

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD ZACATENCO

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“EVALUACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE LA
ADHESIÓN DEL SISTEMA CAPA-SUBSTRATO EN UN
ACERO AISI 316L BORURADO CON BASE A LA NORMA
VDI 3198”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. TAPIA ZUÑIGA MARIO GUADALUPE

DIRECTOR:

DR. ALFONSO MENESES AMADOR



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
 SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 12:00 horas del día 14 del mes de Junio del 2016 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E. para examinar la tesis titulada:

**“EVALUACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE LA ADHESIÓN DEL SISTEMA
 CAPA/SUSTRATO DE UN ACERO AISI 316L BORURADO CON BASE A LA NORMA VDI 3198”.**

Presentada por el alumno:

TAPIA

Apellido paterno

ZUÑIGA

Apellido materno

MARIO GUADALUPE

Nombre(s)

Con registro:

A	1	4	0	5	3	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

DR. ALFONSO MENESES AMADOR

Presidente

DR. IVÁN ENRIQUE CAMPOS SILVA

Segundo Vocal

DR. GERMAN ANIBAL RODRÍGUEZ CASTRO

Tercer Vocal

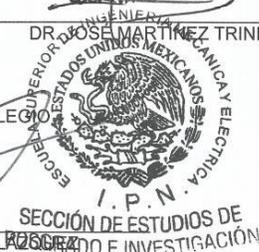
DR. JUAN VICENTE MÉNDEZ MÉNDEZ

Secretario

DR. JOSÉ MARTÍNEZ TRINIDAD

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. MIGUEL TOLEDO VELASCO





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 13 del mes de **mayo** del año **2016**, el que suscribe **Mario Guadalupe Tapia Zuñiga** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica**, con número de registro **A140538**, adscrito al **5º semestre**, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del

Dr. Alfonso Meneses Amador

y cede los derechos del trabajo titulado:

“EVALUACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE LA ADHESIÓN DEL SISTEMA CAPA-SUBSTRATO EN UN ACERO AISI 316L BORURADO CON BASE A LA NORMA VDI 3198”

al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación. Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones **mario20093510@gmail.com**, **amenesesa@ipn.mx** Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Tapia Zuñiga Mario Guadalupe
Nombre y Firma



DEDICATORIAS

A dios por siempre guiarme por el camino

A mi madre Maria Teresa Zuñiga quien es un pilar en mi vida, por apoyarme de manera incondicional.

A mi hermano Raúl de Jesús Tapia Zuñiga por ser en ejemplo en mi vida y siempre estar dispuesto a apoyar en cada decisión que tomo.

A mi familia en general que siempre con sus consejos hicieron de mi una mejor persona

A mis amigos quienes con su apoyo y convivencia hicieron mas ameno el trabajo



Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional que durante 10 años me ha formado profesionalmente, mi alma mater, mi segunda casa.

Al CONACyT por brindarme su apoyo económico y recursos para realizar este trabajo de maestría.

A la SEPI-ESIME Zacatenco y particularmente al Grupo de Ingeniería de Superficies por brindarme el espacio e instalaciones para llevar a cabo este trabajo.

Al Dr. Alfonso Meneses Amador por la confianza brindada, el tiempo y dedicación invertidos, el conocimiento compartido y la paciencia hacia conmigo en la dirección de este trabajo de tesis.

Al Dr. German Anibal Rodríguez Castro por su disposición a resolver dudas y apoyarme con sus conocimientos.

Al Dr. Iván E. Campos Silva por su confianza, enseñanzas y contribuciones a este trabajo pero sobre todo por la pasión hacia la formación de sus alumnos.

Al Dr. José Martínez Trinidad por su apoyo y comentarios hacia mi trabajo.

A todos mis compañeros y amigos del Grupo de Ingeniería de Superficies.



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCULA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION**





CONTENIDO

CONTENIDO	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABLAS	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VIII
INTRODUCCIÓN	X
ANTECEDENTES	XIII
JUSTIFICACIÓN	XV
OBJETIVO GENERAL	XVII
OBJETIVOS PARTICULARES	XVII
METODOLOGÍA	XVIII
Capítulo 1 Estado del arte	1
1.1 Introducción	1
1.2 Borurización.....	1
1.2.1 Borurización en caja	5
1.2.2 Borurado Interrumpido	9
1.3 Adherencia.....	12
Capitulo 2.- Endurecimiento y caracterización de los boruros de hierro formados en el acero AISI 316L	19
1.4 Introducción	19
1.5 Proceso de borurado continuo en el acero AISI 316L	19
1.6 Proceso de borurado interrumpido	20
1.7 Caracterización físico-química y mecánica de las capas de boruros de hierro en el acero AISI 316L.....	22
1.7.1 Caracterización óptica (Medición de espesor de capa).....	22
1.7.2 Caracterización físico-química (Difracción de Rayos X,DRX)	24
1.7.3 Caracterización físico-química	26
1.7.4 Caracterización Mecánica (Indentación Instrumentada)	27
Capítulo 3.- Desarrollo de la prueba Numérico-experimental de adhesión Rockwell-C	32



1.8	Introducción	32
1.9	Análisis de Adhesión por indentación Rockwell-C (Norma VDI 3198).....	32
1.10	Esfuerzos residuales	34
CAPITULO 4 ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES		36
1.11	Introducción	36
1.12	Caracterización del proceso de borurización	36
1.13	Calculo de esfuerzos residuales y curvas plásticas.....	42
1.14	Análisis de huellas de indentación de la prueba de Rockwell-C	44
Conclusiones generales.....		51
Perspectivas de trabajo		52
Referencias		53
Anexo "A"		56



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura cristalina de los compuestos a) FeB b) Fe_2B	1
Figura 1.2 Metalografías de aceros a) AISI 4140 (Márquez Cortes, 2016) y b) AISI 316L (Bravo Bárcenas, 2010).	2
Figura 1.3 Esquema de tratamiento de borurado en polvo.	5
Figura 1.4 Configuración empleada en el proceso de borurado interrumpido	10
Figura 1.5 Representación del ciclo térmico de borurado interrumpido.	10
Figura 1.6 Durometro para indentación Rockwell-C	15
Figura 1.7 Criterios de evaluación de la normativa VDI 3198	15
Figura 2.1 a) vistas superior y lateral acotadas de probetas de acero AISI 316L y b) acabado final de probetas	19
Figura 2.2 a) contenedor y b) Arreglo de probetas y contenedor para el tratamiento continuo de borurado	20
Figura 2.3 Configuración del arreglo para el proceso interrumpido de borurado	21
Figura 2.4 Gráficos de los ciclos térmicos para tratamientos interrumpidos a) 2 horas, b) 4 horas	22
Figura 2.5 Dispositivo de acero inoxidable AISI 304 a) sin muestra b) con muestra montada c) dimensiones	23
Figura 2.6 criterio para la medición de las capas de boruros de hierro (Campos Silva et al. , 2010)	24
Figura 2.7 Características básicas de un ensayo de DRX, b) Angulo entre el haz incidente y el Haz difractado	25
Figura 2.8 Difractometro PANalytical X'PERT PRO-MRD.	26
Figura 2.9 Microscopio Electrónico de Barrido Quanta 3D FEG, marca FEI	27
Figura 2.10 Equipo Tester NHT de la marca CSM Instruments para Nanoindentación.	28
Figura 2.11 Curva característica obtenida mediante una prueba de indentación	29
Figura 2.12 a) geometría del indentador Berkovich b) esquema de la sección transversal de una indentación	29
Figura 3.1 Equipo CSM Revetest Xpress para pruebas de rayado e indentación	32
Figura 3.2 Probeta sin limpieza b) probeta después de la limpieza.	33
Figura 3.3 Indentaciones a cargas bajas realizadas sobre la superficie de un acero 316L borurado	33
Figura 3.4 #- indentaciones realizadas a cargas altas sobre la superficie del acero borurado AISI 316L	33
Figura 4.1 a, b, c y d muestran el proceso de preparación de muestras para el proceso de borurado .	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4.2 metalografía del tratamiento de borurado interrumpido 4h. en acero 316L	36
Figura 4.3 imagen de SEM del tratamiento de borurado interrumpido 4h. en acero 316L	37
Figura 4.4 análisis DRX de la superficie del tratamiento interrumpido de 4H	38



Figura 4.5 metalografía del tratamiento de borurado interrumpido 2h.en acero 316L	39
Figura 4.6 imagen de SEM del tratamiento de borurado interrumpido 2h.en acero 316L	40
Figura 4.7 a, b análisis puntual de EDS sobre tratamiento de borurado interrumpido 2h.en acero 316L	41



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición química del acero AISI 316L	3
Tabla 1.2 Características generales de los agentes borurantes de la marca <i>Ekabor™</i>	6
Tabla 1.3 Propiedades de los compuestos de boruros de hierro (Matuschka, 1980).	6
Tabla 1.4 Campos de aplicación de cada escala Rockwell-C (NMX-B-119-1983)	13
Tabla 3.1 Categorías de los esfuerzos residuales	35
Tabla 4.1 Espesores de capa obtenidos del tratamiento de borurado interrumpido en acero 316L	36
Tabla 4.2 Espesores de capa obtenidos del tratamiento de borurado interrumpido en acero 316L	37
Tabla 4.3 Espesores de capa obtenidos del tratamiento de borurado interrumpido en acero 316L	40
Tabla 4.4 Espesores de capa obtenidos del tratamiento de borurado interrumpido en acero 316L	40
Tabla 4.5 Imágenes de indentación para los tratamientos borurados a una carga de 147.5N	44
Tabla 4.6 Imágenes de indentación para los tratamientos borurados a una carga de 441,315N	45
Tabla 4.7 Imágenes de indentación para los tratamientos borurados a una carga de 980,7N	46
Tabla 4.8 Imágenes de indentación para los tratamientos borurados a una carga de 1471,05N	47



RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la adhesión de sistemas (capa sustrato) en el acero inoxidable 316L endurecida superficialmente por difusión de boro. El endurecimiento superficial se realizó por medio del proceso de borurización en polvo de manera continua e interrumpida para tiempos de exposición de 2 y 4 horas a una temperatura constante de 900°C, con la finalidad de obtener sistemas monofásicos y bifásicos en la superficie del material sustrato.

La caracterización de las capas formadas se realizó por medio de microscopía óptica y microscopía atómica de barrido, cuyos resultados muestran una morfología con tendencia plana y espesores que van desde 2.46 a 2.76 μm para los tratamientos interrumpidos y de 8.46 a 12.44 μm para los tratamientos continuos. Para la caracterización físico-química se llevaron a cabo los análisis de Difracción de rayos X y Espectroscopia de energía Dispersiva con el fin de identificar la presencia de los compuestos característicos formados después del tratamiento. Para la caracterización mecánica se utilizó la técnica de indentación instrumentada, con un indentador Berckovich, con la cual se obtuvieron la dureza de las capas y módulos de elasticidad, los cuales fueron utilizados en el cálculo de las curvas plásticas y esfuerzos residuales.

La prueba de adhesión se llevó a cabo siguiendo la metodología y los criterios de la norma VDI 3198. El desarrollo experimental se llevó a cabo en dos partes. La primera consistió en realizar una serie de indentaciones en la superficie de las probetas tratadas termoquímicamente a cargas que van desde 10 a 140N con incrementos de 10N para evaluar el daño progresivo de los sistemas. Para la segunda parte se desarrolló la prueba según lo menciona la norma, con el uso de un durómetro Rockwell-C a fin de determinar la carga crítica para uno de los 4 sistemas formados.

A través del uso de microscopía óptica y del uso de un perfilómetro se determinó la adherencia aceptable o pobre y la profundidad máxima de indentación respectivamente. Los resultados de adhesión según los ensayos experimentales indican que para las 4 condiciones presenta adhesión aceptable para la carga de 150 KgF, sin embargo los sistemas con recubrimiento bicapa presentan desprendimiento en las periferias de la huella de indentación al contrario de los sistemas monocapa que presentan adhesión suficiente sin desprendimiento.



Con la finalidad de complementar los resultados obtenidos experimentalmente, se desarrolló un modelo numérico a de la prueba de adhesión por indentación Rockwell-C en el programa de elemento finito ABAQUS 6.11. Las simulaciones se llevaron a cabo tomando en cuenta los siguientes datos:

Para los tratamientos continuos e interrumpidos se consideró la presencia de la capa FeB , Fe_2B , zona de difusión, sustrato, coeficiente de fricción y la aplicación de una carga controlada aplicada por un indentador al cual se le considera un sólido analíticamente rígido. Los resultados obtenidos de la simulación presentan una buena correlación con los datos experimentales teniendo una aproximación entre el 92 y 93% con respecto a la profundidad residual de indentación.

A pesar de que en la literatura se presentan diversos trabajos que involucran la simulación de indentaciones con diferentes tipos de indentador sobre sistemas con recubrimientos duros, el presente trabajo presenta un aporte innovador ya que para el caso de aceros borurados no se encuentran antecedentes y mucho menos sobre sistemas monocapa. Los resultados del análisis numérico ayudan a resaltar las diferencias entre los dos sistemas, que de otro modo presentarían según los criterios de falla un comportamiento similar.



ABSTRACT

In the following work, the adhesion of the film system formed on the surface of the stainless steel 316L was evaluated. The hardening process was performed by means of the powder-pack boriding in continuous and interrupted in two different exposure times (2 and 4 hours) and constant temperatures of 900°C, in order to obtain monolayer and multilayer with different thicknesses.

Optical microscopy and *Scanning Electron Microscope* was used to characterize the boride layer, the results showed a plane interface and total thicknesses in the range of 2.46 to 2.76 μm by the interrupted process and the 8.46 to 12.44 μm to continuous. For characterization physicochemical they were conducted Diffraction analysis and X-ray energy dispersive spectroscopy in order to identify the presence of characteristic compounds formed after treatment. Instrumented indentation technique was used, with an indenter Berkovich, with which the hardness of the layers and moduli of elasticity were obtained, which were used in the calculation of the residual stress and plastic curves for the mechanical characterization.

