diagrama de fases de hierro-carbono se usa ampliamente para comprender las diferentes fases del acero y el hierro fundido. Tanto el acero como el hierro fundido son una mezcla de hierro y carbono. Además, ambas aleaciones contienen una pequeña cantidad de oligoelementos.

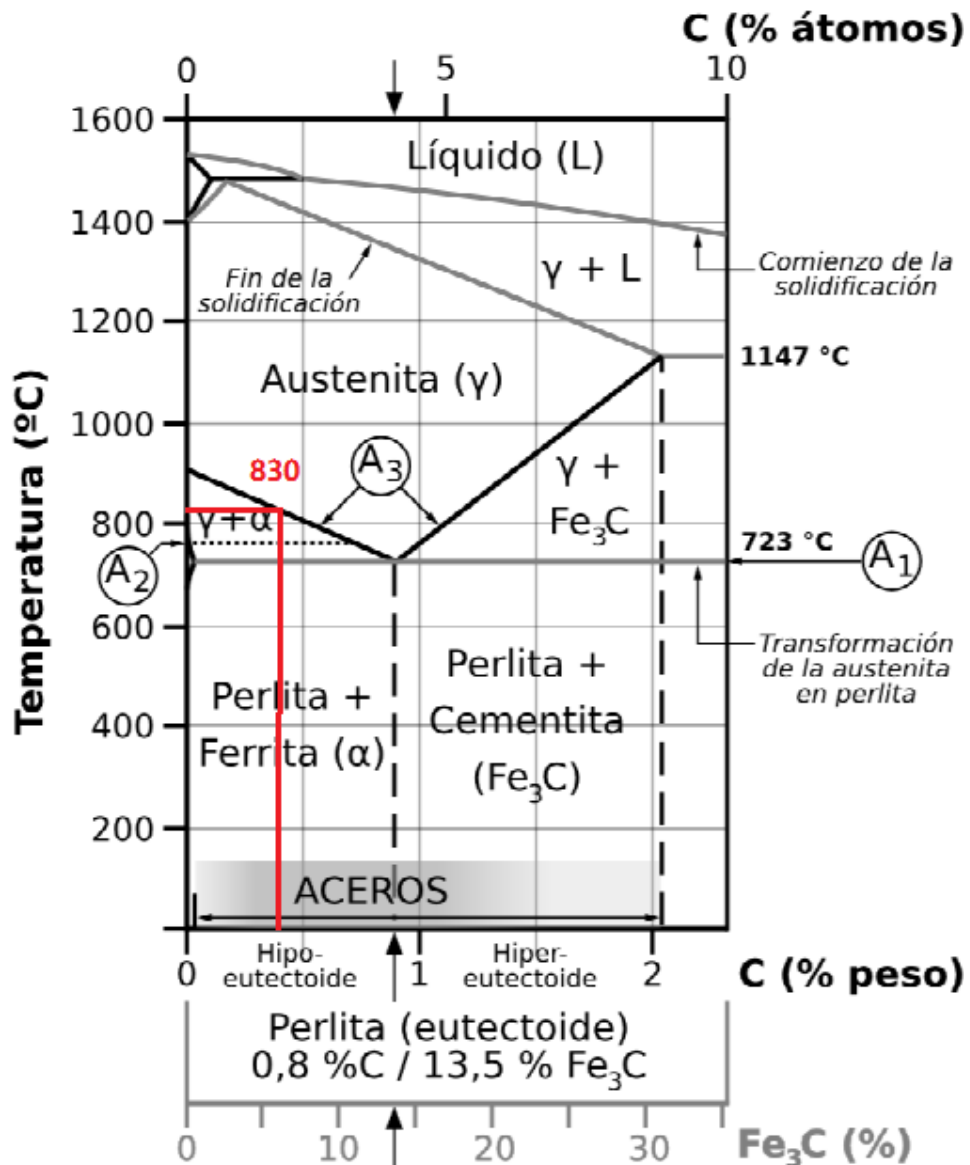
Figura 1. Diagrama Hierro-Carbono



Fuente: Eugene A. Avallone, Theodore Baumeister. Manual del ingeniero mecánico 9 ed. (fig 6.2.4) McGraw-Hill

Este diagrama de fase de hierro y carbono se representa con las concentraciones de carbono en peso en el eje X y la escala de temperatura en el eje Y. La porción útil del diagrama de Hierro – Carbono es la mostrada en la Figura 1. Las aleaciones de Hierro – Carbono están divididas normalmente en tres categorías, el hierro donde el contenido de carbono es muy bajo y no tiene efecto en las propiedades, los aceros donde el contenido de carbono usualmente varía entre el 0.1 y el 1.5% (aunque su máximo es el 2%) y los hierros fundidos donde el carbono es tanto que puede causar que exista liquido de fase eutectoide, además su contenido mínimo de carbono es del 2% y el contenido máximo practico es de 4%.

Figura 2. Diagrama Hierro - Carbono para concentraciones de Carbono menores al 2%



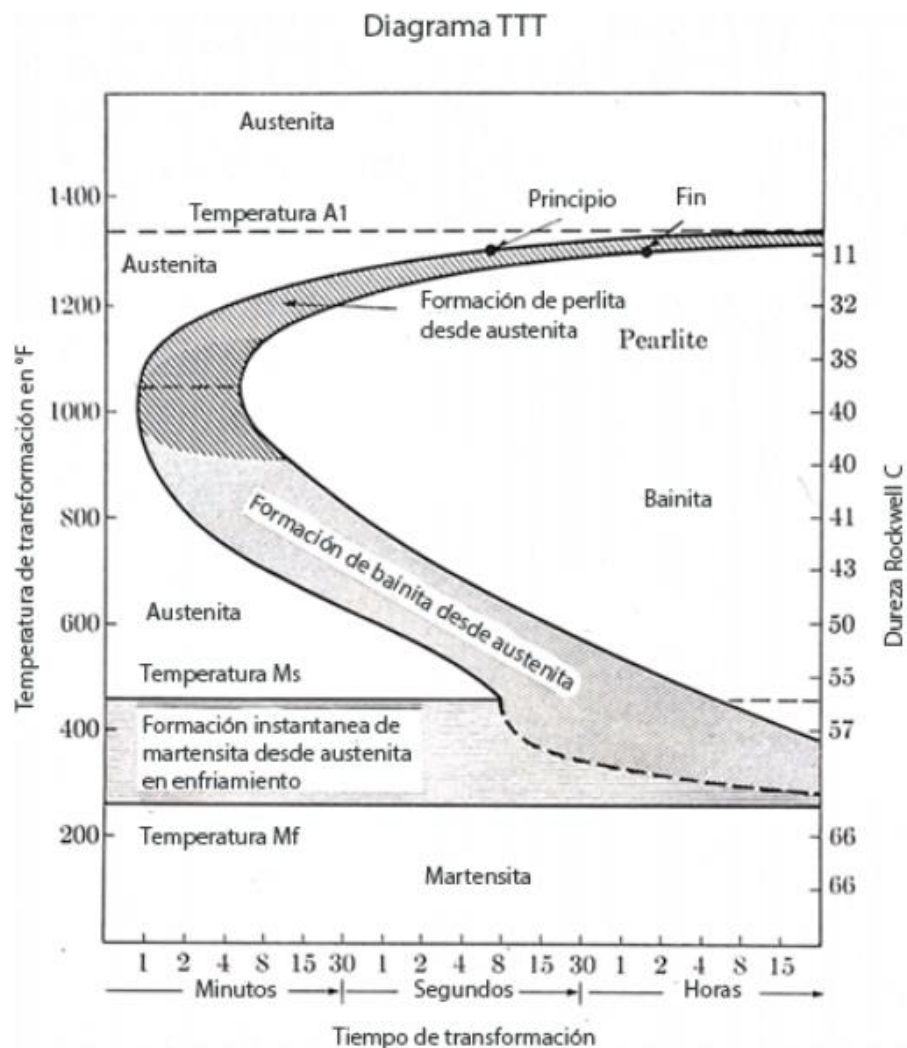
Fuente: Donald R. Askeland y Wendelin J. Wright. Ciencia e Ingeniería de los Materiales 5ed. CENGAGE Learning.

En la figura se tiene solo la porción que representativa de los aceros. Para el acero a temperatura ambiente no es posible solubilizar el carbono o algunos otros elementos, pero si este es calentado a cierta temperatura, cambia a una estructura cristalina que es capaz de solubilizar el carbono u otros elementos, en este caso el

boro. La estructura metalográfica formada se llama Austenita (γ) y a la temperatura a la cual se logra formar se le llama temperatura de Austenización la cual empieza a los 723°C y varía dependiendo de los porcentajes de carbono que se tengan presentes en el acero.

2.3 CURVAS DE ENFRIAMIENTO

Figura 3. Diagrama TTT para aceros



Fuente: Albert G. Guy. Elements of physical metalurgy. 2ed. Addison-Wesley publishing company, inc.

El diagrama de transformación de tiempo-temperatura (TTT) también denominado diagrama isotérmico de curva C (descomposición de austenita) y curva de Bain muestra el efecto del tiempo-temperatura sobre los cambios de microestructura del acero. Estos diagramas se utilizan ampliamente en la evaluación de la descomposición de austenita en aceros tratables térmicamente. Se ha visto que el diagrama de fase hierro-carbono no muestra el tiempo como variable y, por lo tanto, no se revelan los efectos de las diferentes velocidades de enfriamiento en las estructuras de los aceros, además, las condiciones de equilibrio no se mantienen en el tratamiento térmico. Aunque el diagrama de equilibrio hierro-carbono revela las fases y las microestructuras correspondientes en condiciones de equilibrio, se pueden obtener varias propiedades útiles de los aceros en condiciones de no equilibrio.

También se debe tener en cuenta que las velocidades que se producen durante el enfriamiento rápido brindan una mejor transformación de austenita en perlita y martensita. Para cada composición de acero se obtiene un diagrama diferente.

La austenita es estable por encima de la temperatura eutectoide de 727 ° C. Cuando el acero se enfría a una temperatura por debajo de esta temperatura eutectoide, la austenita se transforma en su producto de transformación. El diagrama TTT relaciona la transformación de la austenita con las condiciones de tiempo y temperatura. Por tanto, el diagrama TTT indica los productos de transformación según la temperatura y también el tiempo necesario para completar la transformación.

Además de los diagramas TTT se encuentran los diagramas CCT (Continuous Cooling Transformation) según Garitano¹ son una manera visual de representar los efectos que tienen las distintas estrategias utilizadas en los procesos industriales,

¹ C. Garitano Olaizola, *Caracterización de diagramas CCT para aceros microaleados con Nb*, San Sebastian, 2020.

tales como la laminación. Las curvas CCT permiten analizar cómo se comporta el material cuando es sometido a procesos de enfriamiento continuos. Se realizan ensayos de dilatometría para la caracterización de estos diagramas. Tras llevar el metal a la austenización se realizan enfriamientos a velocidades distintas y se observa las microestructuras finales formadas. Se determinan las fases formadas y así se constituyen los diagramas. Cabe resaltar que los diagramas CCT varían dependiendo de cada acero.

2.4 TRATAMIENTOS TERMICOS

Los tratamientos térmicos son llevados a cabo realizando calentamientos y enfriamientos controlados de los metales a diferentes velocidades mostrados en la Figura 3 para alterar sus propiedades mecánicas sin cambiar la forma del producto. A veces se realiza un tratamiento térmico inadvertidamente debido a procesos de fabricación que calientan o enfrían el metal, como la soldadura o formando. Los tratamientos térmicos a menudo se asocian con el aumento de la resistencia del material, pero puede también se puede utilizar para alterar ciertos aspectos de fabricación, como mejorar el mecanizado, mejorar conformabilidad, restaurar la ductilidad después de una operación de trabajo en frío. A continuación, se explicarán tres de los tratamientos térmicos más comunes.

2.4.1 Normalizado. El normalizado es un proceso de tratamiento térmico que se utiliza para hacer que un metal sea más dúctil y resistente después de haber sido sometido a procesos de endurecimiento térmico o mecánico. La normalización implica calentar un material a una temperatura elevada y luego dejar que se enfríe a temperatura ambiente exponiéndolo al aire a temperatura ambiente después de calentarlo. Este calentamiento y enfriamiento lento altera la microestructura del metal, lo que a su vez reduce su dureza y aumenta su ductilidad.

2.4.2 Recocido. El recocido es un proceso de tratamiento térmico que se utiliza principalmente para aumentar la ductilidad y reducir la dureza de un material. Este cambio de dureza y ductilidad es el resultado de la reducción de dislocaciones en la estructura cristalina del material que se está recociendo. El recocido se realiza a menudo después de que un material ha pasado por un proceso de endurecimiento o trabajo en frío para evitar que se rompa por fragilidad o para que sea más moldeable para operaciones posteriores. Este enfriamiento se lleva a cabo dentro del horno, lo que lo hace un proceso más lento que el normalizado.

2.4.3 Temple. El temple es un tipo de proceso de tratamiento térmico de metales. El temple implica el enfriamiento rápido de un metal para ajustar las propiedades mecánicas de su estado original. Para realizar el proceso de enfriamiento, un metal se calienta a una temperatura austenítica. El metal se puede mantener a esta temperatura durante un tiempo determinado para que el calor se distribuya por todo el material. Una vez que el metal se ha mantenido a la temperatura deseada, se enfría a gran velocidad, comúnmente se realiza este enfriamiento rápido en salmuera o aceites.

2.5 TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

Los tratamientos termoquímicos consisten en operaciones de calentamiento y enfriamiento de los metales, donde se aportan otros elementos a la superficie de las piezas. Como los tratamientos térmicos mejora las propiedades mecánicas de las piezas, pero los termoquímicos se pueden hacer de forma localizada y además cambian la estructura atómica del sustrato. A continuación, se explica brevemente las más comunes.