The adhesion test was carried out following the methodology and criteria of the standard VDI 3198. The experimental development was conducted in two parts. The first it consisted of a series of indentations in the surface of the treated sample, loads ranging from 10 to 140N increments to assess progressive damage specimens systems. For the second part of the test it was developed as mentioned standard, with the use of a Rockwell-C hardness tester to determine the critical load to one of the 4 systems formed

Through the use of optical microscopy and use profilometer acceptable or poor adherence and the maximum indentation depth it was determined respectively. The adhesion results by experimental tests indicate that the 4 conditions presented acceptable to the load of 150 KgF, however systems with two-layer coating present detachment in the peripheries footprint indentation in contrast to the monolayer systems with adhesion sufficient without detachment.

In order to complement the results obtained experimentally, a numerical model of the adhesion test indentation Rockwell-C was developed in the ABAQUS finite element program 6.11.

The simulations were carried out taking into account the following assumption: For continuous and interrupted treatment the presence of FeB , Fe_2B layer, diffusion zone, substrate, coefficient of friction and the application of a controlled load applied by an indenter which is considered a solid is considered analytically rigid. The results of the simulation show good correlation with experimental data taking an approximation between 92 and 93% with respect to the residual indentation depth.



Although in the literature several studies involving the simulation of indentations with different indenter on systems with hard coatings, this study presents an innovative contribution as in the case of borurados steels no antecedents are much less present on monolayer systems. The results of numerical analysis help to highlight differences between the two systems, which otherwise would present as the failure criteria similar behavior.



INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el desarrollo tecnológico en las industrias metal-mecánica ha provocado una ardua investigación para mejorar el rendimiento de sus componentes, ya que más del 90 % de las fallas que se presentan en los elementos de una maquina se desarrollan en la superficie, debido a que están sujetos a diferentes fenómenos que provocan deterioro causado por las condiciones normales de operación tales como desgaste por contacto mecánico, corrosión, oxidación, fatiga y por exposición a temperaturas elevadas, lo que conlleva a una reducción del tiempo de vida útil.

Una posible solución, es la que proponen los tratamientos termoquímicos, los cuales tiene como principal función endurecer la superficie del material a través de la difusión de algún o algunos elementos tales como (nitrógeno, carbono, boro, etc.) sobre un sustrato, obteniendo como resultado la generación de una capa o recubrimiento con características químicas, tribológicas y mecánicas diferentes al del interior, el cual permanece inalterado.

En el Grupo de Ingeniería de Superficies de la SEPI ESIME Zacatenco el proceso de borurado ha sido ampliamente analizado en diferentes materiales así como la caracterización del recubrimiento formado. Sin embargo, las superficies que se generan después del tratamiento termoquímico presentan diferentes propiedades, algunos trabajos realizados incluyen la evaluación de estas capas a través de pruebas como fatiga por contacto, erosión por partículas sólidas, adhesión por medio de la prueba de scratch, resistencia a la corrosión, desgaste multipass, entre otras, dentro de las cuales las características que se evalúan durante las pruebas antes mencionadas están la dureza, resistencia a la corrosión, fatiga, resistencia a la oxidación, adhesión, erosión, etc.

Las pruebas en diferentes materiales con recubrimientos de boruros de hierro llevadas a cabo ha tomado un especial interés en la evaluación y comparación de los recubrimientos formados, ya que por lo general, después del tratamiento termoquímico de borurado se forman un sistema bicapa en la superficie del material, sin embargo algunas investigaciones también proponen métodos por medio de los cuales es posible la generación de un sistema con solo una capa, con lo cual la comparación resulta de gran importancia ya que los nuevos sistemas formados presentan diferentes propiedades y prestaciones las cuales abren la posibilidad de nuevas aplicaciones en la industria.

Algunos de los métodos utilizados en este grupo para la obtención de sistemas monocapa se derivan del proceso tradicional de borurado en caja, por ejemplo el proceso de recocido por difusión, en donde la probetas boruradas con recubrimientos bicapa (FeB , Fe_2B) es



sometida nuevamente a un proceso térmico en ausencia de agente borurante, con el fin de diluir la capa que presenta mayor porcentaje en peso de boro (FeB), obteniendo así, un sistema con un solo recubrimiento compuesta únicamente de (Fe_2B). Otro método empleado es el de borurado interrumpido en el cual los ciclos térmicos de exposición del contenedor cambian, en este proceso la capa final presenta en algunos casos un sistema mono-capa (Fe_2B) o un sistema en donde la capa superior (FeB) presenta un menor crecimiento ya que es superada en tamaño por la capa inferior (Fe_2B). Por esta razón la investigación de las propiedades de estos sistemas toma importancia ya que estos presentan características totalmente diferentes a pesar de ser formados en materiales substratos iguales o semejantes.

Dentro de las propiedades a evaluar por las diferentes pruebas, una propiedad primordial a evaluar es la adhesión puesto que de esta dependen los futuros usos y aplicaciones.

En la actualidad existen diferentes pruebas mediante las cuales se puede evaluar la calidad de adhesión tales como la prueba de impacto, indentación Vickers, scratch, indentación Rockwell-C siendo las últimas dos las más comunes, sin embargo estas son del tipo semi cuantitativo y cualitativo respectivamente, los resultados del tipo cuantitativo son muy apreciados en el diseño ya que estos proveen un mejor entendimiento de las reacciones en el interior del material. En el presente trabajo de investigación se genera un modelo numérico con el cual los resultados permiten una mejor comprensión del comportamiento del sistema capa/substrato de manera cuantitativa, mejorando así el conocimiento científico y la calidad de los resultados, para este trabajo se utilizarán los criterios propuestos por la normativa VDI 3198 para la evaluación de la adhesión la cual se realiza por medio de indentaciones generadas por una máquina de dureza Rockwell-C y un indentador cónico con un radio de $200\ \mu m$ sobre los sistemas monocapa (Fe_2B) y bicapa (FeB/Fe_2B) formados en la superficie de un acero AISI 316L mediante el tratamiento termoquímico de borurado interrumpido y continuo bajo las condiciones de 2 y 4 horas de exposición a $900^{\circ}C$

El presente trabajo se divide en cuatro capítulos

El capítulo 1 hace mención al tratamiento termoquímico de borurización en polvo mediante los procesos continuo e interrumpido, las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los boruros de hierro (FeB , Fe_2B), la importancia de la adherencia y finalmente la técnica para la evaluación de esta última por medio de indentación Rockwell-C.

El capítulo II comprende del desarrollo experimental de tratamiento termoquímico en sus dos modalidades (continuo e interrumpido), bajo las condiciones de tratamiento 2, 4 horas de exposición a una temperatura constante de ($900^{\circ}C$). Posterior a los tratamientos se realizó la caracterización óptica, físico-química y mecánica de las capas con el fin de verificar



su formación mediante microscopía óptica, difracción de rayos X, EDS, microscopía atómica de barrido y nanoindentación.

En el capítulo III se divide en dos partes en la primera se desarrolla la prueba de adherencia bajo los criterios de falla de la norma VDI 3198 en los diferentes tratamientos propuestos en este trabajo (continuo e interrumpido) incluyendo los cálculos de esfuerzos residuales presentes en las capas formadas, así como la carga crítica para cada tratamiento. En la segunda parte se desarrolló el modelo numérico a través del software ABAQUS del ensayo de adhesión Rockwell-C alimentado con los resultados obtenidos a través de los análisis experimentales simulando las condiciones de carga experimentales con el cual se calcularán los esfuerzos principales que se generan en los sistemas formados (FeB / Fe_2B y Fe_2B).

Finalmente en el capítulo IV se muestran los resultados obtenidos de las pruebas experimentales (difractogramas, gráficos de EDS, gráficos de perfilometría, perfiles de dureza, esfuerzos residuales) con el fin de analizar numéricamente el análisis de adhesión y contribuir cuantitativamente a los resultados de la prueba.



ANTECEDENTES

La evaluación de adhesión es un análisis primordial para cualquier tratamiento termoquímico o de deposición superficial, para el caso específico de los boruros de hierro generados por tratamiento termoquímico han sido por medio de diferentes técnicas tales como la prueba de rayado (*scratch*) y prueba de indentación, esta última, presenta ventajas como la capacidad de evaluar una amplia gama de materiales y recubrimientos, rapidez, relativa facilidad al realizar la prueba, fácil evaluación de resultados. Sin embargo, estas ventajas se ven afectadas por el tipo de resultados cualitativos, a pesar de ello, se han utilizado en diversas ocasiones sobre capas de boruros de hierro como se muestra en los siguientes trabajos:

Taktak. S *et al* (2005), realizan un estudio donde utilizando la norma VDI 3198 para evaluar la adhesión de las capas formadas a través del tratamiento de borurización en aceros AISI 304 y H13 a través de la identificación de las fallas por delaminación. Los resultados muestran que la adhesión de las capas boruradas en estos aceros, está en función del espesor de la fase *FeB* donde a mayor espesor de capa disminuye la adherencia, es decir, a tiempos largos y temperaturas altas de tratamiento la adherencia del sistema capa/substrato disminuye.

G. Rodríguez-Castro *et al* (2009) evalúa la adhesión de las capas de boruros de hierro sobre un acero 1045 borurado usando la norma VDI 3198, concluyen que la morfología aserrada de la capa *FeB*, incrementa la adhesión del sistema, además, las indentaciones realizadas mostraron grietas radiales en el perímetro de las indentaciones, lo cual, es atribuido a la fragilidad en las capas y una calidad aceptable de adhesión del sistema.

V. Sista, *et al* (2012) realizan pruebas de indentación Rockwell C para evaluar la calidad de las capas obtenidas en una superlación Inconel 600 borurada por el método de borurización electroquímica. Los resultados muestran que para tiempos de borurización que comprenden tiempos de 5 a 15 minutos de exposición la adherencia de las capas es cualitativamente aceptable.

Jiménez (2013) realizó un tratamiento de borurado por empaquetamiento en polvo en acero AISI 304 utilizando una temperatura de 950 °C y diferentes tiempos de exposición. Se realizó la prueba bajo los criterios de la normativa VDI 3198 en el acero borurado para evaluar la adherencia del recubrimiento teniendo como resultado que en tiempos cortos y medios (2 y



6 horas.) la adhesión fue aceptable, mientras que para tiempos largos la calidad del recubrimiento es insuficiente.

En diversos estudios se concluye que podría ser benéfico la presencia de una sola fase en el tratamiento de borurado puesto que en los sistemas bifásicos el comportamiento diferente (dureza, módulo de elasticidad, tenacidad a la fractura, resistencia a la fatiga y esfuerzos residuales) entre las capas generadas podría ser la causa de fallas en el sistema capa sustrato. Es por esta razón que diferentes autores proponen diferentes metodologías para obtener un sistema monocapa de boruros de hierro.

En Matuschka (1980) se propone un cambio de fase mediante una homogenización que se realiza a través de un proceso de recocido por difusión.

Una vez que se tiene el sistema de dos fases (FeB , Fe_2B) se lleva a cabo el proceso de recocido por difusión utilizando una mezcla de NaCl, KCl y aditivos fijadores de oxígeno. Reporta que FeB se descompone en favor de la fase Fe_2B , ocasionando que esta última se incremente.

Gopalakrishnan et al., (2002) propusieron una modificación al proceso de borurización por empaquetamiento en polvo al que llamaron “borurado interrumpido”, el cual consiste en la realización del proceso por ciclos térmicos de una hora a la temperatura normal de tratamiento. Como resultado de este proceso solo se genera un sistema monocapa en el cual solo existe presencia del sistema Fe_2B

Estos sistemas presentan una nueva área de investigación, ya que el sistema formado presenta nuevas características, tribológicas, mecánicas y químicas. Sin embargo, una propiedad que debe considerarse primordial a evaluar es la adhesión, ya que esta relacionada intrínsecamente con las otras propiedades mencionadas, y dependiendo de la calidad de adherencia dependerán las posibles aplicaciones.



JUSTIFICACIÓN

El acero AISI 316L es un material de uso común en diferentes áreas de la industria, ya que algunos de sus principales usos son en la fabricación de válvulas, tanques de almacenamiento de productos químicos, agitadores y evaporadores, condensadores, intercambiadores de calor, recubrimientos para hornos de calcinación e incluso como material biomédico comúnmente se encuentra como tornillos de sujeción para extremidades fracturadas, clavos, reemplazos de rodilla, tobillo, hombro y reemplazos totales de cadera. La razón de este tipo de aplicaciones es debido a su alta resistencia a la corrosión, capacidad para ser soldado, relativa facilidad de maquinado, aunado a un costo razonable y disponibilidad en el mercado. Sin embargo, incluso con todas estas características positivas, los ambientes y condiciones de operación no son las recomendables por lo cual el deterioro de la parte superficial del elemento se ve afectado reduciendo su vida útil productiva. Generalmente todos los daños en elementos de máquina que están sujetos a contacto mecánico, corrosión, desgaste y trabajos a alta temperatura, se genera en la superficie del elemento, por ello los tratamientos termoquímicos son una opción para disminuir el deterioro superficial e incrementar la vida útil de los componentes mecánicos.

El tratamiento de borurado en el acero 316L se ha llevado a cabo en el Grupo de Ingeniería de Superficies del Instituto Politécnico Nacional bajo diferentes condiciones y temperaturas de exposición teniendo como resultado sistemas bicapa (FeB / Fe_2B) y mono capa (Fe_2B) los cuales se han evaluado a partir de diferentes técnicas como la resistencia a la corrosión, desgaste por medio del método de multipass scratch y fatiga por contacto. Sin embargo una propiedad en la cual recae el éxito de cualquier recubrimiento es en la capacidad de mantenerse adherido al substrato ya que a partir de estos resultados está el tipo de aplicación, selección de trabajo adecuado y el objetivo primordial que es incrementar la vida útil.

El método de análisis de adherencia por medio de la normativa VDI 3198 determina la capacidad de adhesión de sistemas con recubrimientos teniendo como principales ventajas una relativa facilidad al realizar la prueba, rapidez en la obtención de resultados, además de una amplia capacidad de evaluar una extensa gama de recubrimientos y diferentes materiales. Sin embargo el tipo de resultado que se obtiene de esta prueba es del tipo cualitativo ya que el criterio de aceptación o rechazo de la adherencia está dada por medios ópticos, por lo que con el fin de complementar los resultados de la prueba de adhesión por indentación de manera cuantitativa el presente trabajo plantea la evaluación numérica experimental de la adhesión bajo el procedimiento de borurado continuo e interrumpido con



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION**



el fin de establecer el sistema que presenta mejor adherencia, así como también la contribución cuantitativa a partir de la evaluación numérica de la prueba.



OBJETIVO GENERAL

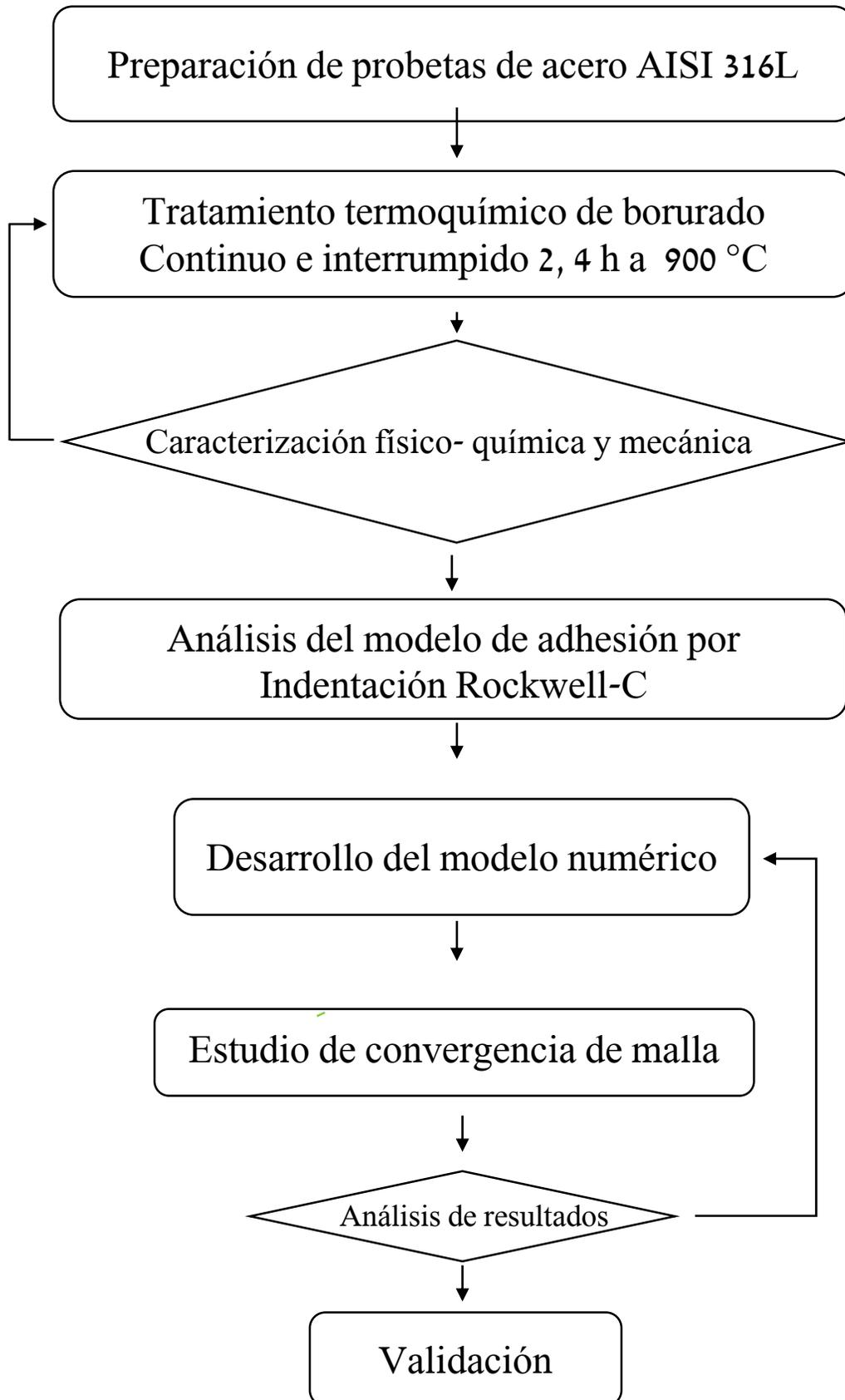
Determinar las propiedades de adhesión en un acero AISI 316L con tratamiento de borurado interrumpido y continuo mediante análisis numérico-experimental de la prueba de indentación Rockwell-C para analizar las diferencias entre los sistemas mono y bicapa formados en la superficie a través de los mecanismos de falla en los sistemas capa/substrato.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Endurecer superficialmente el acero 316L a través del tratamiento termoquímico de borurado en polvo interrumpido y continuo para formar un recubrimiento mono capa ($Fe_2B/substrato$) y bicapa ($FeB, Fe_2B/substrato$) respectivamente.
- Caracterizar las superficies de los materiales borurados a través de microscopía óptica para obtener los espesores de capa, la interfaz y zona de difusión.
- Realizar la caracterización físico-química y mecánica de las capas boruradas por medio de Difracción de Rayos X (XRD) para determinar la presencia de los compuestos característicos presentes en el recubrimiento, indentación instrumentada para determinar propiedades mecánicas del material base, así como del recubrimiento formado.
- Evaluar la adhesión del recubrimiento en el acero AISI 316L tratado mediante los criterios de la norma VDI3198 para obtener la carga crítica.
- Desarrollar un modelo numérico de indentación Rockwell-C por medio del software ABAQUS para analizar cuantitativamente en base a los esfuerzos principales los modos y mecanismos de falla en el sistema capa/substrato.



METODOLOGÍA



CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

En el presente capítulo se realiza una breve descripción del proceso termoquímico de borurización en polvo mediante los procesos continuo e interrumpido, de igual forma se mencionan las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los boruros de hierro (FeB , Fe_2B), también la importancia de la adherencia y la técnica de indentación Rockwell-C para la evaluación de la adherencia

1.2 Borurización

La borurización es un tratamiento termoquímico que modifica las propiedades superficiales de algunas aleaciones ferrosas y no ferrosas al difundir átomos de boro, los cuales se alojan en los sitios intersticiales de la estructura cristalina del material a través de energía térmica (figura 1), este tratamiento se puede llevar a cabo en medios sólidos, líquidos y gaseosos generando capas de boruros (I. Campos, 2013). El proceso de borurado es llevado a cabo a temperaturas entre 850 y 1000°C durante periodos desde 1 hasta 10 h. Algunas de las características que presentan los boruros de hierro son: alta resistencia al desgaste, abrasión, corrosión, a altas temperaturas, límite de fatiga, sin embargo la más relevante es la dureza que puede exceder los 20 GPa, Campos-Silva I, Rodríguez-Castro G, (2015). Las capas formadas en la superficie después del tratamiento, dependen del potencial de boro en contacto con la superficie del material, la composición química del sustrato, temperatura y tiempo de exposición, obteniendo como resultado, la formación de capas compuestas de una sola fase o dos, que son identificadas en la superficie del material tratado, la fase superior (FeB) y la fase interior (Fe_2B) (I. Campos, 2010).

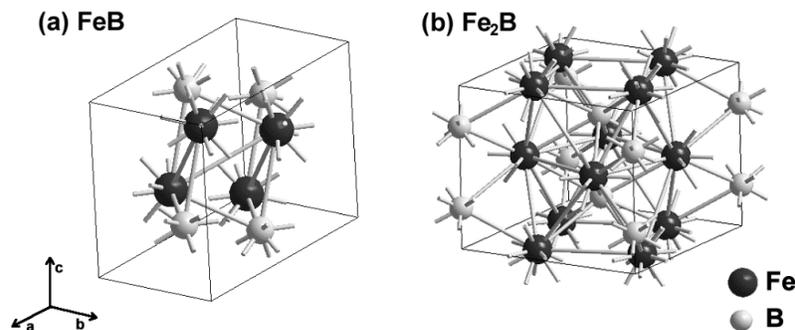


Figura 0.1. Estructura cristalina de los compuestos a) FeB b) Fe_2B

Algunas de las ventajas del proceso de borurado se mencionan a continuación:

- Amplia gama de materiales ferrosos y no ferrosos compatibles con el proceso.
- Capas con durezas superiores en comparación a otros tratamientos termoquímicos en rangos de 1500 a 2000 HV.
- Los compuestos de boruros mantiene su dureza a altas temperaturas.
- Incremento en la resistencia en propiedades tales como desgaste abrasivo, corrosivo, oxidación, trabajo en caliente y tenacidad a la fractura.
- Bajo coeficiente de fricción mejorando el comportamiento bajo condiciones de desgaste como tribo-oxidación, abrasión y fatiga (J.R. Davis, 2002).

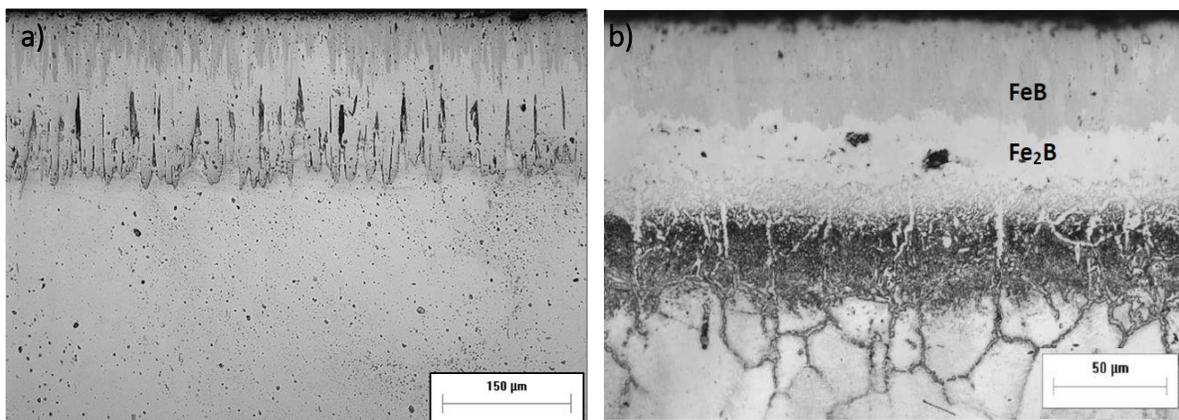


Figura 0.2 Metalografías de aceros a) AISI 4140 (Márquez Cortes, 2016) y b) AISI 316L (Bravo Bárcenas, 2010).

La morfología de las fases que forman las capas de boruros de hierro tiene una estrecha relación con los elementos de aleación del material sustrato. En hierros puros y aceros de bajo y medio carbono la morfología de las capas es del tipo aserrada como se observa en la Figura 2 a), sin embargo, cuando el contenido de carbono u otros elementos de aleación empiezan a incrementarse, las aserraciones y el espesor de la capa de los boruros disminuye.



Elementos tales como níquel y cromo, en concentraciones mayores al 9 y 6% en peso, respectivamente, favorecen la formación de boruros con interfaces planas figura 2 b).

Para el presente trabajo se utilizara un acero AISI 316L cuya composición química se muestra en la tabla 2.

Tabla 0.1 Composición química del acero AISI 316L

Composición química del acero AISI 316L Wt%							
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
0.03	16 - 18	10-14	2 - 3	2	1	0.045	0.03

Algunas cualidades que le confieren cada elemento a la aleación durante el proceso de borurado se presentan a continuación:

- **Carbono:** No se disuelve de manera significativa en las capas de boruros y no difunde a través de ella. Durante el borurado es impulsado (o difundido) de la capa hacia el sustrato, donde con el boro puede formar borocementita $Fe_3(B, C)$ como una capa intermedia entre Fe_2B y el sustrato.
- **Cromo:** Eleva la resistencia a la corrosión, modifica la estructura y propiedades de los compuestos de hierro y boro. Además, un mayor contenido de cromo resulta en un decremento en el espesor de la capa, así como aplanamiento o suavizado de la interfaz capa/sustrato.
- **Molibdeno:** Sirve para desoxidar al acero (eliminar impurezas de óxidos de hierro). Su presencia incrementa la solubilidad del carbono en la austenita, y con ello favorece la formación de carburos. Incrementa la resistencia a la tracción, el límite elástico, la resistencia a la fatiga y a la fluencia, la forjabilidad, la resistencia al desgaste, la templabilidad, la resistencia al revenido y la dilatación térmica. El aumento de este elemento produce una reducción en el espesor y la estructura aserrada de las capas.
- **Manganeso:** Incrementa la resistencia a la tracción, el límite elástico, la resistencia a la fatiga y a la fluencia, la forjabilidad, la resistencia al desgaste, la templabilidad, la resistencia al revenido y la dilatación térmica. Se difunde en la superficie durante el borurado y está localizado en la zona FeB . Sirve para desoxidar al acero (eliminar impurezas de óxidos de hierro). Su presencia incrementa la solubilidad del carbono en la austenita, y con ello favorece la formación de carburos.



- **Silicio:** Este elemento aumenta la resistencia mecánica en caliente, la resistencia a la corrosión y a la oxidación. Durante el borurado, éste se disuelve dentro del núcleo del acero, enriqueciendo la zona de la fase α y promoviendo la formación de tres zonas en la capa (Boruros, fase α , y zona de transición) las cuales se diferencian entre si por su composición, además de tener efectos sustanciales en las propiedades del caso de los boruros. Este elemento es desplazado por el boro a la superficie por encima de la capa, debido a que no es soluble,
- **Níquel:** se homogeniza el espesor de capa, se disuelve en Fe_2B , en algunos casos provoca precipitación de Ni_3B . A mayor concentración de Ni, menor es el espesor de capa y hace más plana la interface.

1.2.1 Borurización en caja

El proceso de borurización en polvo o en caja es uno de los procesos más usados, debido al relativo bajo costo y facilidad al realizar el tratamiento, mediante este proceso se tiene la posibilidad de variar los porcentajes de los compuestos activos, además de poder utilizar materiales ferrosos y no ferrosos. (ASM Internationa, 2002)

El proceso consiste en introducir la pieza a borurizar en un contenedor de acero sellado y resistente al calor, generalmente manufacturado en acero inoxidable, previamente saturado y en su interior, contenga tanto la probeta como una mezcla de sales en polvo como se muestra en la figura 3.