2.5.1 Carburizado o Cementación. Como explica Czerwinski² el objetivo de la carburación es enriquecer las capas superficiales de acero u otras aleaciones con carbono. Para lograr la suficiente solubilidad del carbono y profundidad de penetración, se lleva a cabo el tratamiento a temperaturas relativamente altas de 900-950 ° C. Como resultado, los aceros, que no tienen el suficiente contenido de carbono dentro de su volumen obtienen el un endurecimiento superficial

2.5.2 Nitruración. Czerwinski³ también menciona que la nitruración se basa en la incorporación de nitrógeno en la superficie del acero mientras este está en estado ferrítico. En aplicaciones comerciales, la zona modificada suele tener un grosor de hasta 200-300 µm, y rara vez supera los 600 µm. Esto genera impacto en la dureza superficial, aumento en dureza, resistencia al desgaste, mejor resistencia a la corrosión y vida a la fatiga.

2.5.3 Boronizado. Como explica Campos-Silva⁴, el término boronizado significa el enriquecimiento de la capa superficial de un material con boro, el cual se lleva a cabo mediante un tratamiento termoquímico. Los átomos de boro se transfieren a las celdas atómicas del substrato debido a la energía de activación proporcionada por el calor. Poco a poco los átomos van formando una región de difusión de boro en el material base.

² F. Czerwinski, «Thermochemical Treatment of Metals,» de *Heat Treatment - Conventional and Novel Applications*, Rijeka, inTech, 2012, pp. 247-286.

³ F. Czerwinski, «Thermochemical Treatment of Metals,» de *Heat Treatment - Conventional and Novel Applications*, Rijeka, inTech, 2012, pp. 247-286.

⁴ I. E. Campos Silva y G. A. Rodríguez Castro, *Boriding To improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. Thermochemical surface engineering of steels*, Woodhead publishing, 2015.

2.6 BORONIZADO EN ACEROS

Sólo el boronizado⁵ sólido (o empaquetado) ha alcanzado un éxito comercial, debido a problemas ambientales, el boronizado gaseoso y líquido tiene una aplicación muy limitada. El boronizado en paquete es el método más común con un amplio desarrollo. El proceso implica envasar las piezas de acero en una mezcla de polvos de boro o ferroboro, boro amorfo o B_4C , fundentes y activadores ($NaBF_4$, KBF_4 , $Na_2B_4O_7$) y calentarlos en un horno de 800 a 1050 ° C entre una y doce horas, esto dependiendo del espesor de capa requerido. Las profundidades de capa borada comúnmente producidas son 0.05 a 0.25 mm para aceros al carbono y aceros de baja aleación y 0.025 a 0.080 mm para aceros de alta aleación.

2.6.1 Difusión en aceros. La difusión en los metales⁶ es un proceso mediante el cual los átomos de un elemento aleante se introducen o difunden en la estructura de un metal. Este proceso puede ocurrir en forma natural o provocada. La finalidad de la difusión provocada es mejorar las propiedades de los metales mediante la adición de elementos de aleación.

La difusión puede provocar una re-cristalización física (formando nuevas fases), en cuyo caso se denomina difusión reactiva o de reacción. Este tipo de difusión ocurre al saturar el acero con nitrógeno, cromo, silicio, carbono, etc. La difusión se puede llevar a cabo en medio sólido, líquido o gaseoso. En cualquiera de los casos se expone el metal a una atmósfera con alta concentración del elemento aleante, en un sitio con temperatura controlada (generalmente un horno). La difusión produce un aumento en la concentración del elemento aleante en el metal que va a depender del tiempo de exposición, de la temperatura y de la profundidad. La mayor concentración del elemento aleante en la estructura del metal se produce en la superficie.

⁵ D. Krastev , Corrosion Resistance, Rijeka: InTech, 2012.

⁶ A. G. Guy, Elements of physical metallurgy, Florida: Addison-Wesley publishing company, 1967.

Para que esas reacciones evolucionen de un estado inicial a otro final, los átomos involucrados deben tener suficiente energía para superar una cierta barrera. Esta energía adicional requerida por encima de la media, se denomina energía de activación ΔE^* , y normalmente se calcula en Jules por mol o calorías por mol.

Los átomos pueden moverse en las redes cristalinas desde una posición a otra si hay suficiente energía de activación proporcionada por la vibración térmica de los átomos, y si hay vacancias u otros defectos cristalinos en la estructura para que ellos los ocupen. Las vacancias en metales y aleaciones son defectos en equilibrio, y como se dice más arriba, siempre existe una cierta cantidad, lo que facilita la difusión sustitucional de los átomos. A medida que aumenta la temperatura del metal, se producen más vacancias y habrá más energía térmica disponible, por tanto, la velocidad de difusión es mayor a temperaturas elevadas.

El cálculo del coeficiente de difusión es dependiente del tiempo que dure el tratamiento y de la profundidad a la que llegue la capa difundida, esta constante está dada por la ecuación:

$$\text{Profundidad de la capa borada} = k\sqrt{\text{tiempo}} \quad (1)$$

Donde

k es la constante de difusividad térmica. Vemos en la revista *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*⁷ en términos de temperatura, la constante de difusividad aumenta exponencialmente en función de la temperatura absoluta. Los gradientes de concentración dependen de la cinética de la superficie y de las reacciones de un proceso particular.

⁷ M. Ortiz-Domínguez, A. Cruz-Avilés, M. Irving-Gonzales, J. Farfán-García, J. Hernández-Pérez y J. Cruz-Bustamante, «Tratamientos termoquímicos,» *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 7, nº 14, p. 17, 2020.

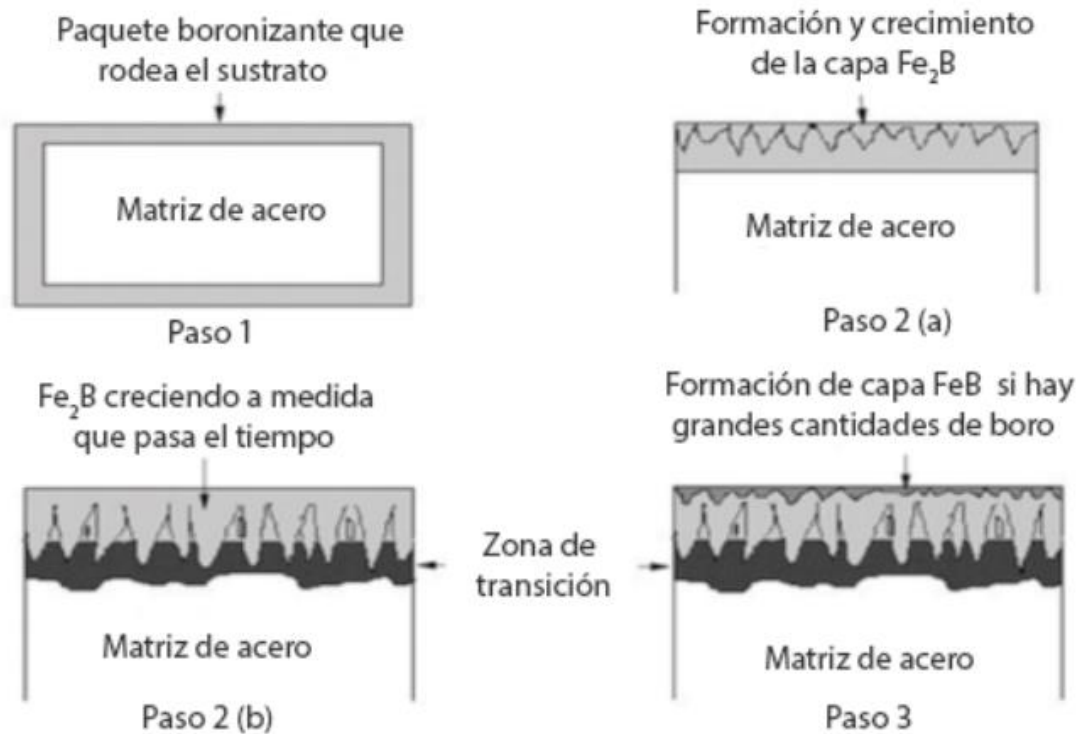
2.6.2 Aceros borados. Durante el boronizado la difusión y posterior absorción de la superficie del sustrato da resultado a diferentes capas boradas. La morfología, crecimiento y formación de estas capas son influenciadas por los elementos del material base y sus propiedades mecánicas dependen de la estructura que se forme. La Cuadro 4 muestra la variación de la dureza y el punto de fusión dependiendo de las fases que se forman en los procesos de boronizado con diferentes sustratos. Cabe resaltar que la dureza de las capas boradas puede rondar entre los valores de 1450 hasta 5000 HV

Cuadro 4. Microdureza y diferentes puntos de fusión para diferentes fases formadas durante el proceso de boronizado

Substrato	Contenido de la fase en la capa borada	Microdureza de la capa, HV o kg/mm ²	Punto de fusión	
			°C	°F
Fe	FeB	1900-2100	1390	2535
	Fe ₂ B	1800-2000	1390	2535

Fuente: ASM handbook-heat treatment-Vol4, pág. 979

Ilustración 1. Esquema del Proceso de Formación de las capas Fe_2B y FeB



Fuente: A. A. Joshi and S. S. Hosmani, "Pack-Boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing Mechanism and the Role of Container Design," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 29, no. 9, pág. 1062

En la ilustración anterior se muestra cómo es la formación de las diferentes capas en la superficie del acero a medida que pasa el tiempo y el proceso de difusión hace que se ocupen más intersticios aumentando los espesores de capa.

Según Joshi-Hosmani⁸ la difusión empieza perpendicular a la superficie y su velocidad de crecimiento del sustrato la cual depende de la constante k de la Ec. (1). La formación de la capa FeB se espera cuando hay concentraciones de boro muy grandes. Además, en aceros ricos en carbono, silicio y aluminio se forma una zona de transición ya que los mencionados anteriormente no son solubles en las

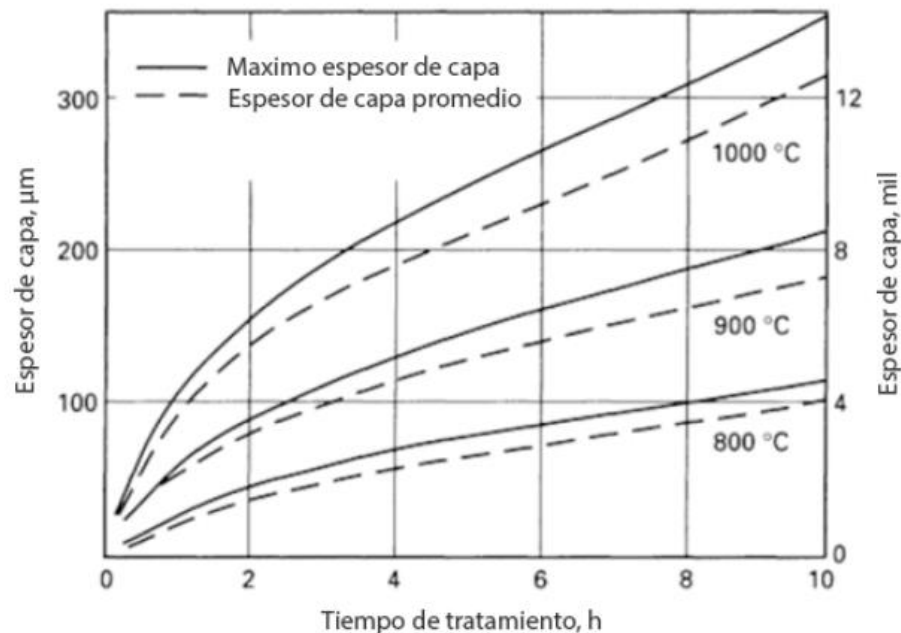
⁸ A. A. Joshi y S. S. Hosmani, «Pack-Boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing Mechanism and the Role of Container Design,» *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 29, nº 9, p. 1062, 2014.

capas boradas, estos se ven desplazados por la capa Fe_2B hacia la matriz de acero, formándose compuestos como $FeSi_{0.4}B_{0.6}$, Fe_5SiB_2 y Fe_3 .

La fase FeB si se forma es muy frágil y se produce en la superficie de una manera bastante tensionada por el contrario la capa Fe_2B es la fase predilecta por ser menos frágil y formar tensiones d compresión en la pieza.

La dureza de la superficie boronizada se puede retener incluso a altas temperaturas, lo que, de lo contrario, es difícil en otros tratamientos superficiales, como la trituration. La boronización es uno de los métodos populares para mejorar la resistencia al desgaste de los componentes de acero, sin embargo, las propiedades tribológicas dependen de la microestructura de la capa de boruro. Las aleaciones ferrosas, como los aceros al carbono, los aceros de baja aleación, los aceros para herramientas, etc., responden muy bien al tratamiento de boronización.

Figura 4. Efecto de la temperatura y tiempo en el espesor de la capa difundida usando B_4C



Fuente: ASM handbook-heat treatment-Vol4, pág. 990.

Según Lindberg Heat Treating Company⁹ es habitual hacer coincidir la profundidad de la caja con la aplicación prevista y el material base. Como regla, capas delgadas (Por ejemplo, de 15 a 20 μm) se utilizan para la protección contra el desgaste adhesivo (como el moldeado sin viruta y los troqueles de estampación de metal y herramientas), mientras que se recomiendan capas gruesas para combatir el desgaste erosivo (por ejemplo, herramientas de extrusión para plásticos con rellenos abrasivos y herramientas de prensado para la industria cerámica).

Las profundidades de capa comúnmente producidas son de 0.05 a 0.25 mm para aceros de baja aleación y bajo contenido de carbono y de 0,025 a 0,076 mm para aceros de alta aleación., sin embargo, las profundidades de la capa mayores a 0.089 mm no son económicamente rentables para materiales altamente aleados como aceros inoxidables y algunos aceros para herramientas.

Ventajas de los aceros borados

Las capas boronizadas de los aceros presentan mayor dureza en comparación con aceros sometidos a otros tratamientos, esto se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 5. Medidas de microdureza de aceros boronizados en comparación con otros tratamientos y materiales duros

Material	Microdureza [HV]
Acero de mediana aleación boronizado	1600
Acero AISI H3 boronizado	1800
Acero AISI A2 boronizado	1900
Acero templado	900
Acero templado y revenido H13	540-600
Acero templado y revenido A2	630-700
Acero rápido BM42	900-910

⁹ Company Lindberg Heat Treating, *Boroalloy process, Process Data Sheet 4*, 2017.