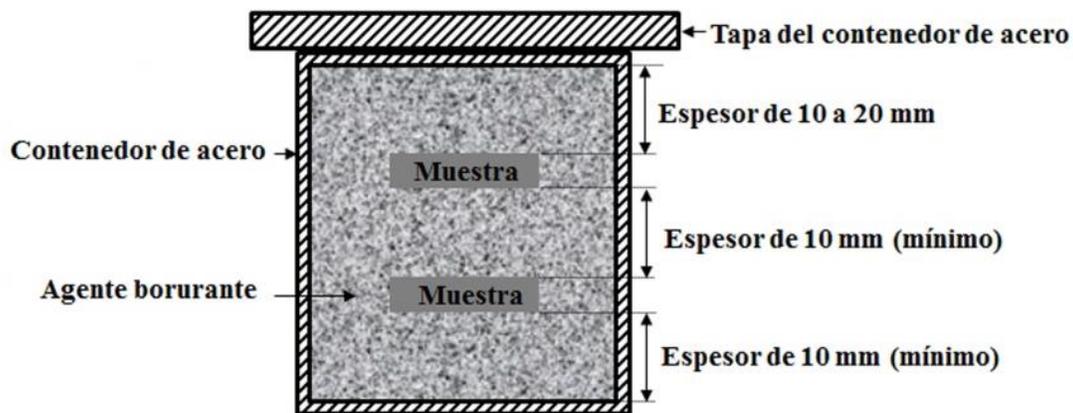


Figura 0.3 Esquema de tratamiento de borurado en polvo.

Las sales o agentes borurantes más comúnmente utilizados están basados en carburo de boro activo, la presentación de estos, es generalmente en polvo, con diferente granulometría e incluso en pasta. Los trabajos realizados en el Grupo de Ingeniería de Superficies se utilizan agentes borurantes de la marca **EkaborTM** cuyas presentaciones se pueden observar en la tabla 1.2.



Tabla 0.2 Características generales de los agentes borurantes de la marca *Ekabor™*

Agente	Tamaño de grano	Características
EKABOR™ 1	<150 μm	Alta calidad de capa en la superficie.
EKABOR™ 2	<850 μm	Muy buena capa superficial; el sustrato es fácil de desempacar después del tratamiento.
EKABOR™ 3	<1400 μm	Buena capa superficial; el polvo aún tiene buenas propiedades después del tratamiento.
EKABOR™ HM	<150 μm	Para metales muy aleados, ofrece capas muy gruesas en barrenos muy pequeños.
EKABOR™ Pasta	---	Aplicaciones universales: inmersión, aplicado con brocha y aspersion.
EKABOR™ Ni	<150 μm	Para borurización en metales base níquel

Las capas formadas están estrechamente ligadas a cuatro factores que afectan el crecimiento de estas, composición química del sustrato, tiempo de exposición, potencial de boro del agente borurante y temperatura del tratamiento (Bindal et al., 2008). Como resultado del tratamiento se obtiene capas cuyas morfologías dependen de la composición química del material base, sin embargo las propiedades mecánicas de las capas muestran un comportamiento característico como se muestra en la tabla 1.3

Tabla 0.3 Propiedades de los compuestos de boruros de hierro (Matuschka, 1980).

Propiedades	<i>FeB</i>	<i>Fe₂B</i>
% Peso en boro	16.23%	8.83%
Estructura cristalina	Ortorrómica, 4 átomos de Fe y 4 de B por celda	Tetragonal centrada al cuerpo con 12 átomos por celda
Parámetros de celda unitaria	a=4.053 Å, b=5.495 Å, c=2.946 Å	a=5.078 Å, c=4.249 Å
Densidad (g/cm ³)	6.25	7.43
Coefficiente de expansión térmica (ppm/K)	23 en un rango de 200 a 873 K	7.65 - 9.2 en un rango de 373 a 1073K
Módulo de elasticidad (GPa)	590	285 - 295



Resistencia a la fatiga		Puede incrementar hasta en un 33% para capas con espesores mayores a $40 \mu\text{m}$ (185 a 245 Nmm^2)
Dureza (GPa)	18 - 22	17 - 19

Debido a que los aceros de baja aleación y bajo carbono presentan características poco aptas para trabajos de contacto mecánico por su baja resistencia al desgaste o a ambientes corrosivo, trabajos en caliente, etc. por medio del proceso termoquímico de borurado han mejorado sus características, algunas investigaciones como la realizada por Sánchez Islas 2016 quien reporta que después de un tratamiento de borurado y posteriormente sometido al proceso de recosido por difusión forma sistemas monocapa y bicapa sobre la superficie de in acero 1018, a los cuales somete a la prueba de perno sobre disco, obteniendo como resultado la mejora considerable de la resistencia al desgaste para ambos sistemas, esto se atribuye a la disminución del coeficiente de fricción y a la alta dureza del recubrimiento formado.

Por su parte Mejía Caballero también evalúa la resistencia a la corrosión de un acero de bajo carbono (AISI 1018) tratado mediante el proceso de borurado por empaquetamiento en polvo, el cual fue evaluado mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica con tiempos largos de inmersión (43 días) obteniendo como resultado una mejora relevante con lo cual estos materiales con recubrimiento podrían ser usados industrialmente prolongando la vida de los componentes que estén expuestos a ambientes agresivos.

Para los aceros de alta aleación que presentan mejores características para trabajos en caliente, ambientes corrosivos, desgaste por contacto mecánico, entre otros, presentan fallas que se deben a la exposición a ambientes que exceden sus capacidades físico-químicas.

El estudio realizado por H Mindivan, 2013, utilizando un acero Hardox 400 concebido para aplicaciones que exigen resistencia al desgaste es tratada mediante un proceso de nitruración en sales, posterior al tratamiento fue sometido al proceso de borurado en polvo de tal manera que la capa superficial fuera una composición de nitruros y boruros de hierro con el fin de determinar el mejoramiento de la superficie a los efectos del desgaste, la evaluación de la superficie se llevó a cabo mediante la técnica de desgaste recíprocante obteniendo como resultado, que las capas formada por los tratamientos presentan un incremento en la dureza superficial la cual se vio reflejada en la disminución del coeficiente



de fricción, y en la tasa de desgaste con lo cual el comportamiento se ve significativamente mejorado.

Otro ejemplo de ello es el acero 316L cuyas propiedades lo hacen ideal para trabajos a alta temperatura y en ambientes corrosivos, haciéndolo idóneo como prótesis quirúrgica, sin embargo, en algunos casos este presenta fallas debido a que durante la operación del equipo o elemento este está sujeto a condiciones que combinan diferentes fenómenos que disminuyen el tiempo de vida útil.

Un estudio realizado por M. kulka et. al., 2016 menciona que para el acero inoxidable 316L presenta fallas cuando es utilizado como implante quirúrgico, este fenómeno lo atribuye a la relativa baja dureza (1961 GPa), debido a que el implante se encuentra sometido a fenómenos combinados de desgaste y corrosión. El estudio consiste en evaluar la resistencia a la corrosión y al desgaste después de un tratamiento de borurado, del cual se obtiene espesores de capa 200 y 230 μm formadas principalmente del compuesto Fe_2B . Los recubrimientos fueron evaluados mediante diferentes técnicas las cuales consistían en la resistencia a corrosión y desgaste. Concluyendo que para la resistencia a la corrosión el recubrimiento si tenía una mejora pero no muy relevante, sin embargo para la resistencia al desgaste mejora mucho la calidad debido a la dureza de la capa depositada (7846 GPa).

Otro estudio realizado sobre el mismo material fue el realizado por Bernabé Molina 2015 donde estima la adhesión del sistema capa/substrato formado a partir de borurización en polvo empleado la técnica de rayado (*scratch*) evaluando sistemas monocapa y bicapa. Como resultado del trabajo se obtuvieron los sistemas bicapa comúnmente generados por el proceso de difusión por empaquetamiento y posterior al tratamiento realizó un proceso de recosido por difusión en el cual se obtuvo un sistema monocapa, al evaluar la adherencia el sistema bicapa presentó fallos del tipo adhesivos con desprendimiento, los cuales se atribuyeron a la formación de la capa superficial de compuesto de boruro FeB con mayor dureza y esfuerzos del tipo tensiles, en caso contrario las probetas con un recubrimiento monofásico generado principalmente del compuesto Fe_2B presentan fallas del tipo cohesivo, sin desprendimiento.

A pesar de las características de las capas de boruros algunos autores tales como Sinha, 1991, Jiménez-Piqué et al., 2005, Bernabé Molina 2015, mencionan que sería más



conveniente la presencia de la fase Fe_2B cuyas características mecánicas presentan menor fragilidad y esfuerzos del tipo compresivos.

A partir de estos estudios diversos autores proponen diferentes métodos mediante los cuales se pueden obtener sistema monocapa del compuesto Fe_2B , algunos de los cuales se mencionan a continuación.

En Matuschka (1980) se propone un cambio de fase mediante una homogenización que se realiza a través de un proceso de recocido por difusión (PRD).

Una vez que se tiene el sistema de dos fases (FeB / Fe_2B) se lleva a cabo el proceso de recocido por difusión utilizando una mezcla de NaCl, KCl y aditivos fijadores de oxígeno. Reporta que FeB se descompone en favor de la fase Fe_2B , ocasionando que esta última se incremente.

Por su parte G. Kartal et, al. (2011), proponen un método mediante el cual se genera la capa del compuesto Fe_2B , el método es nombrado como “homogeneización de fase del tratamiento electroquímico de borurado” el cual utiliza un flujo de corriente de 200 mA/cm^2 , y tiempos cortos de exposición, generando capas bifásicas y posteriormente sometidas a la fase de homogenización, con la cual se disuelve la fase FeB en solo el compuesto Fe_2B .

Otro método fue el propuesto por Gopalakrishnan et al. (2002) al cual nombro como proceso de borurado interrumpido del cual se obtiene un sistema monocapa al finalizar el tratamiento sin la necesidad de un tratamiento posterior y que será utilizado en esta investigación.

1.2.2 Borurado Interrumpido

El borurado interrumpido es una variable del proceso de borurado en caja propuesto por Gopalakrishnan et al. (2002) el cual tiene como objetivo obtener una capa con solo el compuesto Fe_2B .

La preparación de la muestra presenta las mismas condiciones al de borurado en caja, que consiste de colocar la probeta dentro del contenedor, de tal forma que esta, quede rodeada de agente borurante.

Finalizada la preparación del contenedor introdujo este mismo dentro de un crisol de grafito y rodeado de una capa de arena sílice, donde considero que el contenedor estuviera al centro del crisol.

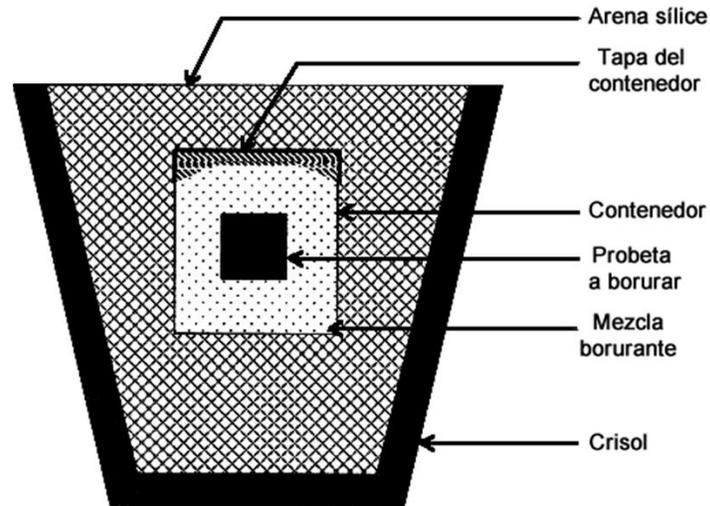


Figura 0.4 Configuración empleada en el proceso de borurado interrumpido

Una vez que se tuvo lista la configuración de la Figura 4, la coloqué dentro de un horno y cuando alcanzó la temperatura de tratamiento comencé a contar una hora. Al término de la hora la retiré del horno y la dejé enfriar al aire libre hasta aproximadamente 600 °C. Después nuevamente coloqué el crisol dentro del horno y al alcanzar la temperatura empleada en el proceso comencé a medir otra hora. Este procedimiento lo repetí en cuatro ocasiones para completar un proceso de 4 horas de tratamiento, después de la última hora de exposición se retiré del horno y la dejé enfriar al aire libre hasta 600°C aproximadamente, entonces la coloqué en otro horno a 600 °C durante una hora más para después dejar enfriar. La figura 5 representa el ciclo térmico empleado.

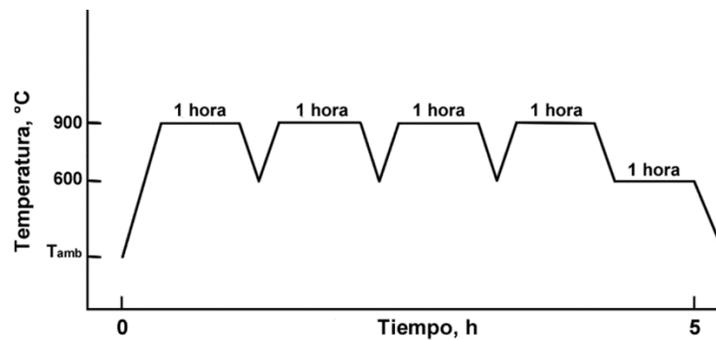


Figura 0.5 Representación del ciclo térmico de borurado interrumpido.



Como resultado de estos procesos se obtienen sistemas formados por (FeB/Fe_2B) y sistemas del tipo (Fe_2B) los cuales presentan diferentes propiedades químicas y mecánicas.

Recientemente algunos trabajos desarrollados bajo los tratamientos termoquímicos anteriormente mencionados están:

(Vega Morón, 2015) Realizo un estudio el cual consistió en evaluar bajo condiciones de desgaste por deslizamiento a través de la prueba de multipass scratch recubrimientos de boruros de hierro generados sobre la superficie de un acero inoxidable AISI 316L. Los sistemas analizados se generaron a través de seis condiciones diferentes, inicialmente se formaron recubrimientos utilizando el proceso de borurado en polvo con tiempos de exposición de 2, 4 y 6 horas de exposición a temperaturas de tratamiento de 900 y $950^{\circ}C$ obteniendo como resultado sistemas bicapa, para la temperatura de $900^{\circ}C$ obtuvo espesores de capa totales desde $10 \mu m$ para 2 horas hasta $28 \mu m$ para 6h de exposición y para la temperatura de $950^{\circ}C$ obtuvo $20 \mu m$ para 2 horas hasta un espesor máximo de $35 \mu m$ para el tiempo de 6 horas. Durante el proceso de borurado interrumpido los sistemas formados en la superficie del material presentan una reducción en el crecimiento de la capa total, además de que la reducción del tamaño de la capa FeB tiene porcentaje de menor al 50% en relación con el espesor total, a diferencia del tratamiento continuo cuya relación de capa FeB van desde 50% hasta 70 %. Bajo las condiciones de $900^{\circ}C$ en el borurado interrumpido los espesores de capa total van desde $5.83 \mu m$ hasta $9.51 \mu m$ entre los tiempos de 2 a 6 horas siendo en esta temperatura para el tiempo de exposición de 4 horas el único que presenta un sistema monocapa formado únicamente por el compuesto Fe_2B . Para la temperatura de $950^{\circ}C$ los espesores totales de los sistemas van desde $8.45 \mu m$ a $15.05 \mu m$ en tiempos que van desde 2 a 6 horas de tratamiento. Cabe mencionar que para esta temperatura no se tiene como resultado un sistema monocapa para ningún tiempo de tratamiento. Finalmente como conclusión en análisis de adhesión los sistemas formados bajo tratamiento continuo presentan daño adhesivo durante el recorrido del indentador y esto se atribuye al espesor de la capa FeB cuya fragilidad no permite la absorción de energía por deformación traducida en la fractura y desprendimiento del recubrimiento, en contraste con los resultados anteriormente obtenidos, los tratamientos interrumpidos al generar una menor presencia de la fase superior FeB o incluso la ausencia de esta, presentan mejores condiciones las cuales se atribuyen al espesor de capa mayormente formada por la fase Fe_2B cuyas características mecánicas presentan menor fragilidad y una mayor elasticidad, por lo cual los resultados de la prueba muestran un mejor comportamiento ya que solo el daño causado por el indentador en el canal de rayado es del tipo cohesivo.

Por su parte (Vasquez de la Rosa) Realizo un análisis de fatiga por contacto en boruros de hierro utilizando como material base el acero inoxidable AISI 316L tratado de manera



continua e interrumpida con el fin de analizar el daño producido en los sistemas formados utilizando impactos repetitivos en la superficie del material tratado, con el objetivo de evaluar el efecto de la capas de boruros en la vida a fatiga. Se evaluaron dos sistemas generados, uno a partir de tratamiento continuo, el cual fue realizado a una temperatura de 900°C con un tiempo de tratamiento de 1 hora obtenido como resultado un sistema bifásico con un espesor total de capa de 12 μm , el segundo se realizó a través del proceso de borurado interrumpido con un tiempo de exposición de 4 horas a una temperatura de 900°C, el resultado fue un sistema monofásico con espesor de capa de 5.5 μm . El procedimiento de esta investigación comienza determinando la carga estática crítica del recubrimiento la cual se obtiene a partir de una indentación y la generación de una grieta radial en el recubrimiento. Posteriormente se aplicaron cargas menores de manera repetitiva con el fin de evaluar el daño acumulado en el sistema capa/substrato. De acuerdo a los resultados obtenidos el tratamiento que generó más resistencia a grietas radiales fue el tratamiento interrumpido, cuya carga crítica estática fue de 800N superando a la carga de 700N para el tratamiento continuo. La evaluación a fatiga se realizó aplicando una carga inferior a la crítica durante algunos ciclos evaluando así la capacidad del recubrimiento. Finalmente después de la evaluación a fatiga los resultados muestran un mejor rendimiento del tratamiento interrumpido ya que esta presenta una mayor tolerancia a las cargas repetitivas sin presentar agrietamiento radiales los cuales están por encima de los 100,000 ciclos a cargas de 300N, sin embargo para el caso del tratamiento continuo la resistencia se ve afectada ya que para la misma carga de 300N soporta alrededor de solo 50,000 ciclos, estos resultados muestran la influencia de la capa frágil FeB en la disminución de la vida a fatiga.

1.3 Adherencia

Como ya se ha expuesto con anterioridad los beneficios del tratamiento termoquímico de borurado son variados, sin embargo la adherencia es la responsable de que estas características mecánicas y químicas puedan emplearse en algún procedimiento en ingeniería, puesto que el desarrollo y la vida del recubrimiento están limitados por la fuerza de adhesión en el sistema capa/substrato.

Para ello se emplean técnicas diferentes las cuales permiten estimar las cargas críticas a través de distintas pruebas mecánicas en donde se evalúan la adhesión o daño en la capa, como la resistencia al desgaste, impactos, contacto mecánico, etc.



El análisis de la adhesión por medio de indentación para la evaluación de recubrimientos superficiales, se deriva de un ensayo de dureza Rockwell. La escala C para esta prueba se deriva del tipo de dureza a evaluar, ya que para los materiales con recubrimientos superficiales, las capas superan una dureza de 100 Rockwell B como se muestra en la tabla #.

Tabla 0.4 Campos de aplicación de cada escala Rockwell-C (NMX-B-119-1983)

Escala de dureza Rockwell	Tipo de penetrador	Carga mayor (N) (Kgf)	Intervalos en que generalmente se utiliza	Aceros en los que generalmente se utiliza
A	Diamante	588 (60)	20-90 DRA	Aceros endurecidos superficialmente, laminas delgadas y duras.
C	Diamante	1470 (150)	20-70 DRC	Aceros de dureza mayor a 100 DRB Aceros endurecidos profundamente. Hierro maleable perlítico.
D	Diamante	981 (100)	30-85 DRD	Láminas de acero. Aceros endurecido semisuperficialmente.
B	Penetrador esférico de 1.588 mm	981 (100)	57-100 DRB	Aceros recosidos y normalizados.
E	Penetrador esférico de 3.175 mm	981 (100)	50-100 DRE	Aceros muy blandos de espesor delgado.
F	Penetrador esférico de 1.588 mm	588 (60)	50-100 DRF	Aceros muy blandos de espesor delgado.



La gama de materiales a evaluar con respecto a la Normativa VDI 3198 es muy amplia, sin embargo de acuerdo a los criterios de dureza Rockwell los especímenes o probetas deben de cumplir con 2 características las cuales se mencionan a continuación:

1.- Condiciones de la superficie

Las muestras deberán de ser lo más planas posibles para evitar un deslizamiento durante el proceso de indentación, evitando probetas pandeadas, sin embargo en casos donde la pieza presente este tipo de defecto el lado cóncavo será posicionado hacia arriba en contacto con el indentador para así tomar una lectura donde la deformación de la irregularidad de la superficie no afecte.

2.- Espesor

Las pruebas de dureza Rockwell de mayor exactitud se hacen en probetas de suficiente espesor, de modo que la lectura Rockwell no se afecte considerablemente por el soporte de la máquina de prueba. La ausencia de un abultamiento u otra marca en la superficie de la probeta, en el lado opuesto a la huella, indica que la probeta es de un espesor lo suficientemente grueso para realizar una prueba con precisión.

La normativa DVI 3198 es calificada como una prueba destructiva en la cual a través de una indentación generada por un durómetro Rockwell-C (figura 6) y un indentador cónico con radio de punta de $200\mu\text{m}$ sobre una superficie plana se analizan recubrimientos formados por sistemas monocapa o policapas, la interacción del indentador con la superficie de la muestra induce una deformación plástica sobre el substrato que se refleja en la huella y la fractura del recubrimiento, como resultado de esta interacción se exhiben dos propiedades del recubrimiento la primera la fuerza de adhesión y segunda su fragilidad, esto se produce ya que en el momento del contacto, la geometría del indentador en combinación con la carga aplicada, induce esfuerzos cortantes en el área de interface lo cual produce la fractura o astillamiento del recubrimiento.

El resultado de la prueba se define como adhesión práctica ya que está en función de la magnitud de una fuerza o energía mecánica necesaria para romper el enlace adhesivo, ya que también existe la adhesión fundamental, que está relacionada con la energía o fuerzas enlazantes de la interface entre dos capas, determinada por el enlace químico entre las capas. (Campos Silva, et al., 2011)



Figura 0.6 Durometro para indentacion Rockwell-C

Una buena adherencia del recubrimiento resiste los esfuerzos cortantes a diferentes cargas incluso al aplicar la carga máxima de 150 kilogramos fuerza sin presentar delaminación y previniendo la propagación por medio de grietas radiales.

Al término de la prueba mecánica se evalúan las huellas por medio de microscopia óptica para así establecer según los criterios de la normativa (figura 7) el tipo de adherencia que puede ser aceptable o insuficiente según el sistema evaluado (Vidakis, *et al*, 2003).

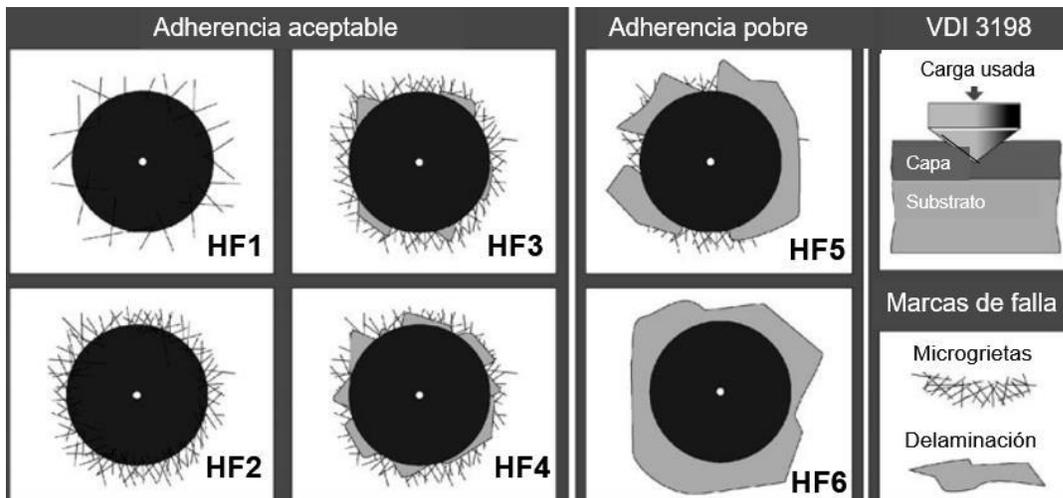


Figura 0.7 Criterios de evaluación de la normativa VDI 3198



Algunos trabajos que evalúan la calidad de adhesión mediante esta técnica se mencionan a continuación:

W. Heinke et. al., (1995) analiza la calidad de diferentes recubrimientos (TiN, CrN y Cr₂N) depositados mediante la técnica de deposición física de vapores (PVD) por sus siglas en inglés, sobre un acero SAE 52100, por medio de la prueba de adhesión por indentación Rockwell-C. el sistema formado por TiN fue el que mejor comportamiento obtuvo ya que solo presenta una adherencia aceptable y una mejora en la resistencia al desgaste dinámico.

N. Vidakis et. al., (2003) evalúa la adhesión de sistemas con recubrimientos depositados mediante la técnica de deposición física de vapores (PVD) en diferentes espesores con el objetivo de describir la metodología y los beneficios de la prueba de adhesión por indentación Rockwell-C

Algunos estudios realizados sobre superficies tratadas por el método de borurización utilizando la evaluación de la Norma VDI 3198 son mencionados a continuación.

(Sukru Taktak et al. 2005) Realizaron un estudio acerca de las fallas por delaminación en aceros base cromo endurecidos superficialmente mediante el tratamiento de borurado en sales con tiempos de exposición de 3, 5 y 7 horas con un rango de temperaturas que van desde los 800, a 950°C. El objetivo general de la investigación es la identificación de las fallas por delaminación producidas durante la prueba de adhesión por indentación Rockwell-C. Los sustratos fueron aleaciones base cromo (AISI H13 y AISI 304) cuya composición química presenta un contenido de porcentaje en peso de cromo de 5 al 18% respectivamente. Después del proceso de borurado se formaron 4 sistemas diferentes para cada tiempo de exposición y acero, los cuales presentan sistemas del tipo bifásico, las capas generadas fueron caracterizadas mecánicamente con el fin de obtener un perfil de durezas para cada condición de tratamiento sobre ambos sustratos. Al realizar la prueba de adhesión por indentación sobre los recubrimientos, se generaron huellas las cuales fueron clasificadas según los criterios de falla de la norma. La siguiente parte de la investigación involucro el análisis de las huellas producidas por el indentador a través microscopia atómica de barrido para determinar el tipo de daño generado sobre la capa. Como resultado de la evaluación de la adhesión según los criterios de la norma VDI 3198, la resistencia a la fractura de las capas de boruro disminuyó con el aumento de la dureza y el crecimiento de fase *FeB*, la adhesión decrementa para tiempos largos de exposición y temperaturas altas.

G. Rodríguez Castro et. al., (2009) evalúan las propiedades mecánicas de un acero AISI 1045 tratado mediante el proceso de borurado, a una temperatura de 950°C durante 8 horas de tratamiento continuo obteniendo un sistema monocapa formado principalmente del



compuesto de Fe_2B con un espesor aproximado de $200\mu m$, el objetivo principal del estudio fue evaluar la resistencia a la fatiga por la prueba de viga rotatoria, como complemento a este estudio se analiza la adherencia por medio del análisis de indentación Rockwell-C, finalmente los resultados del trabajo muestran que la resistencia a la fatiga del material borurado presenta una disminución comparado con la muestra sin tratamiento, este comportamiento se atribuyó a la presencia de esfuerzos residuales compresivos situados a lo largo de la capa y a los esfuerzos ténsiles que se encuentran por debajo de la capa los cuales mantienen el equilibrio, para el análisis de adhesión, el sistema formado presenta suficiente adhesión de acuerdo a los criterios de la norma VDI 3198, la cual es atribuida a la morfología acerrada de la capa.