Material	Microdureza [HV]
Aceros nitrurizados	650-1700
Aceros de baja aleación cementados	650-950

Fuente: ASM handbook-heat treatment-Vol4, pág. 980

La dureza de la capa de boruro se puede retener a temperaturas más altas que, por ejemplo, los casos de nitrurado y además puede mejorar considerablemente la resistencia a la corrosión y erosión de los materiales.

Las superficies bordadas tienen resistencia moderada a la oxidación (hasta 850°C) y son bastante resistentes a los metales fundidos y en piezas boronizadas incrementan su resistencia a la fatiga y su vida útil en medios oxidantes y corrosivos.

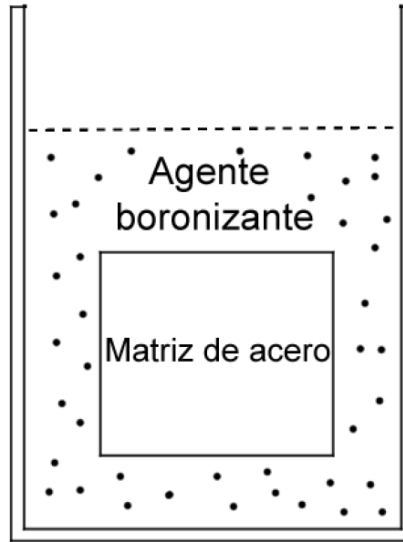
Recomendaciones en los procesos de boronizado

Se recomienda mantener el tiempo en horno por debajo de 12 horas ya que capas de espesores muy profundos pueden generar delaminaciones. Además, si se realizan tratamientos térmicos posteriores al boronizado es necesario hacerlo en cámaras con gases inertes para mantener la integridad de este.

2.6.3 Boronizado por empaquetamiento. La boronización por empaquetamiento¹⁰ proporciona ventajas sobre otras técnicas como equipos fáciles de manipulación, posibilidad de cambiar la composición de la mezcla de polvos boronizantes y bajo costo del proceso.

¹⁰ A. A. Joshi y S. S. Hosmani, «Pack-Boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing Mechanism and the Role of Container Design,» *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 29, nº 9, p. 1062, 2014.

Ilustración 2. Empaquetamiento de la matriz de acero



La boronización en paquete utiliza principalmente polvo o pasta de una mezcla boronizante que consiste en una sustancia productora de boro, activadores y diluyentes. Los componentes se envasan en el recipiente con la mezcla anterior y se calientan en el rango de temperatura de boronización durante un tiempo específico para formar boruros de hierro en la superficie de acero, seguido de enfriamiento en aire.

En el caso del método de empaquetado el contenedor se llena con los polvos de boro y se tapa la pieza en las superficies que se desee el tratamiento termoquímico.

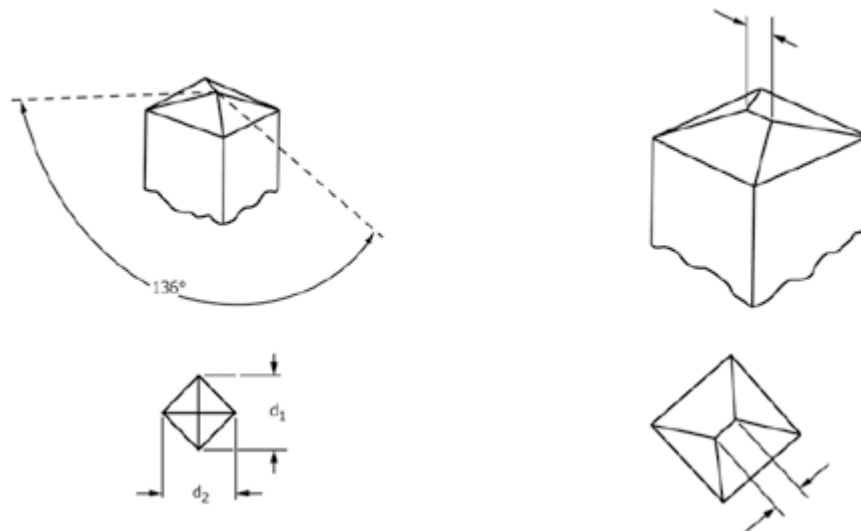
2.7 CARACTERIZACIÓN DE ACEROS

La caracterización de aceros se lleva a cabo dependiendo de las propiedades que se requieran, en este caso se realizaran mediciones de la dureza superficial de las capas boradas, análisis de cristalografía de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB o SEM).

2.7.1 Dureza superficial. La dureza según Smith¹¹ es la capacidad de un material para resistir la deformación, que se determina mediante una prueba estándar en la que se mide la resistencia de la superficie a la indentación. Las pruebas de dureza más comúnmente utilizadas se definen por la forma o el tipo de sangría, el tamaño y la cantidad de carga aplicada. Los números de dureza a los que se hace referencia constituyen una escala arbitraria no dimensionada, con números crecientes que representan superficies más duras.

Según Askeland-Wright¹² en el ensayo Vickers se usa un indentador con forma de pirámide recta y base cuadrada de diamante, con determinado ángulo entre las caras opuestas. La dureza se calcula midiendo las diagonales de la huella dejada por el indentador después de aplicar la carga.

Ilustración 3. Indentador Vickers



Fuente: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials Designation: E384 – 17

¹¹ P. Smith, The Fundamentals of Piping Design, Houston: Gulf Publishing Company, 2007.

¹² D. R. Askeland y W. Wendelin J, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Mexico D.F.: Cengage learning, 2017.

La norma ASTM E384-17¹³ especifica que para los ensayos de microdureza Vickers se una un máximo de carga de 15 [Kgf] con un tiempo de aplicación de carga de entre 10 y 15 [s]. El cálculo está dado por la siguiente ecuación:

$$HV = 0.00185443 * \frac{P_2}{d_2^2} \quad (2)$$

Donde:

HV = Dureza Vickers en GPa

P₂ = Fuerza aplicada en Newton

d₂ = distancia de la diagonal en mm

Además, la profundidad de la indentación se calcula mediante:

$$y = \frac{1}{7 * d_2} \quad (3)$$

y la ecuación de conversión de GPa a Vickers es:

$$\text{Dureza en Vickers} = 101.968 \times \text{Dureza en GPa} \quad (4)$$

Donde el 101.968 es el factor de conversión constante.

¹³ Tienda AENOR, «Materials, Standard Test Method for Microindentation Hardness of E384 – 17,» 2021.

2.7.2 Cristalografía de rayos x (DRX). La difracción de rayos x¹⁴ es un método usado para analizar las fases cristalinas del material usando un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina. La difracción de rayos X se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio.

2.7.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB). La microscopía de barrido de electrones (MEB) es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electrodensa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV.

El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La interacción del haz de electrones con la muestra produce diversas señales (electrones secundarios, electrones retrodispersados, emisión de rayos X, etc.), que son recogidas por distintos detectores; los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales tanto orgánicos como inorgánicos.

¹⁴ D. R. Askeland y W. Wendelin J, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, México D.F.: Cengage learning, 2017.

3. PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO

Se presentará a continuación como fue la realización de los diferentes aspectos referentes a preparación de probetas para la fase de caracterización.

3.1 ASPECTOS DEL ACERO

Se trabajó acero AISI 1045, que es un acero medio carbono, el cual tiene bajo contenido de aluminio como se muestra en la Cuadro 1. y en el Anexo 1 lo cual nos ayuda a determinar que se formara muy poco o no se formaran zonas de transición como las mostradas en la Ilustración 1.

Se inició con una lámina de acero AISI 1045 de 20 cm x 20 cm y un espesor de 8 mm, la cual fue dividida en menores piezas (con corte refrigerado con aceite) de aproximadamente de 10 mm x 10 mm. La superficie del material es rugosa y con un acabado brusco para el que se requiere en los procesos de difusión por esto se realiza el proceso de pulido con lijas de diferentes granos (120, 220, 400, 600, 1200, 2000, 5000). Para finalizar se desgasta con alúmina para eliminar las rayas que dejaron los procesos anteriores y finaliza cuando la probeta queda como un espejo.

Este acabado es necesario ya que se elimina la suciedad de la cara a tratar con boronizado ya que permitirá una mejor difusión y que se observe mejor en el microscopio las diagonales dejadas por el indentador.

Ilustración 4. Pulido de las probetas



a



b



c

3.2 PAQUETES BORONIZANTES

Se diseñaron diferentes modelos de paquetes boronizantes a usar con diferentes composiciones de polvos y porcentajes los cuales se presentarán a continuación:

Cuadro 6. Concentraciones en los paquetes boronizantes

Mezcla	Polvos usados	Porcentaje
PB1	Carburo de silicio (SiC)	50%
	Oxido de boro (B ₂ O ₃)	50%
PB2	Carburo de silicio (SiC)	50%
	Oxido de boro (B ₂ O ₃)	40%
	Sal común (NaCl)	10%
PB3	Carburo de silicio (SiC)	50%
	Borax	50%
PB4	Carburo de silicio (SiC)	40%
	Oxido de boro (B ₂ O ₃)	30%
	Borax	30%

Los porcentajes corresponden a la masa del polvo usado, estos fueron medidos en una balanza de precisión con margen de error de $\pm 0,001$ g.

Las probetas fueron puestas en crisoles en los cuales quedaban cubiertas por cada diferente mezcla como se muestra en la Ilustración 2.

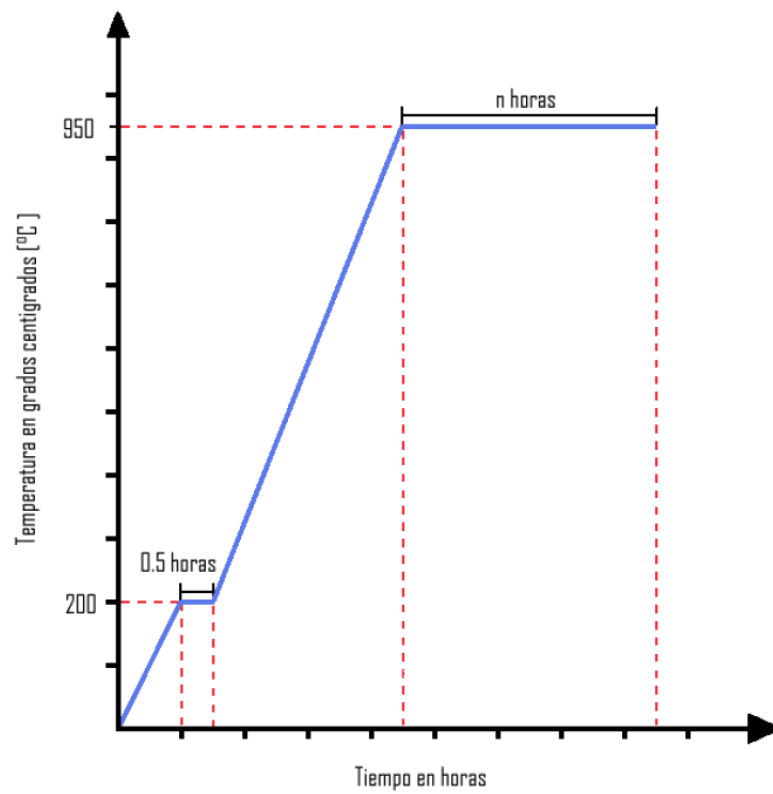
Ilustración 5. Preparación de las probetas en los crisoles



3.3 TRATAMIENTO TERMOQUIMICO

Las probetas dentro de sus respectivos crisoles fueron sometidas a la siguiente curva de calentamiento

Figura 5. Proceso de calentamiento en el horno



El proceso fue llevado a cabo en un horno de resistencia eléctrica. En el calentamiento se mantuvo por media hora la temperatura de 200 °C grados para aliviar estrés en el material, después se prosiguió hasta las 950 °C donde se encuentra acero en estado austenítico y se mantiene la temperatura por 4 y 6 horas en las cuales se espera se genere la difusión del boro.

Ilustración 6. Horno para calentamiento en el proceso de boronizado



(a)



(b)

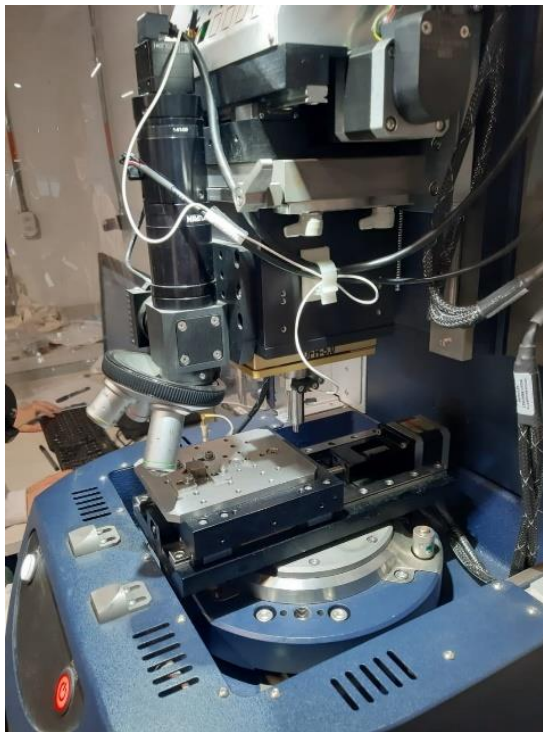
En la Ilustración 6(a) se muestra el horno en el proceso de calentamiento y en la Ilustración 6(b) se ve el final de proceso donde se van a retirar las probetas del horno para finalizar con diferentes tratamientos térmicos.

Por cada paquete de boronizado se prepararon 3 probetas para en cada una realizar un proceso diferente de temple, normalizado y recocido. El temple se realizó en aceite, el normalizado al aire libre en el laboratorio y la probeta sometida al recocido se retiró del horno hasta el día siguiente.

3.4 INDENTACIONES

Posterior a los diferentes tratamientos termoquímicos y térmicos se realizó un segundo pulido a espejo suave de las probetas para poder tener mejor visibilidad de las indentaciones en el ensayo de microdureza Vickers sin quitar la capa borada.