(Jiménez Tinoco, 2013) desarrollo una investigación acerca de la adherencia del sistema capa/substrato de recubrimientos duros formados por difusión de boro en un acero inoxidable AISI 304 tratado mediante el proceso termoquímico de borurización bajo condiciones variables de tiempo y temperatura constante. Posterior proceso de borurado realizo una caracterización físico-química y mecánica la cual se llevó a cabo en las fases de boruros formadas en la superficie del material substrato, iniciando por la caracterización óptica por medio de la cual se determinan los espesores de capa que van desde 13 a $44\mu m$ con una morfología con tendencia plana atribuida a la composición química del material base. Los compuestos presentes en las capas fueron determinados por las técnicas de difracción de rayos-x (XRD) y espectrometría de energía dispersiva (EDS) mostrando una correcta formación de las capas de boruros en el acero después del tratamiento. La caracterización mecánica se llevó a cabo mediante la técnica de indentación instrumentada utilizando un indentador tipo Berkovich. Para el desarrollo del tema central de la investigación (Análisis de la adherencia) fue hecho por dos métodos de prueba uno cualitativo y otro semi cuantitativo. La prueba de adhesión Rockwell C fue empleada para determinar la fuerza de adhesión de las capas de boruros y mecanismos de falla. Los resultados muestran un decremento en la fuerza de adhesión de las capas en tiempos largos de tratamiento. Por otro lado, la prueba de scratch fue desarrollada con incrementos de carga para determinar cargas críticas, coeficientes de fricción, mecanismos de falla y energías de adherencia. Como resultado se observó un decremento de la fuerza de adhesión del sistema para tiempos largos de tratamiento, las cargas críticas se generaron en un rango de 35 a 43 N para fallas por astillamiento en tiempos de 2 y 6 h de tratamiento, mientras que en tiempos de 10 h las cargas críticas fueron del orden de 27 N para fallas por delaminación. Finalmente los resultados obtenidos presentan similitud en comportamiento de adherencia en los sistemas estudiados.



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCULA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION**



CAPITULO 2.- ENDURECIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS BORUROS DE HIERRO FORMADOS EN EL ACERO AISI 316L

1.4 Introducción

En el capítulo II se describe el desarrollo experimental de tratamiento termoquímico de borurado en sus dos modalidades (continuo e interrumpido), bajo las condiciones de tratamiento 2 y 4 horas de exposición a una temperatura constante de 900°C . Posterior a los tratamientos se realizó la caracterización óptica, físico-química y mecánica de las capas con el fin de verificar su correcta formación mediante los análisis de microscopía óptica, difracción de rayos X, EDS, microscopía atómica de barrido y nanodontación.

1.5 Proceso de borurado continuo en el acero AISI 316L

Para la realizar el tratamiento termoquímico de borurado se cortaron probetas de un redondo pulido de acero 316L cuya composición química se encuentra en la tabla 3, el diámetro fue de 38mm y con un espesor de 5mm. Las probetas se pulieron a partir de lijas de SiC desde grano 80 hasta llegar al grano 5000, para finalmente recibir el acabado espejo puliendo con silica como se muestra en la figura 8.

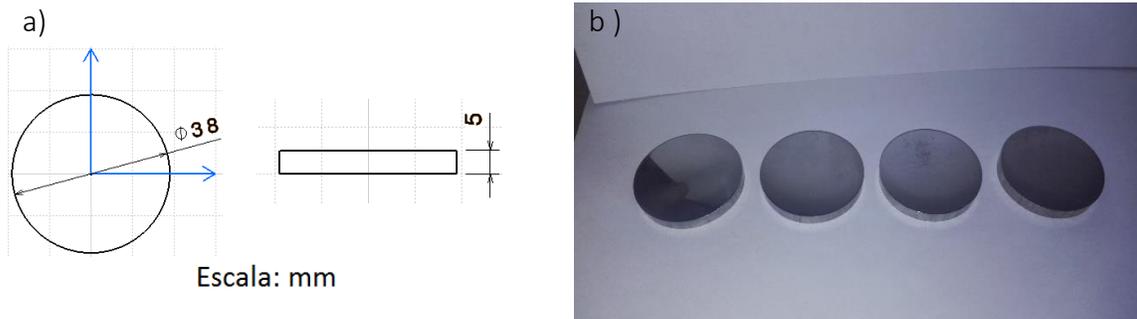
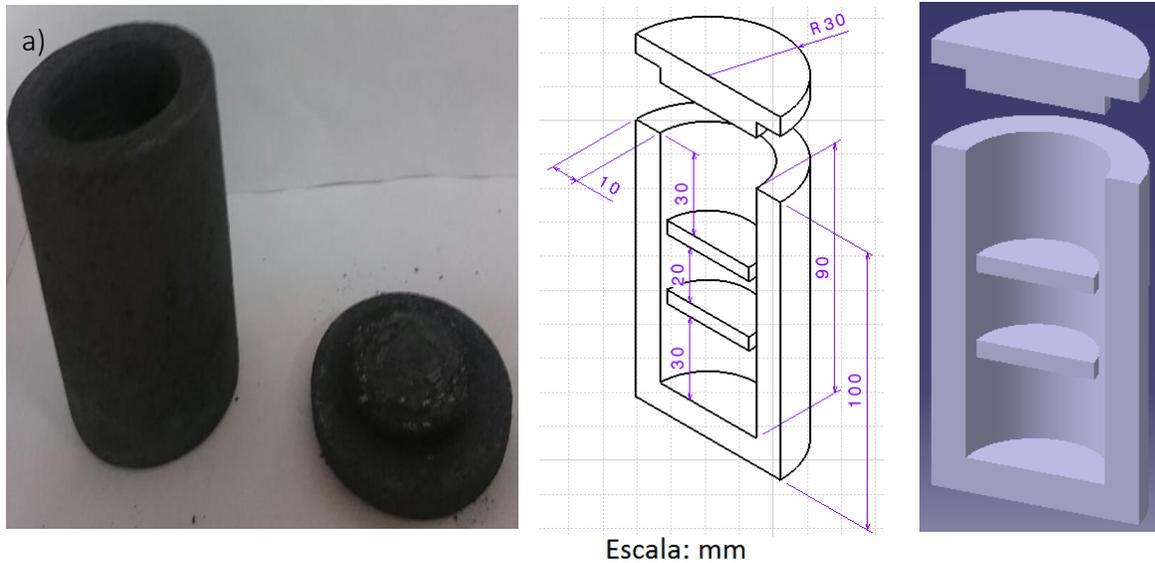


Figura 0.1 a) vistas superior y lateral acotadas de probetas de acero AISI 316L y b) acabado final de probetas

Los tratamientos se realizaron en un contenedor cilíndrico de acero inoxidable AISI 304 cuyas medidas se muestran en la figura 9. Las muestras fueron introducidas dentro del contenedor posicionándolas de tal manera que quedaran rodeadas con el agente borurante Ekabor®2, teniendo en cuenta que la capa debe de tener un espesor mínimo de un centímetro a su alrededor.



Una vez listas las probetas dentro del contenedor, este se colocó en un horno Felisa FE-361 desde una temperatura ambiente y posteriormente se programó para alcanzar la temperatura de 900°C cuando se alcanzó la temperatura deseada, se comenzó a tomar el tiempo de exposición que fueron de 2 y 4 horas, al término del tiempo de tratamiento estas fueron retiradas y enfriadas a temperatura ambiente.

1.6 Proceso de borurado interrumpido

Para esta variación del proceso de borurado por empaquetamiento en polvo el modo de preparación tanto para probetas y el contenedor son idénticas al proceso continuo, sin embargo una vez terminada la preparación del contenedor es necesario introducirlo dentro de un crisol de grafito y cubierto de arena sílice de modo que el contenedor quede en el

centro del crisol como se muestra en la figura 10, considerando que la tapa del contenedor tenga una distancia hacia la superficie de 80 mm aproximadamente.

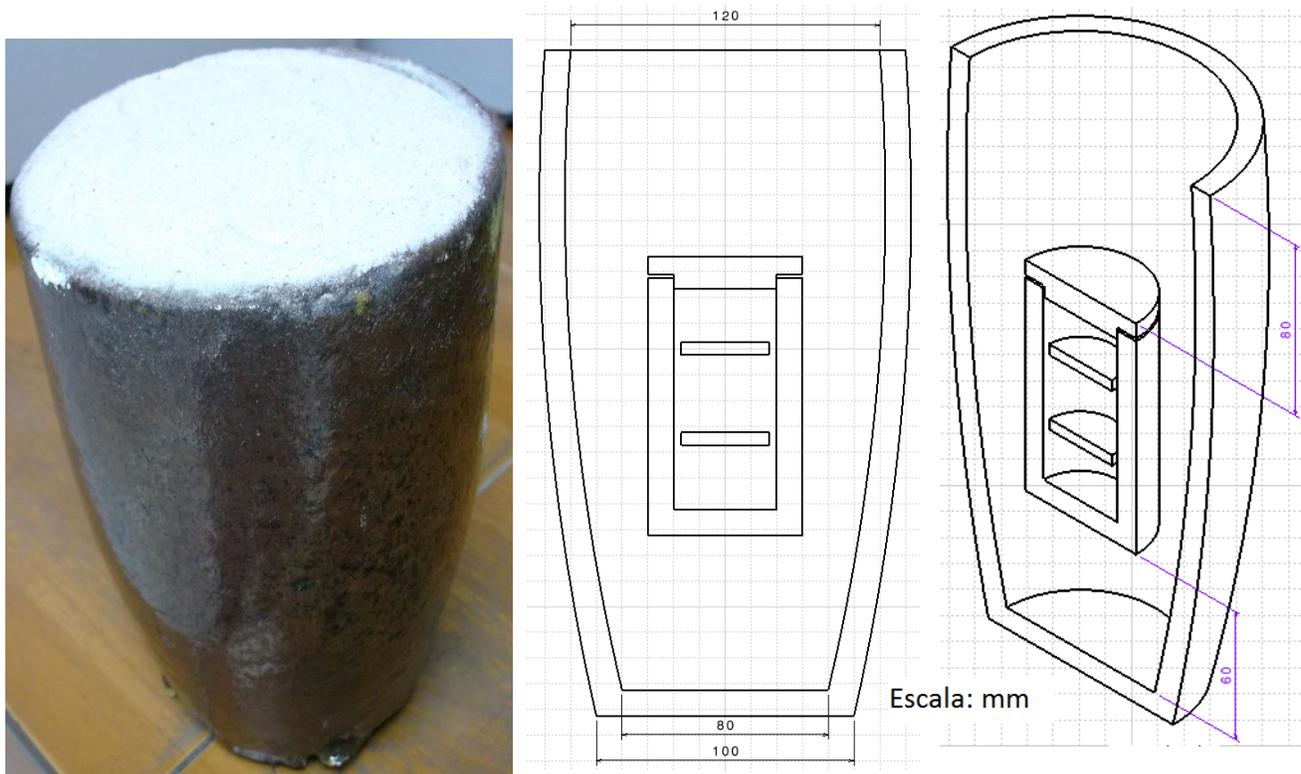


Figura 0.3 Configuración del arreglo para el proceso interrumpido de borurado

El ciclo térmico que es llevado a cabo durante este proceso fue propuesto por Gopalakrishnan et. Al. (2002) consistió en colocar el crisol dentro de un horno desde temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura de tratamiento (900°C), una vez alcanzada se comienza a contar una hora de exposición, al finalizar esta hora, se retira el crisol del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura de 600°C , la cual es monitoreada por medio de un termopar como se muestra en la figura #.



Después de alcanzar la temperatura de 600°C nuevamente el crisol es colocado en el horno, permaneciendo dentro hasta alcanzar nuevamente la temperatura de tratamiento y contar la hora de exposición. Esta metodología se repite durante el tratamiento para completar las horas de exposición de tal forma que al sumar el tiempo de permanencia dentro del horno acumulen un total de 2 y 4 horas. Al final una vez que se sacó el crisol de su último ciclo de tratamiento se deja enfriar a 600°C cuando esta temperatura es alcanzada se introduce nuevamente el crisol en otro horno previamente precalentado a temperatura de 600°C para una última hora de exposición. Al término de la del ciclo se deja enfriar el crisol a temperatura ambiente, la figura 11 muestra el ciclo térmico realizado para el tratamiento de 4 horas interrumpidas.

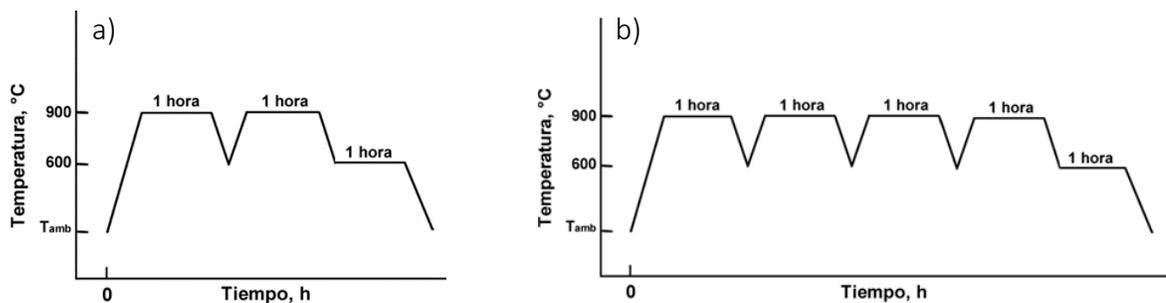


Figura 0.4 Gráficos de los ciclos térmicos para tratamientos interrumpidos a) 2 horas, b) 4 horas

1.7 Caracterización físico-química y mecánica de las capas de boruros de hierro en el acero AISI 316L

1.7.1 Caracterización óptica (Medición de espesor de capa)

Finalizado el proceso de borurado, las probetas con tratamiento térmico se cortaron en sección trasversal montadas en un dispositivo de acero inoxidable como se muestra en la figura 12. El dispositivo tiene como principal objetivo el disminuir el redondeo de la muestra en los bordes durante el proceso metalográfico, logrando así una referencia más definida y plana.



Figura 0.5 Dispositivo de acero inoxidable AISI 304 a) sin muestra b) con muestra montada
c) dimensiones

Una vez montado el dispositivo como lo muestra la figura 12 b) se pulió la sección transversal con lijas de SiC iniciando desde el grano 80 hasta llegar al 5000, para el acabado final se pulió utilizando un paño micro-cloth y silica. Para el revelado de la capa se utilizó vilella, que está compuesta de 100ml de etanol, 5ml de ácido clorhídrico y 1 gr de ácido pícrico. Finalmente la probeta es expuesta durante 10 segundos con el fin de mejorar el contraste entre las capas formadas y el sustrato.

Las micrografías fueron tomadas en un microscopio Olympus GX51 y para la medición de espesores se usó el software Image Pro-Plus V6.0. El criterio de medición se describe en la figura 13. Para la determinación del espesor de la capa y zona de difusión se realizaron alrededor de 50 mediciones para obtener un valor estadístico de mayor confiabilidad.

Para los tratamientos de borurado continuo este proceso fue suficiente para obtener resultados confiables, sin embargo para el caso en particular de tratamiento interrumpido de 2 horas este procedimiento no presenta una confiabilidad ya que por prestaciones del equipo no se puede tener la certeza de la medición de capa.

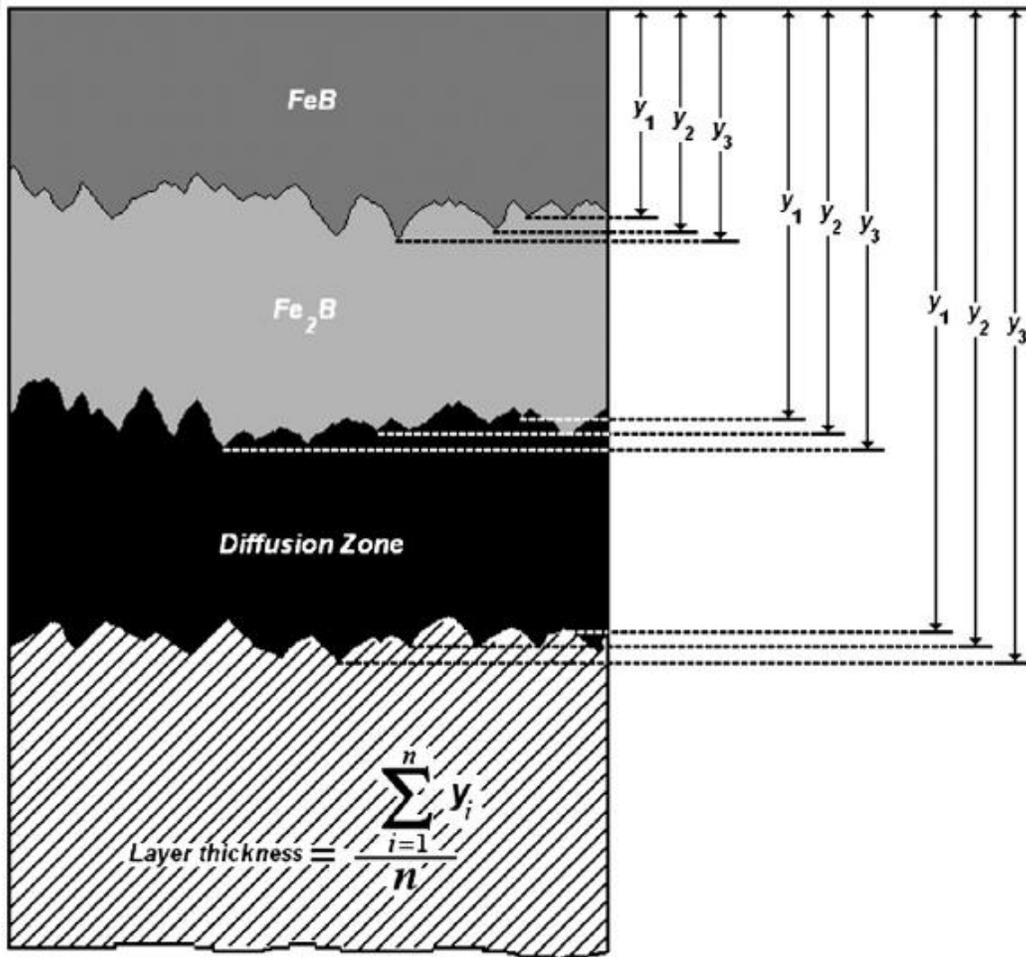


Figura 0.6 criterio para la medición de las capas de boruros de hierro (Campos Silva et al., 2010)

1.7.2 Caracterización físico-química (Difracción de Rayos X, DRX)

Durante el proceso de borurado se forman compuestos los cuales son característicos para cada aleación, con el fin de determinar las fases formadas durante los procesos continuo e interrumpido se realizó el análisis de difracción de rayos X ya que por medio de esta técnica se confirman los compuestos presentes en la superficie del material analizado, sin embargo

este análisis también permite determinar los parámetros de red, tamaño de cristal, entre otros.

El principio de este análisis para la identificación de los compuestos está fundamentado en que cada compuesto químico o fase posee un patrón de difracción propio. Para la obtención de estos patrones de difracción un haz de rayos X incide sobre la muestra (figura #), éstos se dispersan en todas direcciones. La mayor parte de la radiación dispersada por un átomo anula la radiación dispersada en otros átomos. Sin embargo, los rayos X que llegan a ciertos planos cristalográficos forman ángulos específicos que se refuerzan (se encuentran en fase) figura # en vez de anularse los cuales son detectados y registrados por un detector Jiménez L (2013).

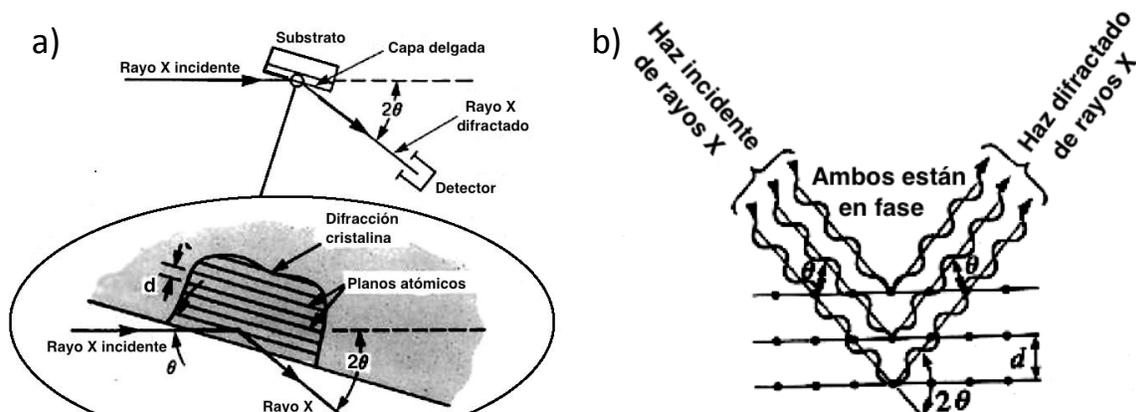


Figura 0.7 Características básicas de un ensayo de DRX, b) Angulo entre el haz incidente y el Haz difractado

El material analizado al ser una mezcla de componentes o fases da como resultado un patrón de difracción compuesto por los patrones de las fases individuales. El patrón obtenido es comparado con una gran base de datos de difractogramas para identificar de manera individual cada uno de los compuestos presentes

La prueba se realizó para las 4 diferentes condiciones de tratamiento utilizando un difractómetro de rayos X modelo X'PERT PRO-MRD de la marca PANalytical figura 14 en el ángulo 2θ con radiación de $\text{CoK}\alpha$ ($\lambda 1.79\text{\AA}$).



Figura 0.8 Difractometro PANalytical X'PERT PRO-MRD.

1.7.3 Caracterización físico-química

La espectroscopia de energía dispersiva de rayos X es una técnica de microanálisis en donde se emplea un microscopio electrónico de barrido (SEM) con el fin de analizar químicamente la composición del elemento a estudiar, que puede ser puntual o en cierta área. El equipo por medio de diversos sensores detecta los rayos X emitidos por la muestra durante el bombardeo de un haz de electrones para caracterizar la composición elemental del área analizada. Cuando la muestra es bombardeada por el haz de electrones del microscopio electrónico de barrido (SEM), los electrones son expulsados de los átomos que se encuentran en la superficie de la muestra. Un detector de rayos X se encarga de analizar los rayos X emitidos por la muestra, el detector genera una señal proporcional a la energía del fotón y característica de cada elemento o fase.

Esta técnica fue empleada sobre el corte transversal de la muestra borurada mediante el proceso interrumpido con 2 horas de exposición a 900°C , para verificar que compuesto se encuentra en la superficie después del tratamiento termoquímico, utilizando un microscopio Quanta 3D FEG que se muestra en la figura 15.



Figura 0.9 Microscopio Electrónico de Barrido Quanta 3D FEG, marca FEI

1.7.4 Caracterización Mecánica (Indentación Instrumentada)

Al realizar la prueba de caracterización mecánica por medio de nano indentación es posible evaluar áreas muy pequeñas dentro de una superficie, en los tratamientos termoquímicos permite evaluar individualmente las propiedades en las áreas en donde se forman los compuestos con el fin de obtener la dureza y del módulo de elasticidad mediante la medición de carga y desplazamiento, sin embargo también se pueden obtener otras propiedades como trabajo elástico y trabajo plástico durante la indentación. Todos estos parámetros pueden ser calculados sin necesidad de medir la huella de indentación de manera óptica.

Utilizando un equipo Tester NHT de la marca CSM Instruments para Nanoindentación con un indentador Berkovich como se muestra en la figura 16. Las indentaciones se realizaron con una carga constante de 50 mN para las 4 condiciones. Para los tratamientos continuos las indentaciones se hicieron en la sección transversal con un total de 5 indentaciones por

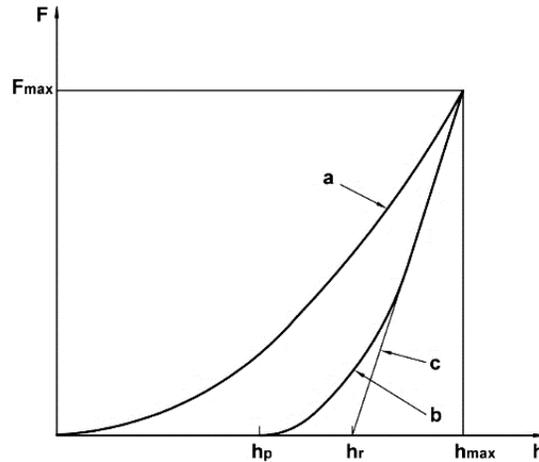


capa. En los tratamientos interrumpidos las indentaciones se hicieron normales a la superficie ya que los espesores formados no permiten trabajarlos en sección transversal.



Figura 0.10 Equipo Tester NHT de la marca CSM Instruments para Nanoindentación.

La prueba consiste en realizar una indentación en una área de interés con la cual se genera una gráfica del tipo carga contra desplazamiento en donde se pueden apreciar los siguientes parámetros (figura 17), estos son utilizados para calcular el módulo de elasticidad, el exponente de endurecimiento por deformación, la tenacidad a la fractura (en el caso de materiales frágiles) y el trabajo elástico y plástico durante la indentación.



a Fuerza aplicada **b** Remoción de la fuerza aplicada **c** Tangente a b en F_{max}

F_{max} Fuerza máxima aplicada

h_p Profundidad permanente de indentación después de retirar la fuerza

h_r Punto de intersección de la tangente **c** con el eje de profundidad de indentación

h_{max} Profundidad máxima de indentación

Figura 0.11 Curva característica obtenida mediante una prueba de indentación

La determinación de las diferentes propiedades por esta técnica se basa en el análisis de la curva de carga y descarga desarrollada durante la prueba. La curva se forma principalmente de una línea de carga, producida durante la deformación elástica y plástica del material, seguida de una línea de descarga formada por el desplazamiento y recuperación elástica cuando la carga es retirada.

El área de contacto es determinada a partir de la geometría del indentador y profundidad de Contacto figura 18

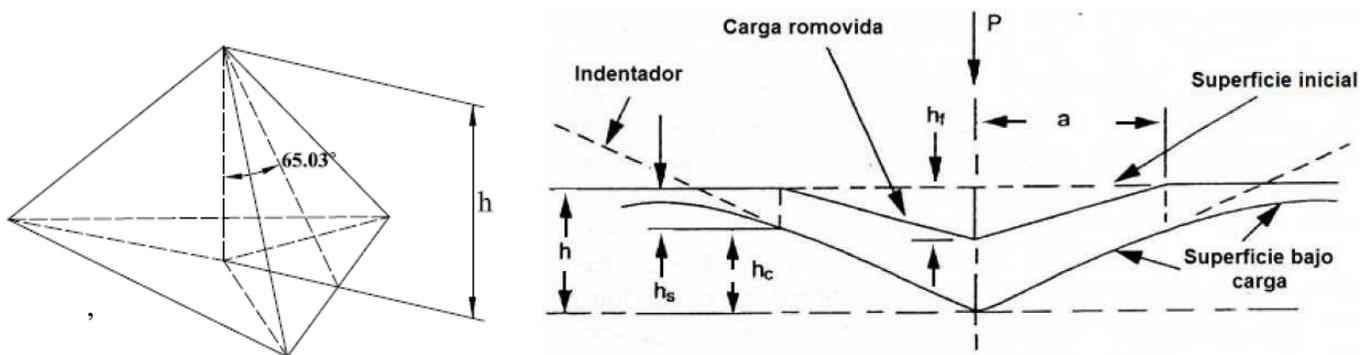


Figura 0.12 a) geometría del indentador Berkovich b) esquema de la sección transversal de una indentación



El área proyectada por el indentador después de la prueba puede ser representada en función de la profundidad h_c

$$h_c = 2\sqrt{3}h_c^2 \tan^2 65.3^\circ = 24.56h_c^2$$

A través del método de Oliver y Pharr la pendiente de la curva de descarga (figura 17) es utilizada para determinar la profundidad de contacto. Superior al 80% de la porción de descarga en la curva fuerza vs profundidad, es ajustada a la ecuación:

$$F = K(h - h_f)^m$$

Donde F es la fuerza, h es la profundidad, h_f es la profundidad final, K y m son constantes. Los valores de K , m son estimados por el método de mínimos cuadrados para la curva de descarga. Esta expresión entonces es diferenciada con respecto a la profundidad para obtener la pendiente de la curva de descarga la cual es evaluada en el punto de máxima profundidad.