Ilustración 7. Montaje en el UMT TriboLab



El ensayo de microdureza Vickers fue realizado bajo la norma ASTM-E384-17 con cargas diferentes de 0.98, 1.47, 1.96, 2.94 y 3.46 [N] la cuales se encuentran entre los rangos de carga permitidos por la norma. Las cargas fueron aplicadas por 10 [s].

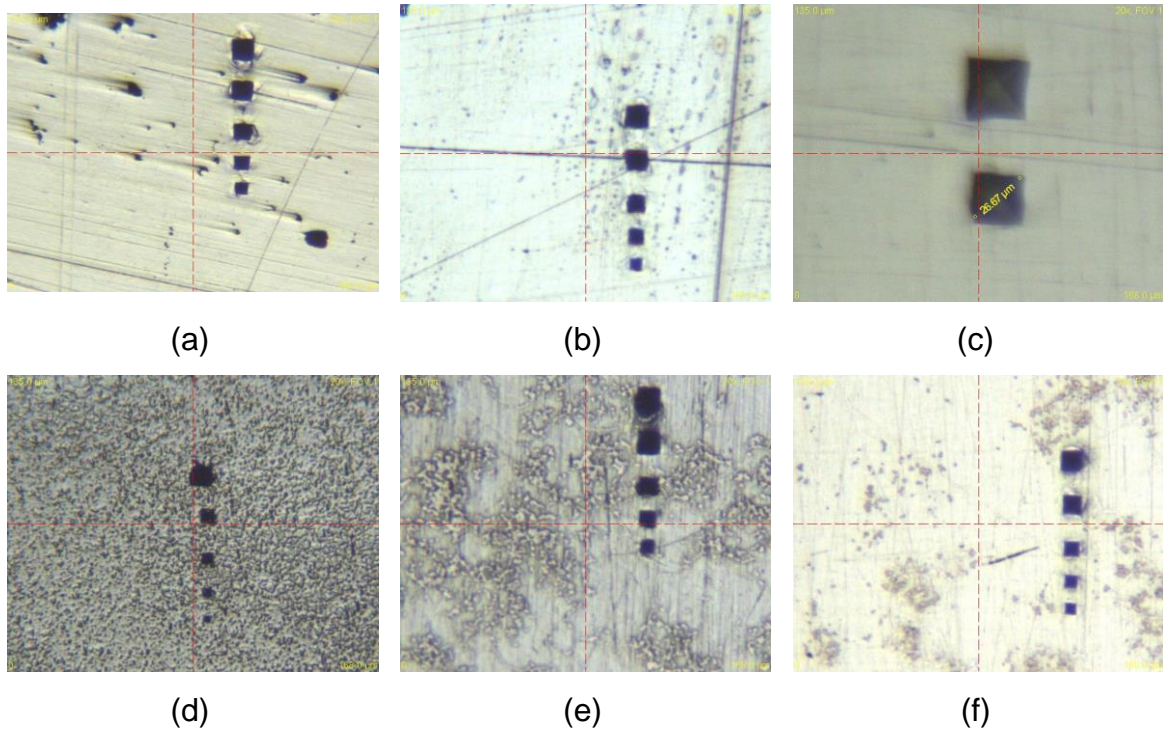
Después del ensayo de microdureza se realizó un corte transversal en la probeta para observar la formación en forma de sierra mostrada en la Ilustración 1. Se sumerge la probeta en un baño de Nital al 3% con el fin de realizar un ataque químico y hacer visible la capa borada.

4. RESULTADOS

4.1 ENSAYO DE MICRODUREZA

Realizando las diferentes indentaciones se obtuvieron diferentes mediadas de las diagonales dejadas por la punta piramidal del ensayo Vickers usada, estos datos se presentan a continuación para cada uno de los diferentes paquetes de boro usados y para cada uno de su acabado final térmico ya sea temple, recocido o normalizado.

Fotomicrografía 8. Indentaciones realizadas para los diferentes paquetes boronizados



En la Fotomicrografía 9 se muestran diferentes indentaciones en el sustrato, las cuales fueron medidas y usadas para conocer la dureza superficial mediante la ecuación 2. Se realizaron también pruebas de microdureza en el acero AISI 1045

sin ningún tratamiento encontrando así los valores nominales para comparar con los nuevos valores obtenidos.

$$HV = 0.00185443 * \frac{P_2}{d_2^2}$$

$$0.00185443 * \frac{0.8}{(31.26 \times 0.001)^2} = 1.5182$$

Una vez obtenidos los datos de dureza en GPa se utiliza la ecuación 4 teniendo como resultado durezas en HV.

$$\text{Dureza en Vickers} = 101.968 \times \text{Dureza en GPa}$$

$$101.968 \times 1.86038 = 187.08$$

Los datos anteriores son los encontrados de las diagonales del acero AISI 1045 sin ningún tratamiento previo, estos se encuentran en los rangos suministrados por la ficha técnica del mismo. Este proceso realizó para todos los datos tomados de las indentaciones.

Cuadro 7. Dureza en GPa para el paquete PB1 con 4 horas de boronizado

F [N]	Temple [GPa]		Normalizado [GPa]		Recocido [GPa]	
0,98	2,07	1,97	2,30	2,29	2,55	2,26
1,47	2,22	2,15	2,13	2,10	2,43	2,19
1,96	2,29	1,99	2,29	2,22	2,78	2,58
2,94	2,30	2,24	2,03	2,02	2,29	2,10
3,43	2,18	2,04	2,18	2,07	2,29	2,17

En los cuadros de dureza en GPa se presentan dos durezas debido a que de las indentaciones se pueden obtener dos diagonales. Se hizo el promedio entre cada

uno de los datos para la dureza para luego usando la ecuación 4 calcular la dureza promedio en Vickers. Calculando el promedio tenemos:

$$\frac{2.076 + 1.974}{2} = 2.02$$

y usando el valor promedio anterior en la Ecuación 4 tenemos que:

$$\text{Dureza en Vickers} = 101.968 \times \text{Dureza en GPa}$$

$$101.968 \times 2.0249 = 206.4757$$

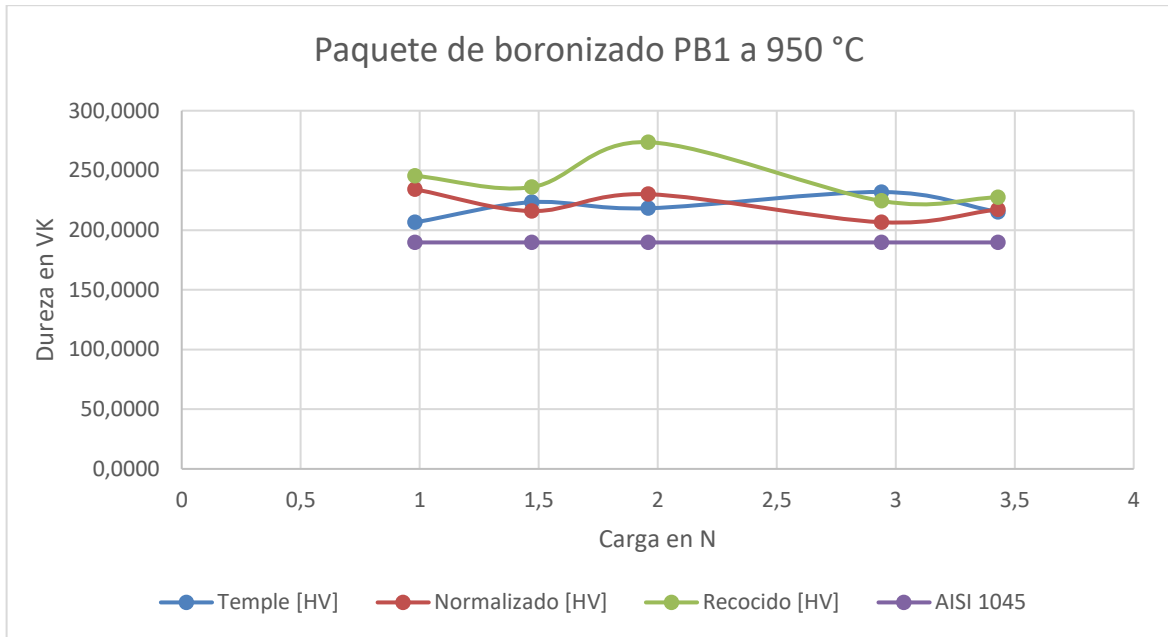
Los cálculos realizados anteriormente serán los mismos para cada Cuadro respectivamente, además es conveniente su cambio de unidades debido a que permitirá compararlo de manera fácil con la literatura.

Cuadro 8. Dureza en Vickers para el paquete PB1 con 4 horas de boronizado

F [N]	Temple [HV]	Normalizado [HV]	Recocido [HV]
0,98	206	234	245
1,47	223	216	236
1,96	218	230	274
2,94	232	207	224
3,43	215	217	227

En ésta Cuadro se observan las durezas finales, en las tres probetas muestra un comportamiento parecido ante todas las indentaciones, muestran una pequeña mejoría respecto a la dureza del acero 1045 sin tratamiento, tal como se muestra en la siguiente grafica para tener mejor.

Figura 6. Comparación de dureza para el paquete PB1 con 4 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos



Ésta mejoría se atribuye al proceso de calentamiento y enfriamiento de las probetas debido a que las durezas no alcanzan los rangos mostrados en la literatura para aceros borados.

Cuadro 9. Dureza en GPa para el paquete PB2 con 4 horas de boronizado

F [N]	Temple [GPa]		Normalizado [GPa]		Recocido [GPa]	
0,98	2,71	2,69	2,89	2,59	2,87	2,70
1,47	2,92	2,89	2,62	2,27	2,08	2,06
1,96	2,74	2,30	2,88	2,41	2,52	2,33
2,94	2,92	2,87	2,42	2,34	2,57	2,56
3,43			2,70	2,57	2,68	2,55

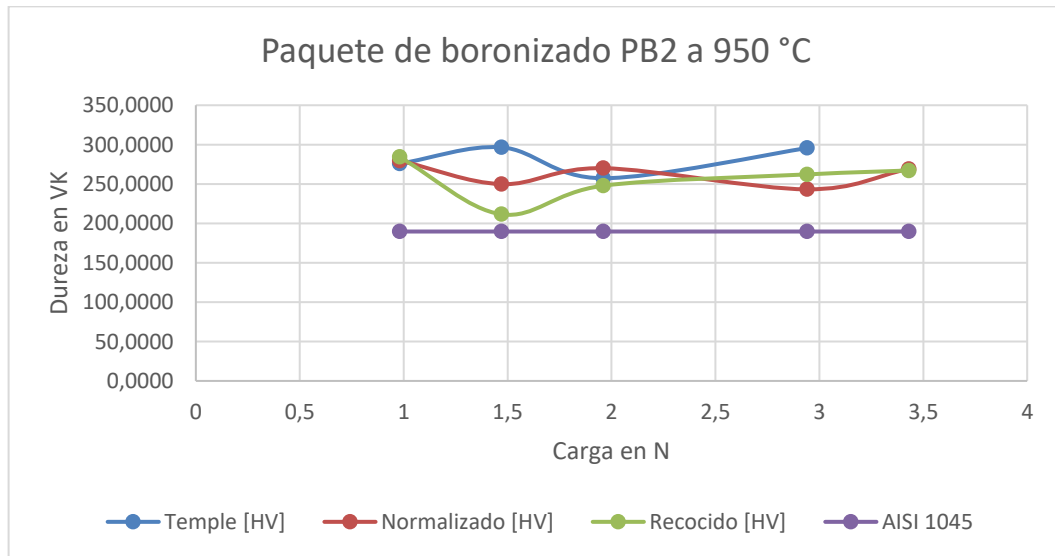
En esta Cuadro se puede evidenciar que las durezas en GPa de las tres probetas, las cuales son muy parecidas en los diferentes enfriamientos, luego de realizar conversión de los datos se muestra la dureza en Vickers en el siguiente cuadro.

Cuadro 10. Dureza en Vickers para el paquete PB2 con 4 horas de boronizado

F [N]	Temple [HV]	Normalizado [HV]	Recocido [HV]
0,98	276	280	284
1,47	297	250	212
1,96	257	270	248
2,94	296	243	262
3,43		269	267

En esta Cuadro se pueden observar la similitud en los valores de las tres probetas respecto a las durezas, se nota una mejoría respecto al acero 1045, pero no es una mejora muy significativa.

Figura 7. Comparación de dureza para el paquete PB2 con 4 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos



Como en el paquete PB2 se descarta la formación de capas de Fe_2B debido a su bajo aumento de dureza superficial, los valores obtenidos no son significativos con respecto a los resultados esperados para boronizado.

Cuadro 11. Dureza en GPa para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado

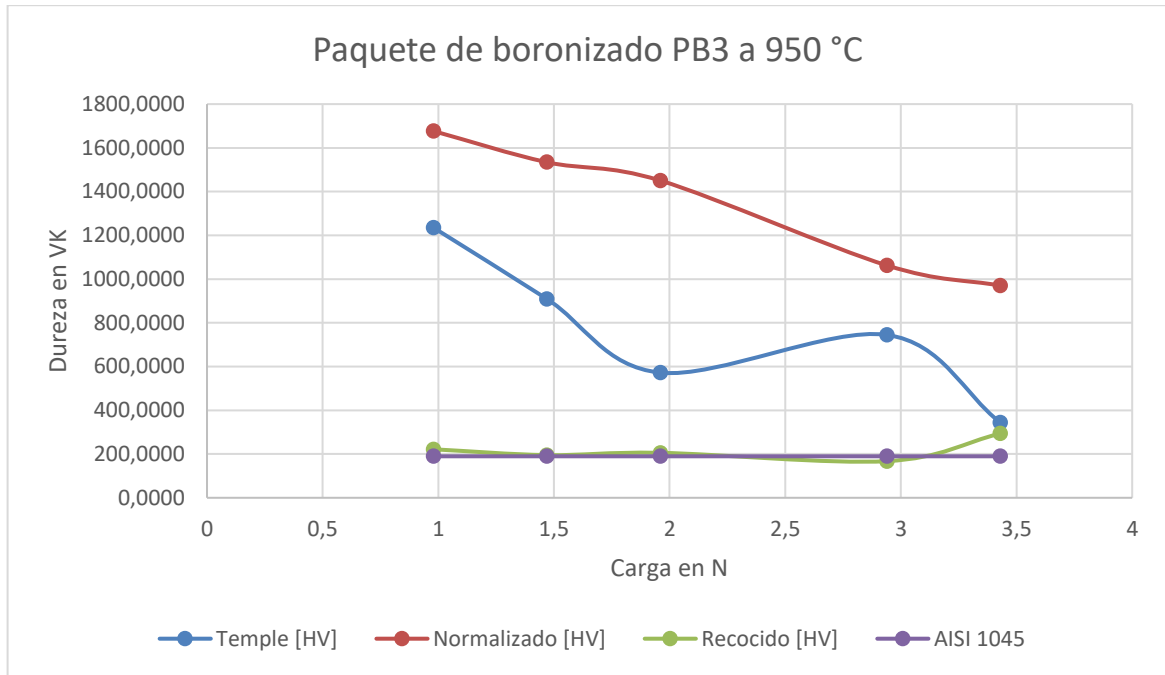
F [N]	Temple [GPa]		Normalizado [GPa]		Recocido [GPa]	
0,98	13,20	11,00	16,70	16,17	2,27	2,075
1,47	9,28	8,53	15,86	14,23	1,97	1,85
1,96	5,74	5,47	15,22	13,22	2,12	1,90
2,94	7,91	6,68	10,75	10,08	1,64	1,63
3,43	3,44	3,30	9,23	9,78	2,96	2,80

Cuadro 12. Dureza en Vickers para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado

F [N]	Temple [HV]	Normalizado [HV]	Recocido [HV]
0,98	1235	1676	222
1,47	909	1534	195
1,96	572	1450	205
2,94	745	1062	168
3,43	344	970	294

Se evidencia una mejora significativa en la dureza superficial del acero donde los rangos obtenidos se encuentran dentro de los límites de 1400 a 2000 HV.

Figura 8. Comparación de dureza para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos



Como se ve en la Figura 9 hubo resultados que van de acuerdo con las capas Fe_2B , además se observa que dependiendo del tratamiento térmico al final del proceso se logran mejores resultados, donde en el recocido no se ve aumento de dureza, se atribuye a que al estar sometida a un enfriamiento lento proporcione el ambiente propicio y la energía necesaria para que el proceso de difusión ocurra de manera inversa, perdiendo así cualquier mejoría obtenida.

Entre el normalizado y el temple se ve una diferencia considerable donde el normalizado muestra mayor porcentaje de dureza que el temple esto se atribuye a que este permite formaciones más homogéneas de estructuras de grano fino.

Cuadro 13. Dureza en GPa para el paquete PB4 con 4 horas de boronizado

F [N]	Temple [GPa]		Normalizado [GPa]		Recocido [GPa]	
0,98	2,88	2,63	2,91	2,75	1,97	1,97

F [N]	Temple [GPa]		Normalizado [GPa]		Recocido [GPa]	
1,47	3,23	3,06	2,85	2,55	1,96	1,78
1,96	2,71	2,64	2,60	2,59	2,16	1,91
2,94	2,76	2,68	3,66	3,25	1,91	1,87
3,43	2,66	2,52	10,22	10,18	2,08	1,93

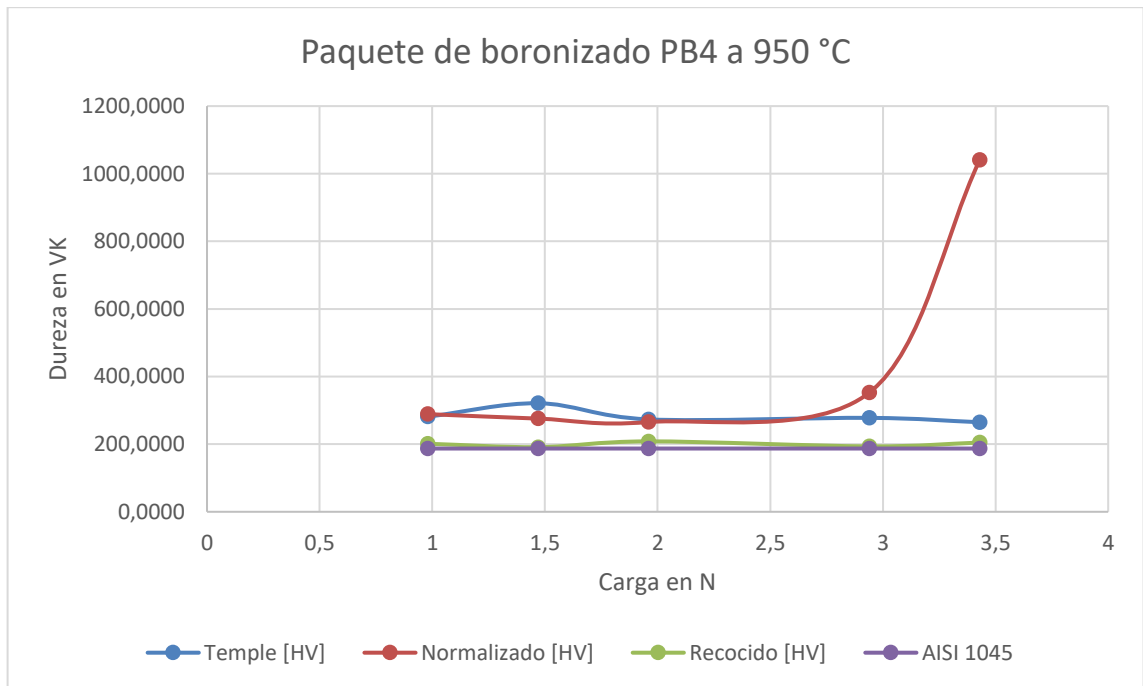
En esta Cuadro se puede evidenciar que las tres probetas tienden a tener en todos sus puntos la misma dureza, aunque la de recocido no tiende a los mismos valores que las otras dos.

Cuadro 14. Dureza en Vickers para el paquete PB4 con 4 horas de boronizado

F [N]	Temple [HV]	Normalizado [HV]	Recocido [HV]
0,98	281	289	201
1,47	321	276	191
1,96	273	265	208
2,94	278	353	193
3,43	265	1041	205

Aquí se observa la dureza final de las probetas del PB4, donde las probetas de temple y normalizado tienen a tener un porcentaje más o menos del 50% de mayor dureza respecto a la probeta de acero 1045 sin boronizado, pero este aumento no se atribuye a un boronizado. En la siguiente gráfica se puede ilustrar mejor.

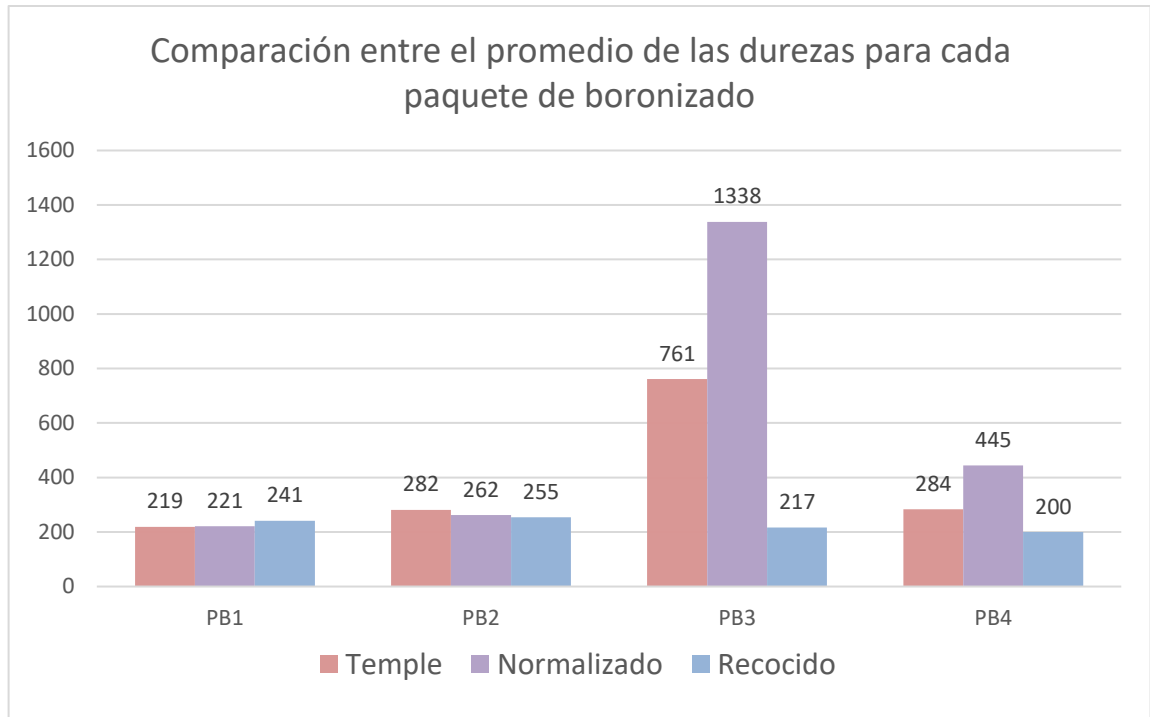
Figura 9. Comparación de dureza para el paquete PB4 con 4 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos



En la figura 10 se observa que para el paquete PB4 no hubo una mejora notable, así que tampoco se atribuye la formación de capas Fe_2B . También se distingue un pico algo en la figura para el normalizado, el cual se debe a la formación de una amalgama sobre la probeta, esta amalgama se forma por el calor suministrado a los polvos y en ocasiones se puede adherir a la superficie del sustrato, pero no corresponde a una capa formada por el proceso de difusión si no que esta se pegó no fue removida debido a que se realizó un lijado suave ya que las probetas tienden a salir con un buen grado de pulido.

Para determinar de manera fácil y gráfica se realizó una Cuadro de barras donde se compara las durezas obtenidas para cada uno de los paquetes usados en el proceso de boronizado, donde se distinguen lo alejado que se encuentra el paquete PB3 con respecto a los otros en cuanto a la dureza.

Figura 10. Comparación durezas en HV para diferentes paquetes de boronizado



Se usó el promedio de las durezas en HV de cada Cuadro y se distingue lo alejado entre las alturas del paquete PB3 con respecto a los otros, por esto se optó por realizar de nuevo el tratamiento termoquímico aumentando el tiempo en el horno de 4 a 6 horas y determinar cómo afecta el tiempo en el boronizado.

Cuadro 15. Dureza en GPa para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado

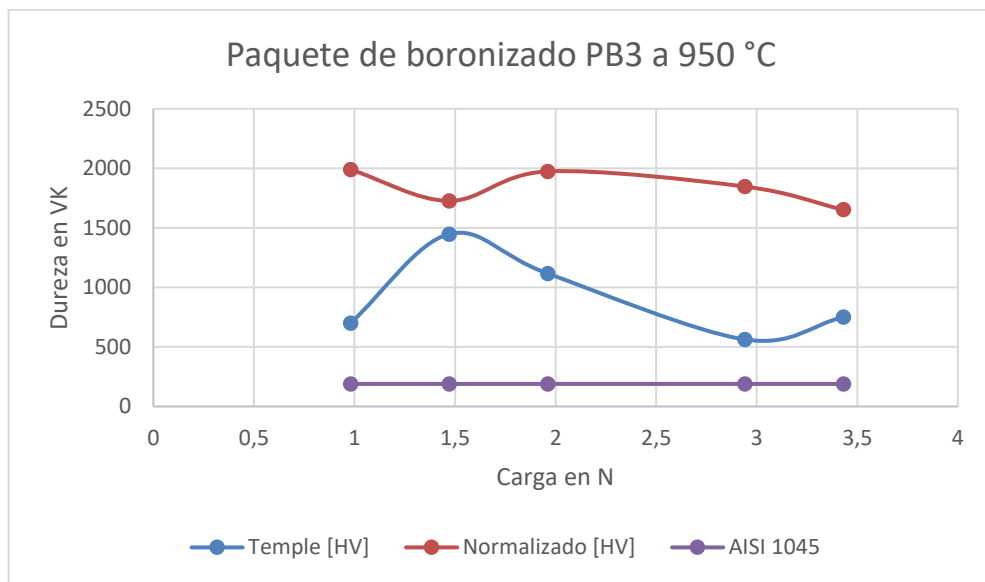
F [N]	Temple [Gpa]		Normalizado [Gpa]	
	0,98	7,28	6,44	18,50
1,47	15,06	13,33	16,20	17,67
1,96	9,65	12,25	17,89	20,82
2,94	5,19	5,84	16,75	19,47
3,43	7,62	7,090	15,74	16,67

Cuadro 16. Dureza en Vickers para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado

F [N]	Temple [HV]	Normalizado [HV]
0,98	700	1990
1,47	1448	1727
1,96	1117	1974
2,94	563	1847
3,43	750	1653

En los cuadros anteriores se muestran los resultados de dureza en GPa y HV para las probetas boronizadas con el paquete PB3 por 6 horas, donde se puede observar que los resultados se encuentran en los rangos encontrados en literatura para la dureza en capas boradas, cabe resaltar que se sigue encontrando que el someter la probeta ha normalizado se siguen obteniendo mejores resultados que en el temple

Figura 11. Comparación de dureza para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos



En la Figura 12 se puede ver que al someter las probetas por más tiempo se logran resultados estables en la curva de la dureza para el normalizado donde el rango va desde los 1600 hasta los 1990 HV siendo los mejores resultados encontrados.

Figura 12. Comparación de dureza para el paquete PB3 con 4 y 6 horas de boronizado y sus diferentes acabados térmicos

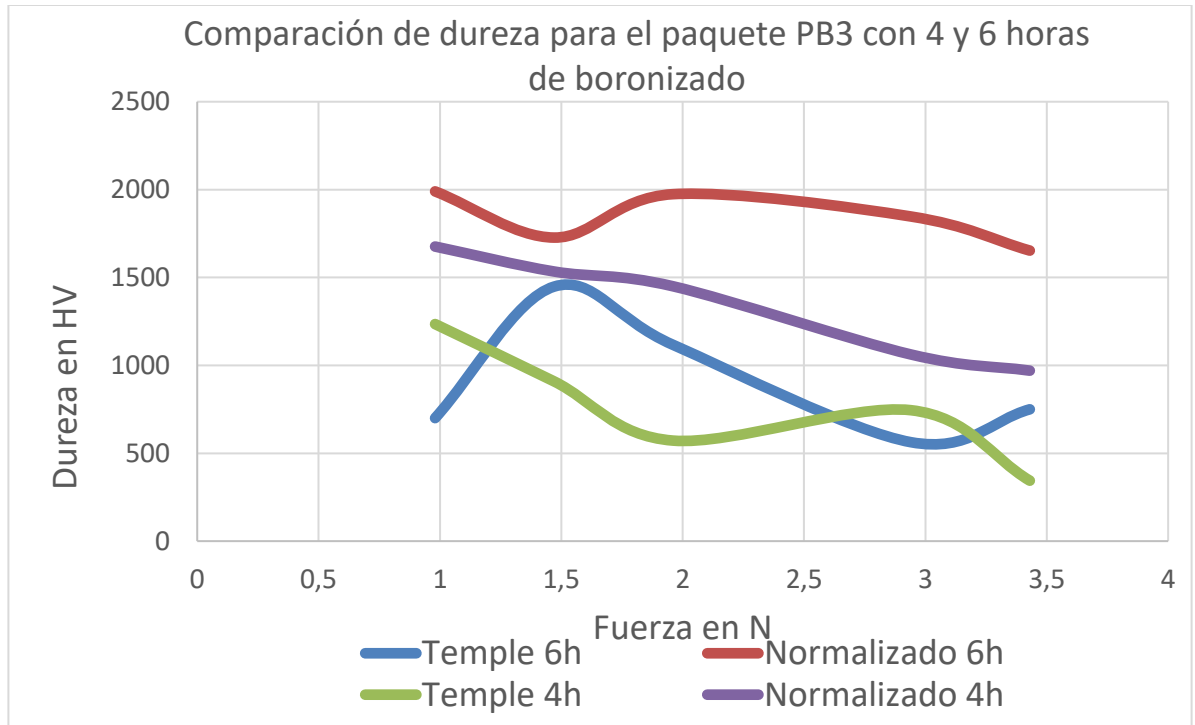
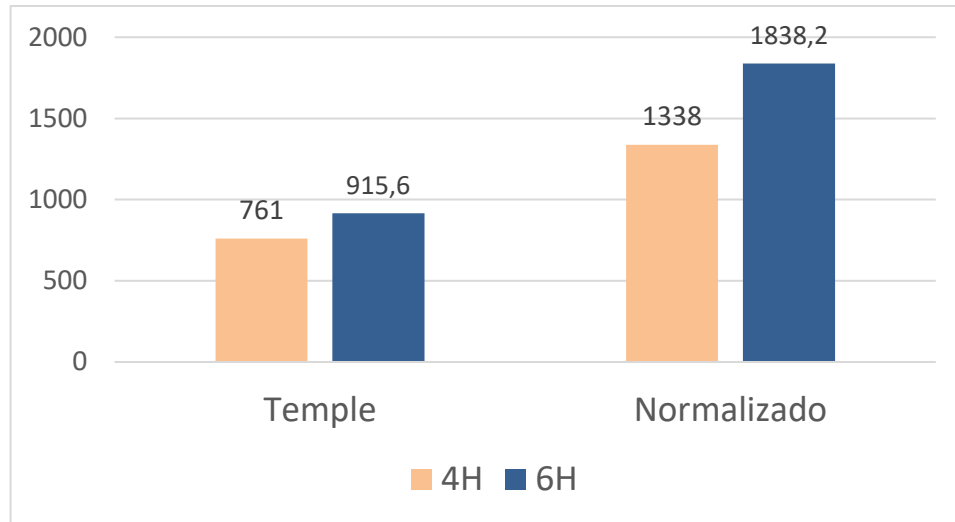


Figura 13. Comparación durezas en HV para boronizado a 4 y 6 horas



Comparando el boronizado para 4 y 6 se evidencia que el normalizado sigue siendo mejor para el proceso incluso comparándolo con un temple de mayor tiempo, además se puede observar la tendencia del boronizado con normalizado a formar curvas más estables con menores cambios.

Además, en la figura 14 se puede ver que al encontrar los promedios de las diferentes durezas se obtienen resultados que demuestran que el normalizado debe ser el aplicado al momento de retirar las piezas del horno, resaltando que debe sacarse la pieza del boro para evitar que se adhieran impurezas a las superficies.

A parte de los paquetes PB1, PB2, PB3 y PB4 mencionados anteriormente también se realizaron boronizados con diferentes concentraciones de carburo de boro y carburo de silicio a diferentes temperaturas. Se muestran a continuación.

Cuadro 17. Dureza Vickers para los paquetes de boronizado con carburo de boro y carburo de silicio a 850°C por 4 horas

F [N]	97,5% SiC - 2,5% B4C [HV]	95% SiC - 5% B4C [HV]	92% SiC - 8% B4C [HV]	87,5% SiC - 12,5% B4C [HV]
0,98	117	107	124	170
1,47	105	105	131	148
1,96	101	99	123	125
2,94	110	107	111	128
3,43	97	91	102	118

Cuadro 18. Dureza Vickers para los paquetes de boronizado con carburo de boro y carburo de silicio a 950°C por 4 horas

F [N]	97,5% SiC - 2,5% B4C [HV]	95% SiC - 5% B4C [HV]	92% SiC - 8% B4C [HV]	87,5% SiC - 12,5% B4C [HV]
0,98	116	198	105	114
1,47	119	205	125	134
1,96	116	153	122	125
2,94	106	139	115	112
3,43	103	128	104	100

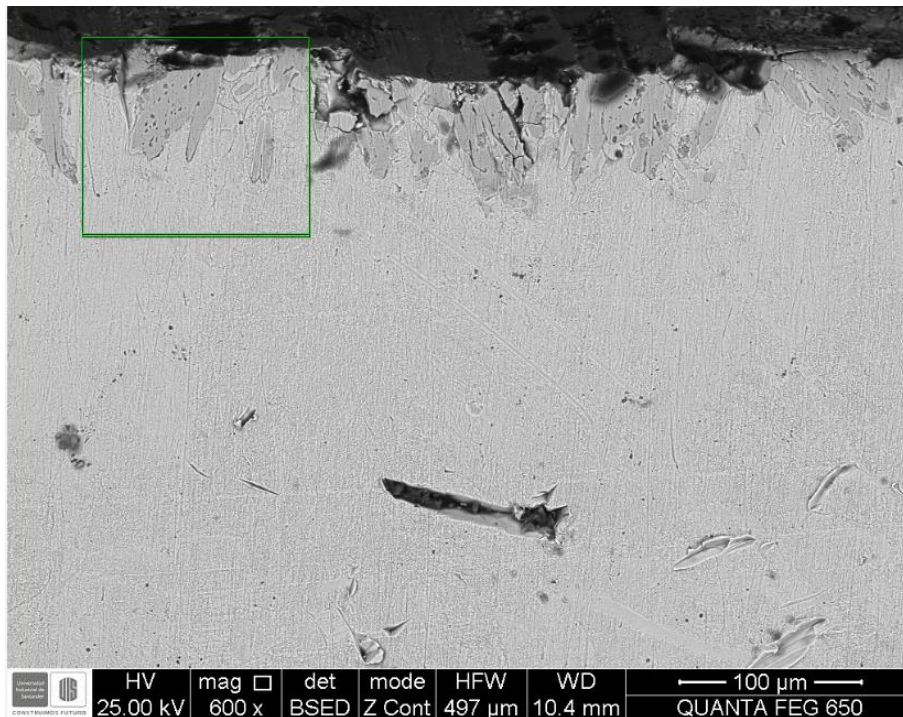
Los resultados arrojados por estos paquetes no muestran mayor aumento de la dureza del material, por el contrario, demuestran una caída en sus propiedades mecánicas, se recomienda usar mayores porcentajes de B₄C para tener resultados más relevantes en futuras investigaciones. Debido a las bajas durezas no se hace búsqueda de capas boradas en el sustrato.

4.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se optó por realizar estas diferentes tomas de imágenes para el paquete que presento mayor aumento el cual fue el PB3 con 4 y 6 horas de boronizado.

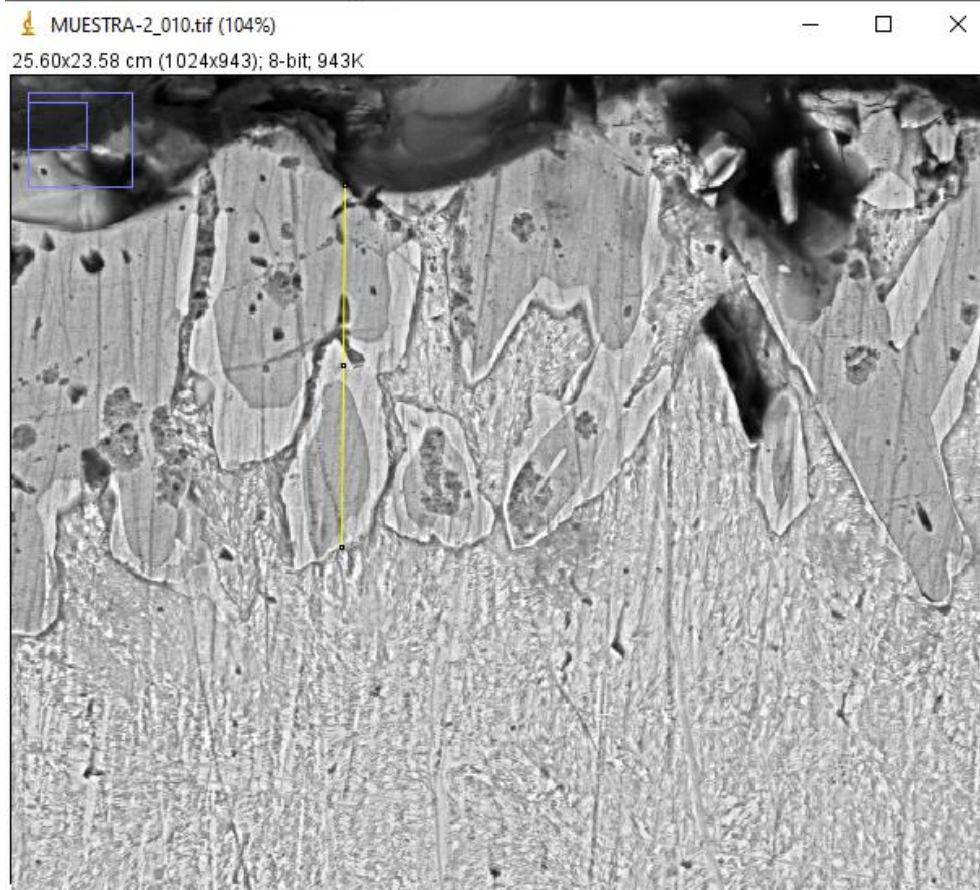
Cada una de las muestras se cortó perpendicular a la capa borada, seguido se realizó pulido hasta tener una superficie espejo, después se sumerge la probeta en un baño de Nital al 3% con el fin de realizar un ataque químico y hacer visible la capa borada.

Fotomicrografía 9. MEB para la probeta con el paquete PB3 con 4 horas de boronizado



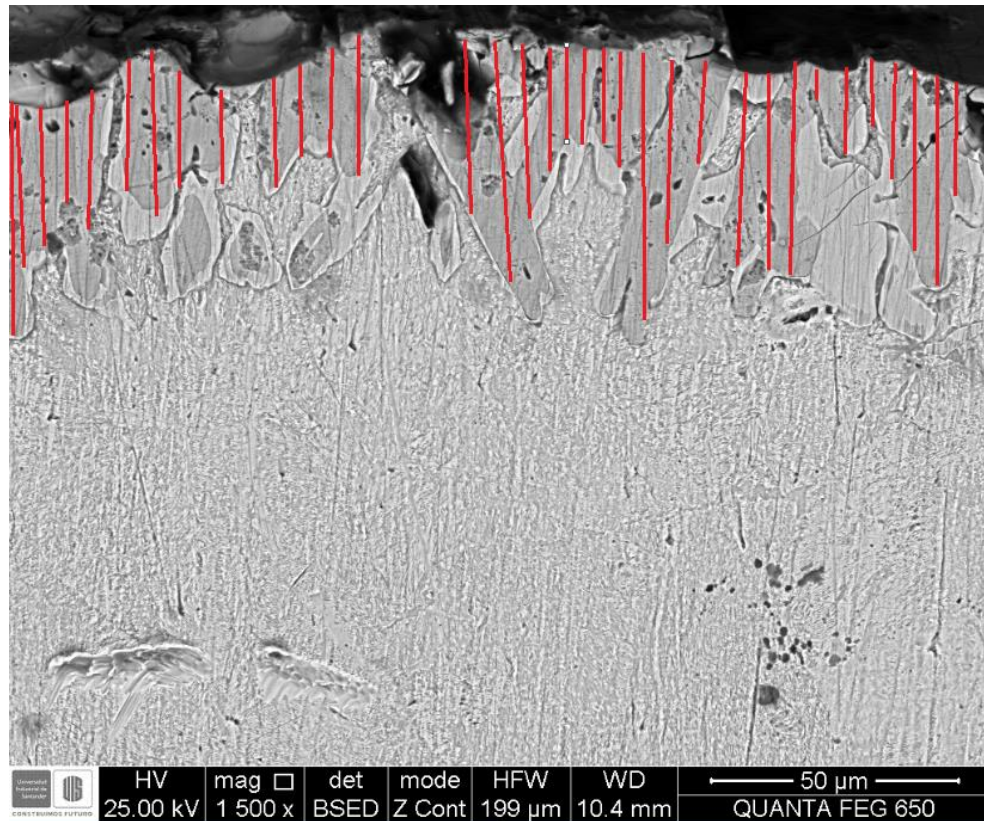
En la Fotomicrografía 10 se puede observar la formación de la capa con forma aserrada característica de las capas de boronizado, se prosiguió a realizar un enfoque de la parte encerrada en el recuadro verde para medir las diferentes profundidades alcanzadas por la difusión del boro en el acero y para poder observar mejor las diferentes formaciones.

Fotomicrografía 10. Medición de la profundidad de la capa borada para la probeta con el paquete PB3 con 4 horas de tratamiento mediante el software ImageJ



El software ImageJ es usado para tomar medidas usando como referencia la escala que se especifica en la imagen, se puede ver en la Fotomicrografía 11 a que porción de la microscopia corresponde la medida de 50 μm . Basado en esto el software asigna una medida para una cantidad determinada de pixeles y permite conocer el valor de la distancia correspondiente.

Fotomicrografía 11. Medidas tomadas de la capa borada para la probeta con el paquete PB3 con 4 horas de tratamiento mediante el software ImageJ

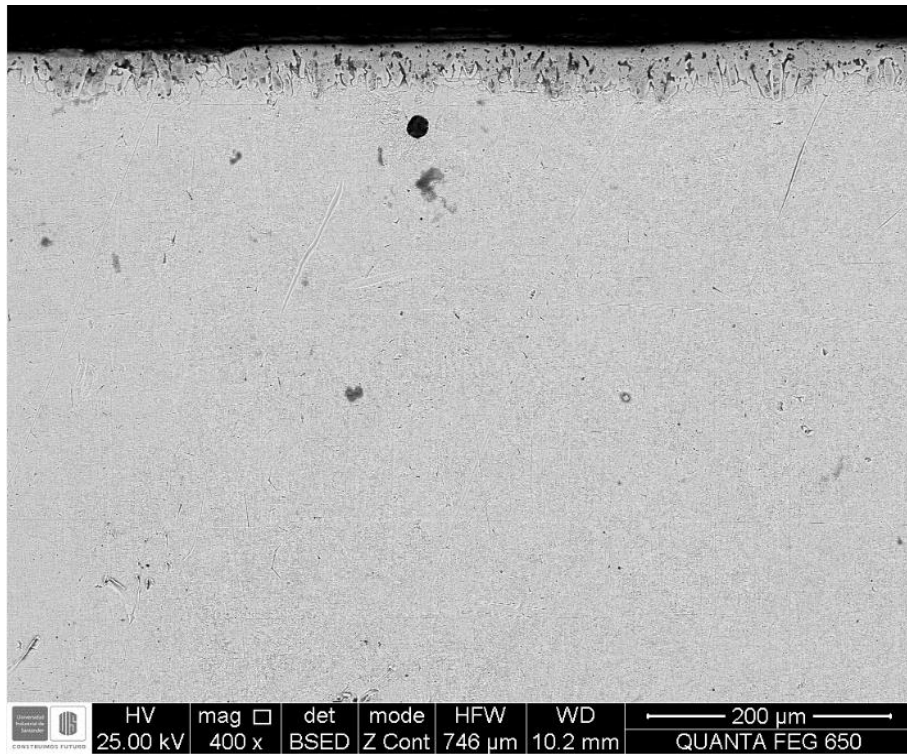


Se realizó el cálculo de la tasa de difusión del acero usando las profundidades obtenidas con el software ImageJ las cuales se muestran como líneas de color rojo, se encontraron profundidades de hasta 44 μ m. Mediante la ecuación (1) se calculó el coeficiente de difusión para cada profundidad y se hizo el promedio de estos valores obteniendo así un $K = 0,23057346 \mu\text{m}/\text{s}^{-1}$ para el paquete PB3 con 4 horas de tratamiento.

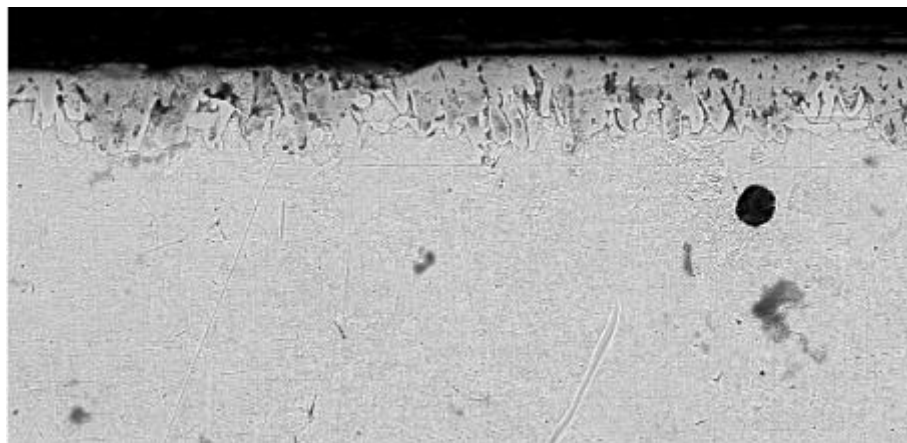
Se pueden apreciar en la Fotomicrografía 11 tres tonalidades diferentes donde la que se encuentra con líneas rojas es la capa borada, la cual es una formación de Fe_2B ya que tenemos su forma característica y durezas encontradas en literatura.

Seguida se encuentra la zona de transición, la cual tiene un tono más claro con respecto a la anterior. Por último, tenemos el sustrato que sería el acero AISI 1045.

Fotomicrografía 12. MEB para la probeta con el paquete PB3 con 6 horas de boronizado



(a)

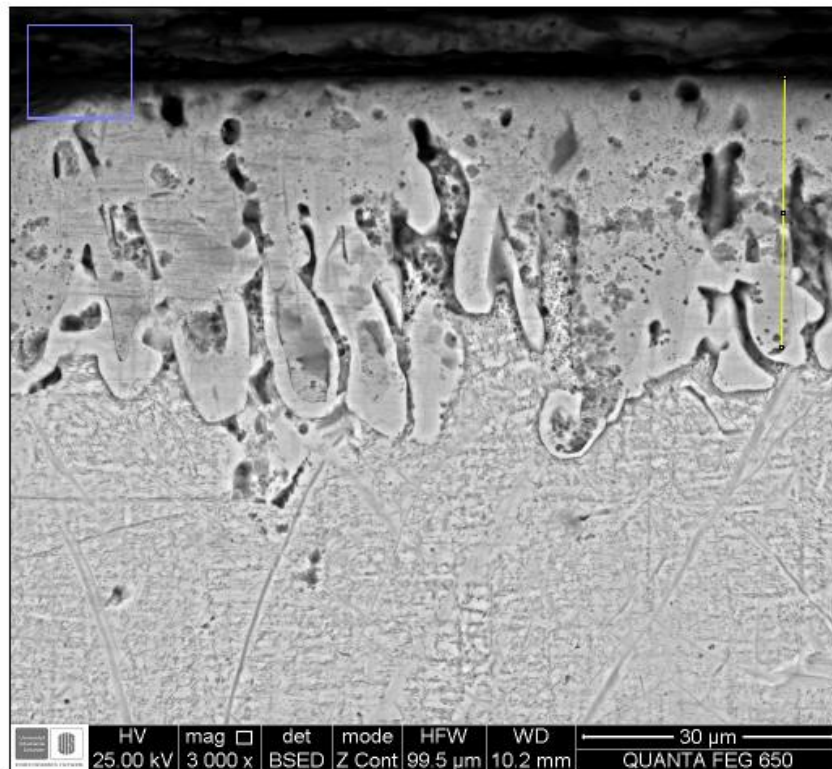


(b)

La Fotomicrografía 12 corresponde a la muestra con el paquete PB3 con 6 horas de tratamiento, en la imagen (a) se puede ver la capa borada en la probeta de acero, se procede a hacer una ampliación de la misma donde nos enfocamos en la capa para que sea más notoria y fácil de observar.

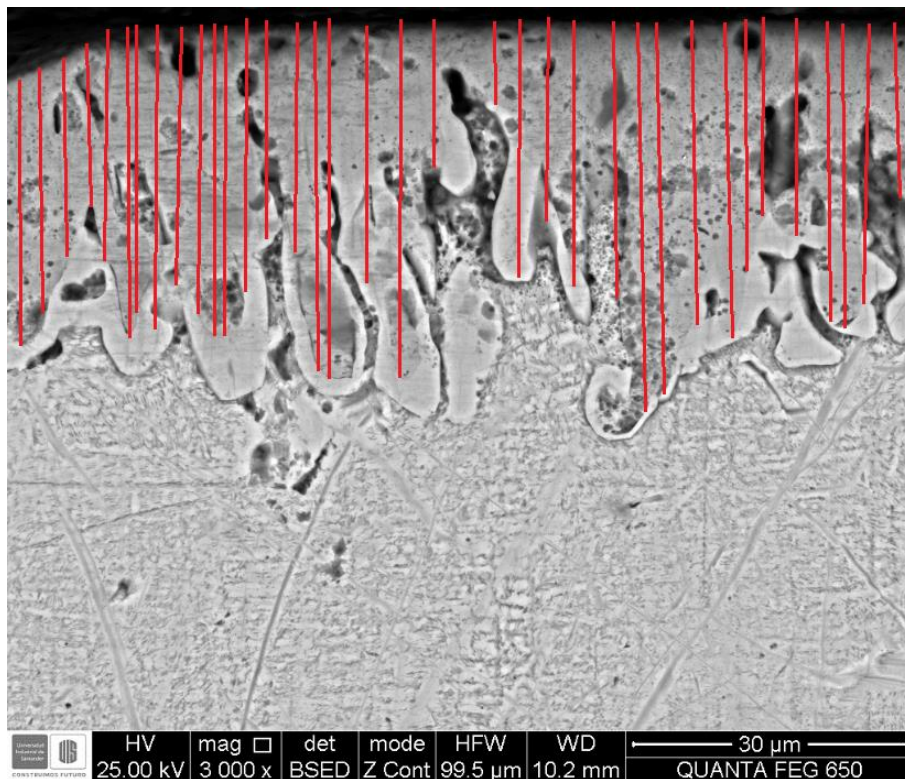
Fotomicrografía 13. Medidas tomadas de la capa borada para la probeta con el paquete PB3 con 6 horas de tratamiento mediante el software ImageJ

MUESTRA-3_006.tif (50%)
99.74x91.85 μm (1024x943); 8-bit; 943K



El software ImageJ es usado para tomar medidas usando como referencia la escala que se especifica en la imagen, se puede ver en la Fotomicrografía 13 a que porción de la microscopia corresponde la medida de 30 μm . Basado en esto el software asigna una medida para una cantidad determinada de pixeles y permite conocer el valor de la distancia correspondiente.

Fotomicrografía 14. Medidas tomadas de la capa borada para la probeta con el paquete PB3 con 6 horas de tratamiento mediante el software ImageJ



Se realizó el cálculo de la tasa de difusión del acero usando las profundidades obtenidas con el software ImageJ las cuales se muestran como líneas de color rojo, se encontraron profundidades de hasta casi 60 μm. Mediante la ecuación (1) se calculó el coeficiente de difusión para cada profundidad y se hizo el promedio de estos valores obteniendo así un $K = 0,23031469 \mu\text{m}/\text{s}_{-1}$ para el paquete PB3 con 6 horas de tratamiento.

Teniendo en cuenta estos resultados en las diferentes microscopias podemos decir que al tener un mayor espesor de capa los resultados en las curvas para el normalizado en la figura13 tienden a ser más parejas, dando esto a entender que tenemos a mayor tiempo de boronizado una capa más homogénea en toda la superficie.

4.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La difracción de rayos x fue llevada a cabo en diferentes puntos de la muestra, esta tiene un registro de datos en el rango de 4° (2θ) a 90° (2θ), tiempo por paso 0,6 s, paso: $0,02035^\circ$ (2θ) con un tiempo de duración media de 35 minutos. Se mostrarán los puntos en los que fueron tomadas y su respectiva grafica para las probetas con el paquete PB3 con 4 y 6 horas de boronizado.

Fotomicrografía 15. DRX para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado

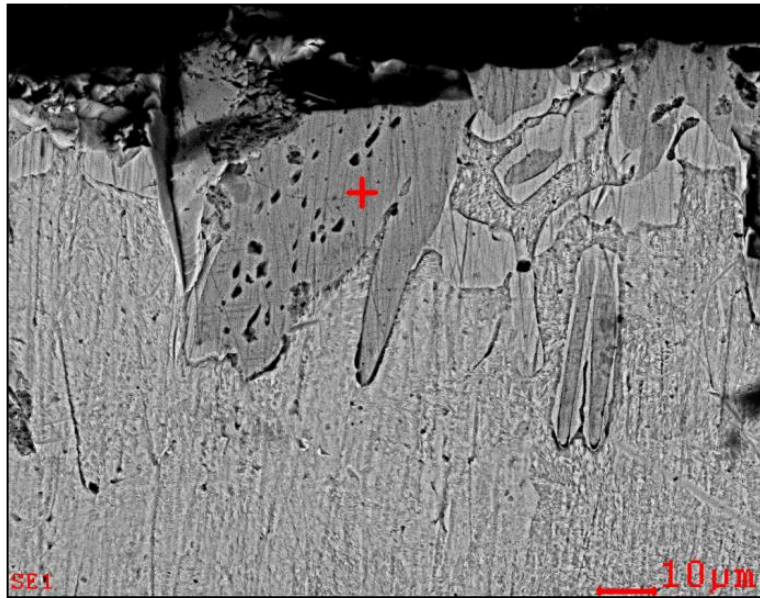
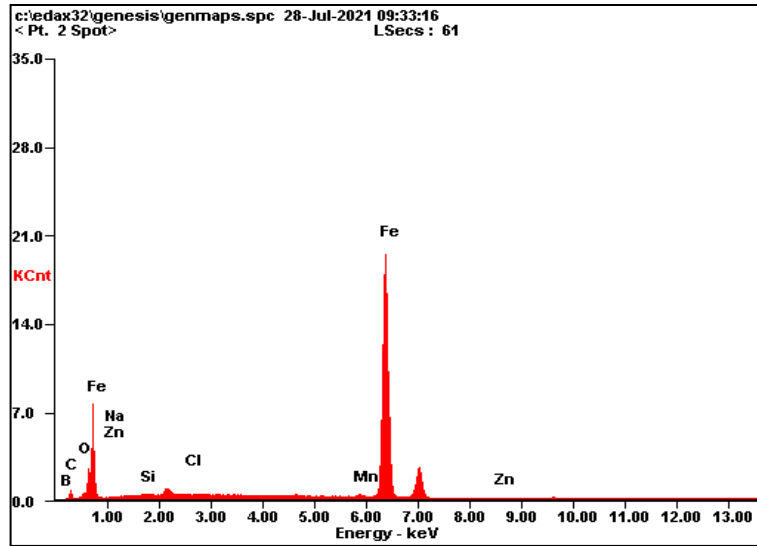


Figura 14. Espectro DRX para el paquete PB3 con 4 horas de boronizado



Fotomicrografía 16. DRX para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado

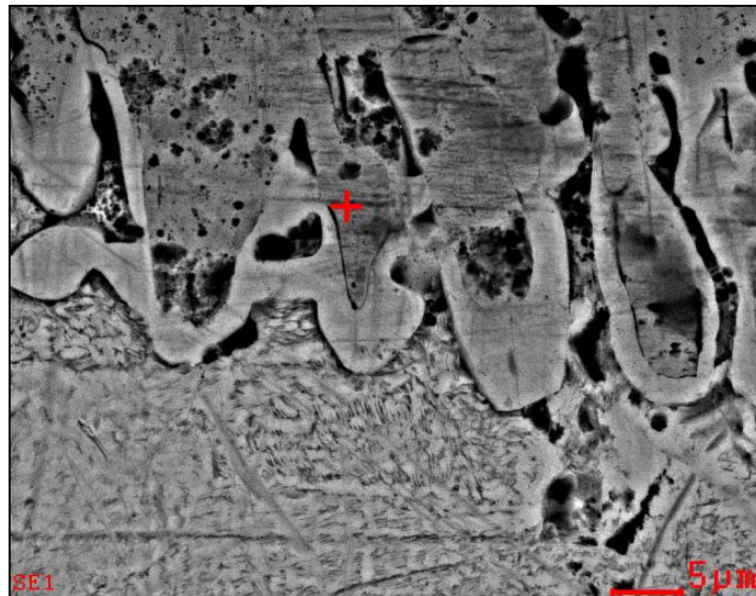
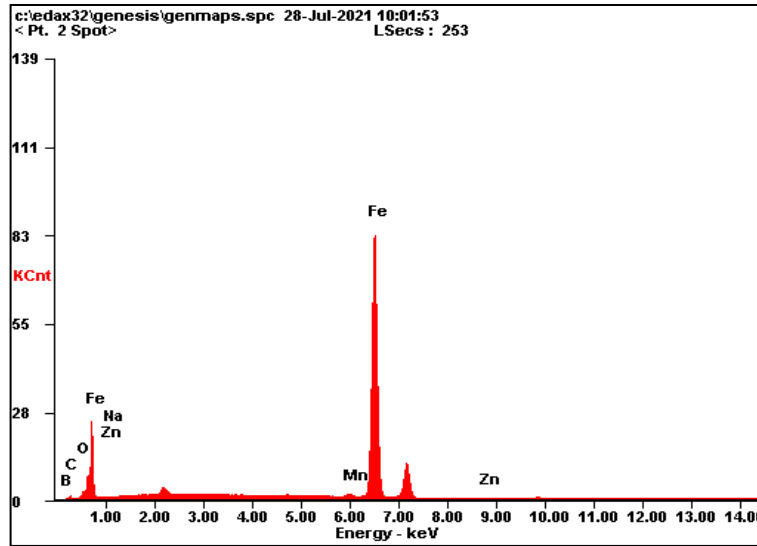


Figura 15. Espectro DRX para el paquete PB3 con 6 horas de boronizado



La Figura 15 y 16 corresponde al patrón evidenciado por Cardenas, et al¹⁵ en los aceros borados, éste patrón corresponde a las formaciones de solamente capa con Fe_2B , de menor porcentaje de boro pero también es menor fragilidad, además se nos muestra la capa de transición característica de desplazar elementos como el silicio o el zinc en el sustrato.

¹⁵ E. Cardenas y e. al, «Characterization and wearperformance of boride phases over tool steel substrates,» *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, nº 2, pp. 1-10, 2016.

5. CONCLUSIONES

Se sometió el material al proceso de boronizado sólido con diferentes mezclas de polvos en los cuales uno cumplía la función de medio para el proceso y el otro suministraba el boro al medio. La dureza del material se vio afectada por los diferentes paquetes boronizantes, siendo el de mayor impacto el paquete PB3 el cual contenía 50% de carburo de silicio y 50% de bórax.

La dureza del sustrato sin el tratamiento fue de 187 HV, el cual al someterse al paquete boronizante PB3 logró durezas entre los 1000 y 2000 HV usando al final del tratamiento termoquímico un acabado de normalizado.

El proceso de recocido al final del tratamiento termoquímico representa una pérdida total del recubrimiento. En éstas muestras no se encuentra una mejoría en la propiedad de la dureza superficial, por el contrario, los datos arrojados en ocasiones podían ser igual o menores que la dureza del material sin ningún tratamiento.

El uso del paquete PB3 hasta en 6 horas no mostró delaminación en la capa exterior, además los cálculos realizados para el coeficiente de difusión a diferentes horas muestran mantenerse en el tiempo de tratamiento.

Al final del proceso la pieza metálica queda rodeada por una amalgama la cual se puede remover con facilidad después del normalizado, si la superficie del material se encuentra en condiciones buenas de pulido se puede remover con mayor facilidad y disminuyó el requerimiento de otro proceso de remoción de material en la superficie, debido al desgaste que se le aplicó.

Se evidenció solo la formación de capas de Fe_2B las cuales son las óptimas para el boronizado, además al evitar la formación de las capas FeB se evita también el proceso de delaminación.

BIBLIOGRAFÍA

ASKELAND, Donald R, y Wright Wendelin J. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Mexico D.F.: Cengage learning, 2017.

CAMPOS SILVA , I E , y G A Rodríguez Castro. Boriding To improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. Thermochemical surface engineering of steels. Woodhead publishing, 2015.

CARDENAS, Edgar, y et al. «Characterization and wearperformance of boride phases over tool steel substrates.» Advances in Mechanical Engineering 8, nº 2 (2016): 1-10.

COMPANY LINDBERG HEAT TREATING. «Boroalloy process, Process Data Sheet 4.» 2017.

CZERWINSKI, Franck. «Thermochemical Treatment of Metals.» En Heat Treatment - Conventional and Novel Applications, 247-286. Rijeka: inTech, 2012.

GARITANO OLAIZOLA, Cristina. «Caracterización de diagramas CCT para aceros microaleados con Nb.» San Sebastian, 2020.

GUY, Albert G. Elements of physical metallurgy. Florida: Addison-Wesley publishing company, 1967.

JOSHI, A. A., y S. S. Hosmani. «Pack-Boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing Mechanism and the Role of Container Design.» Materials and Manufacturing Processes 29, nº 9 (2014): 1062.

KRASTEV , Dimitar . Corrosion Resistance. Rijeka: InTech, 2012.

ORTIZ-DOMÍNGUEZ, Martín, Arturo Cruz-Avilés, Morgado Irving-Gonzales, Jose Farfán-Garcia, Javier Hernández-Perez, y Juan Cruz-Bustamante. «Tratamientos termoquímicos.» Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún 7, nº 14 (2020): 17.

SMITH, Peter. The Fundamentals of Piping Design. Houston: Gulf Publishing Company, 2007.

TIENDA AENOR. «Materials, Standard Test Method for Microindentation Hardness of E384 – 17.» 2021.

ANEXOS

ANEXO A. FICHA TÉCNICA ACERO AISI 1045

ACEROS ESPECIALES
Para aplicaciones Industriales

Cía. General de Aceros

Acero Grado Ingeniería

Referencia:
Aceros al Carbono



Composición química (%)			
C	0.43 - 0.50	P	0.04 Max.
Mn	0.80 - 0.90	S	0.05 Max.
Si	0.20 - 0.40		

Dureza de suministro 180 - 220 HB.

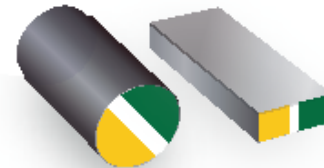
EQUIVALENCIAS EN OTRAS NORMAS

NORMAS	NOMBRE
AISI SAE	1045
DIN	CK45
AFNOR	XC45
UNI	C45
BS	060 A45

Características:

Acero de medio carbono, posee baja soldabilidad y buena maquinabilidad, responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción. Por su dureza y tenacidad es utilizado para la fabricación de componentes de maquinaria.

Usos: Por sus características de temple, se tiene una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general de resistencia media, tales como: ejes, cigüeñales, engranajes, piñones, cuñas, tornillos, pernos, pasadores, partes de maquinaria y herramientas agrícolas.



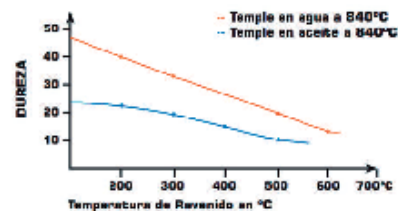
Láminas desde 15.88 mm hasta 300 mm de espesor

Estado de Suministro	Resistencia tracción kg/mm ²	Límite elástico kg/mm ²	Alargamiento %	Reducción de área %	Dureza brinell HB
Laminado en Caliente	60	32	> = 16	> = 40	180/220
Calibrado	60	42	> = 16	> = 40	180/220

TRATAMIENTO TÉRMICO	TEMPERATURA °C	MEDIO DE ENFRIAMIENTO
Forja	850/1100	Ceniza o arena
Temple	815/870	Aceite
Normalizado	856/900	Aire
Recocido total	650/700	Horno
Revenido	450/600	Aire

* Tener presente que los tratamientos térmicos modifican las propiedades mecánicas de origen del material.

Diagrama de Revenido



El tiempo de sostenimiento a esta temperatura es de 1 hora + 1 hora por pulgada de espesor o diámetro de la pieza. Posteriormente se enfría en el horno o al aire.

Observaciones: Toda la información técnica es solo de referencia.

Los datos suministrados están dentro de los rangos promedio de lo exigido por norma o la calidad asociada y no corresponden a los valores exactos para cada material.

ANEXO B. NORMA ASTM E 384 – 17

E384 – 17

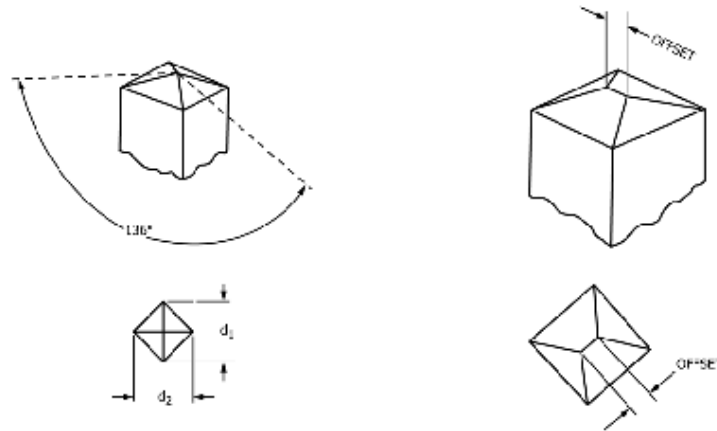


FIG. 2 Vickers Indenter

3.3.3 The Knoop hardness reported with units of GPa is determined as follows:

$$HK = 0.014229 \times P_2 / d_2^2 \quad (5)$$

where:

P_2 = force, N, and
 d_2 = length of the long diagonal of the indentation, mm.

3.3.4 For the Vickers hardness test, in practice, test loads are in grams-force and indentation diagonals are in micrometers. The Vickers hardness number is calculated as follows:

$$HV = 1.000 \times 10^3 \times P / A_p = 2.000 \times 10^3 \times P \sin(\alpha/2) / d^2 \quad (6)$$

or

$$HV = 1854.4 \times P / d^2 \quad (7)$$

where:

P = force, gf,
 A_p = surface area of the indentation, μm^2 ,
 d = mean diagonal length of the indentation, μm , and
 α = face angle of the indenter, $136^\circ 0'$ (see Fig. 2).

3.3.5 The Vickers hardness, kgf/mm^2 is determined as follows:

$$HV = 1.8544 \times P_1 / d_1^2 \quad (8)$$

where:

P_1 = force, kgf, and
 d_1 = mean diagonal length of the indentations, mm.

3.3.6 The Vickers hardness reported with units of GPa is determined as follows:

$$HV = 0.0018544 \times P_2 / d_2^2 \quad (9)$$

where:

P_2 = force, N, and
 d_2 = mean diagonal length of the indentations, mm.

3.4 Equations for calculating % Error and Repeatability for periodic verification is determined as follows:

$$E = 100 \left(\frac{\bar{d} - d_{ref}}{d_{ref}} \right) \quad (10)$$

where:

E = % error in performance of the periodic verification,
 \bar{d} = the measured mean diagonal length in μm , and
 d_{ref} = the reported certified mean diagonal length, μm .

$$R = 100 \left(\frac{d_{max} - d_{min}}{\bar{d}} \right) \quad (11)$$

where:

R = repeatability in performance of the periodic verification,
 d_{max} = the longest diagonal length measurement on the standardized test block, μm ,
 d_{min} = the shortest diagonal length measurement on the standardized test block, μm , and
 \bar{d} = the measured mean diagonal length in μm .

4. Summary of Test Method

4.1 In this test method, a hardness number is determined based on the formation of a very small indentation by application of a relatively low force, in comparison to traditional bulk indentation hardness tests.

4.2 A Knoop or Vickers indenter, made from diamond of specific geometry, is pressed into the test specimen surface under an applied force in the range of 1 to 1000 gf using a test machine specifically designed for such work.

4.3 The size of the indentation is measured using a light microscope equipped with a filar type eyepiece, or other type of measuring device (see Terminology E175).