La intercepción en el eje de la profundidad con la línea tangente a la curva de descarga determina la profundidad h_r , como se muestra en la figura 17. La profundidad de contacto h_c es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$h_c = h_{max} - \varepsilon(h_{max} - h_r)$$

Donde el valor de ε es constante para in indentador Berckovich (0.75).

Una vez determinada la profundidad de contacto h_c y el área proyectada por el indentador la dureza puede ser determinada por:

$$H = \frac{F_{max}}{A_p(h_c)}$$

El módulo de elasticidad E es calculado a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{1 - \nu_s^2}{1/E_r - (1 - \nu_i^2)/E_i}$$

$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{\sqrt{A_p(h_c)}}$$



Donde ν_s es la relación de Poisson de la muestra, E_i y ν_i son el módulo y relación de Poisson del indentador, E_r es el módulo reducido del contacto de indentación, S es la rigidez en la curva de descarga

$$S = \frac{dF}{dh}$$

CAPÍTULO 3.- DESARROLLO DE LA PRUEBA NUMÉRICO- EXPERIMENTAL DE ADHESIÓN ROCKWELL-C

1.8 Introducción

En el presente capítulo se desarrolla la evaluación cualitativa de la adhesión de las capas de boruros de hierro formados en el acero inoxidable AISI 316L mediante la técnica de indentación Rockwell-C conforme los criterios de la normativa VDI 3198 a fin de determinar la carga crítica para cada condición de tratamiento. A su vez también se realiza el cálculo de los esfuerzos residuales según la ecuación propuesta por (Golanski et al. 1995) y finalmente por medio del software de elemento finito ABAQUS se desarrollara un modelo de la prueba de indentación Rockwell-C mediante la cual se evaluara cuantitativamente los efectos de las capas con respecto a los esfuerzos generados durante la prueba de adhesión.

1.9 Análisis de Adhesión por indentación Rockwell-C (Norma VDI 3198)

Para el análisis de adhesión por medio de la indentación Rockwell-C se dividió en dos secciones, la primera se analizó el desarrollo de la adhesión a cargas bajas, la segunda parte se analizaron a cargas altas con la finalidad de observar el daño producido en la capa bajo carga gradual.

Para el desarrollo experimental de adhesión a cargas bajas se implementó un equipo CSM Revetest Xpress (Figura #) con un indentador tipo Rocwell-C con punta de diamante de radio de 200 μm para realizar las pruebas.

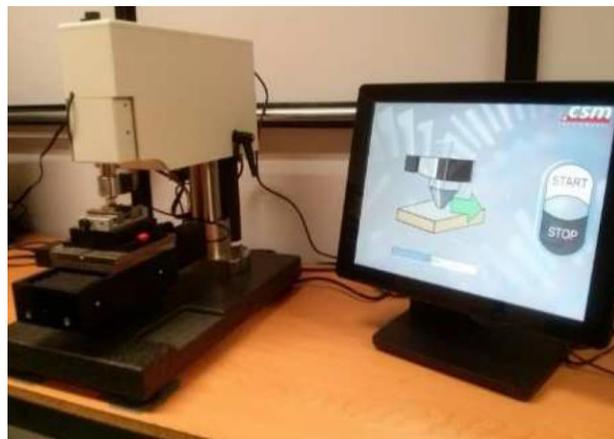


Figura 0.1 Equipo CSM Revetest Xpress para pruebas de rayado e indentación

Las probetas después del tratamiento termoquímico de borurado fueron nuevamente pulidas para retirar la capa de óxidos formada durante el proceso térmico (figura#) con una lija del grano 5000.

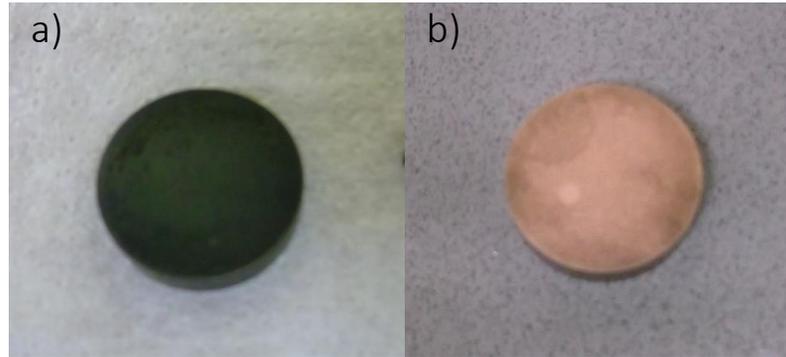


Figura 0.2 Probeta sin limpieza b) probeta después de la limpieza.

Las cargas aplicadas para la prueba de indentación se realizaron a partir de 10N hasta llegar a los 140 N con un incremento de 10 N (figura #) para cada carga se realizó 5 repeticiones siguiendo el procedimiento para la medición de dureza Rockwell (NMX-B-119-1983)

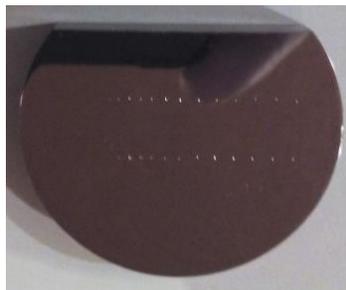


Figura 0.3 Indentaciones a cargas bajas realizadas sobre la superficie de un acero 316L borurado

Para la segunda parte del análisis de adhesión por indentación se utilizó un equipo marca Mitutoyo modelo XXXXX, aplicando cargas que fueron de 15, 30, 45, 60, 100 y 150 Kilogramos fuerza, para cada una de las 4 condiciones se hicieron 5 indentaciones a la misma carga según el criterio de la normativa para la evaluación de dureza Rockwell-C como se muestra a continuación.



Figura 0.4 #.- indentaciones realizadas a cargas altas sobre la superficie del acero borurado AISI 316L



Una vez finalizada la parte de pruebas mecánica se analizaron las huellas utilizando un microscopio óptico, para así determinar la carga crítica para cada condición según las fallas presentes en las huellas de indentación.

Al término de la prueba mecánica se analizaron las huellas por medio de microscopía óptica para así determinar la calidad de adhesión en los sistemas según el tipo de daño causado.

Para el análisis de las huellas se comparan los 4 sistemas formados bajo las mismas condiciones de carga para poder observar las diferencias entre los diferentes sistemas y de ese modo se determinó la carga crítica.

1.10 Esfuerzos residuales

Una superficie recubierta, generalmente contiene esfuerzos residuales, que son resultado de los cambios intrínsecos de la estructura, debido al proceso de difusión, deformaciones generadas durante el enfriamiento que son resultado de la diferencia de coeficiente de expansión térmica.

El proceso de borurado genera esfuerzos residuales por el incremento de volumen en la superficie, debido a la absorción de átomos y el gradiente de dilatación térmico entre la capa formada y la matriz ferrosa. Estos esfuerzos residuales tienen un efecto significativo en las características de los materiales, afectando las propiedades superficiales de los recubrimientos tales como la adhesión, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión.

La magnitud y distribución de los esfuerzos residuales depende principalmente de la técnica de producción de capa y los parámetros del proceso. Los esfuerzos residuales compresivos normalmente se encuentran en un rango de 0.1 a 4 GPa, pero en ocasiones pueden llegar a ser muy elevados, hasta 10 GPa y unos pocos GPa para los esfuerzos de tensión. Los esfuerzos generados debido al cambio de temperatura, se denominan como esfuerzos térmicos y los ocasionados por cambio estructurales son llamados esfuerzos intrínsecos. Los esfuerzos residuales se pueden dividir en dos categorías, como se muestra en la tabla 3.1



TABLA 0.1 CATEGORIAS DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES

ESFUERZO RESIDUAL	PROCESO DE DEPOSICIÓN INDUCIDA	DESLIZAMIENTO INDUCIDO
	DEBIDO A LA FALTA DE COINCIDENCIA EN LA EXPANSIÓN TÉRMICA DEL RECUBRIMIENTO Y EL SUBSTRATO DESPUÉS DEL CAMBIO DE TEMPERATURA DURANTE LA DEPOSICIÓN	
ESFUERZO TÉRMICO	DEBIDO A LA FALTA DE COINCIDENCIA EN LA EXPANSIÓN TÉRMICA DEL RECUBRIMIENTO Y EL SUBSTRATO DURANTE EL CAMBIO	
ESFUERZO INTRÍNSECO	DEBIDO A LOS DEFECTOS INCORPORADOS EN RECUBRIMIENTO DURANTE LA DEPOSICIÓN	



CAPITULO 4 ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

1.11 Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas experimentales (difractogramas, gráficos de EDS, gráficos de perfilometría, perfiles de dureza, esfuerzos residuales) con el fin de analizar numéricamente el análisis de adhesión y contribuir cuantitativamente a los resultados de la prueba.

1.12 Caracterización del proceso de borurización

Al término del proceso de borurado es necesario verificar la formación de las capas para ello como se describe en el capítulo 2, los resultados de la caracterización se muestran a continuación.

Para el tratamiento interrumpido de 4 horas se obtiene un sistema monocapa bien definida del compuesto Fe_2B figura 4.2, cuyo espesor se muestra en la tabla 4.1

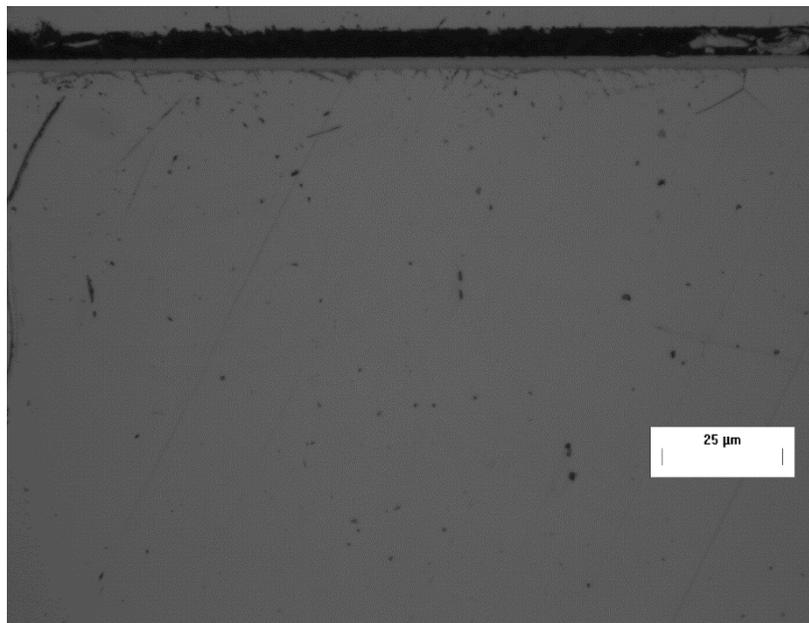


Figura 0.1 metalografía del tratamiento de borurado interrumpido 4h.en acero 316L

Tabla 0.1 Espesores de capa obtenidos del tratamiento de borurado interrumpido en acero 316L

Tratamiento de borurado interrumpido
 4h a 900°C

Capa	Espesor (μm)
FeB	=====
Fe ₂ B	3.1 \pm .01

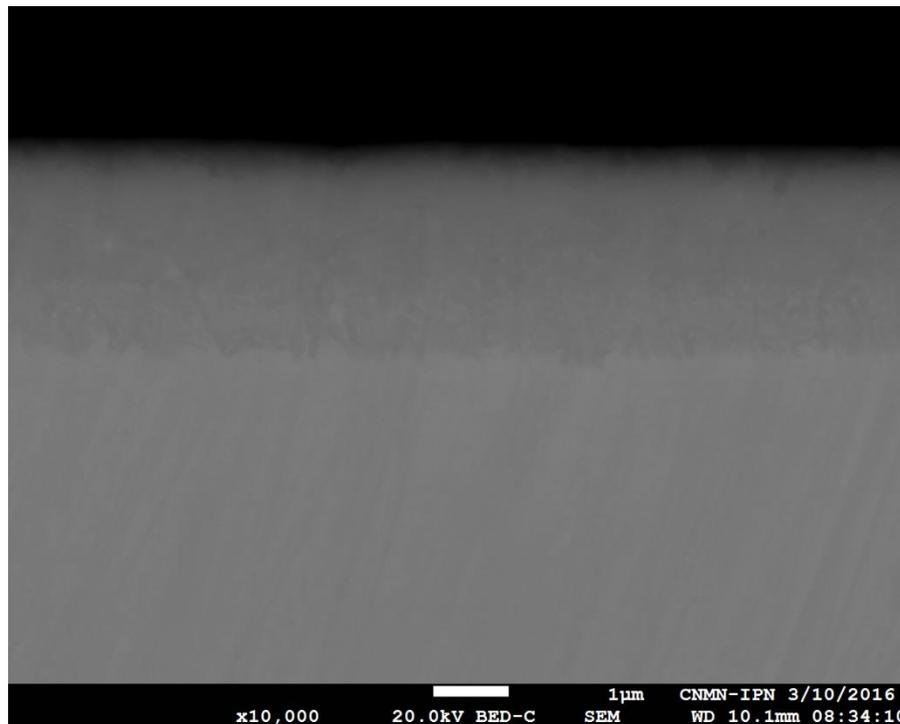


Figura 0.2 imagen de SEM del tratamiento de borurado interrumpido 4h.en acero 316L

Tabla 0.2 Espesores de capa obtenidos del tratamiento de borurado interrumpido en acero 316L

Tratamiento de borurado interrumpido
 4h a 900°C

Capa	Espesor (μm)
------	---------------------------

FeB

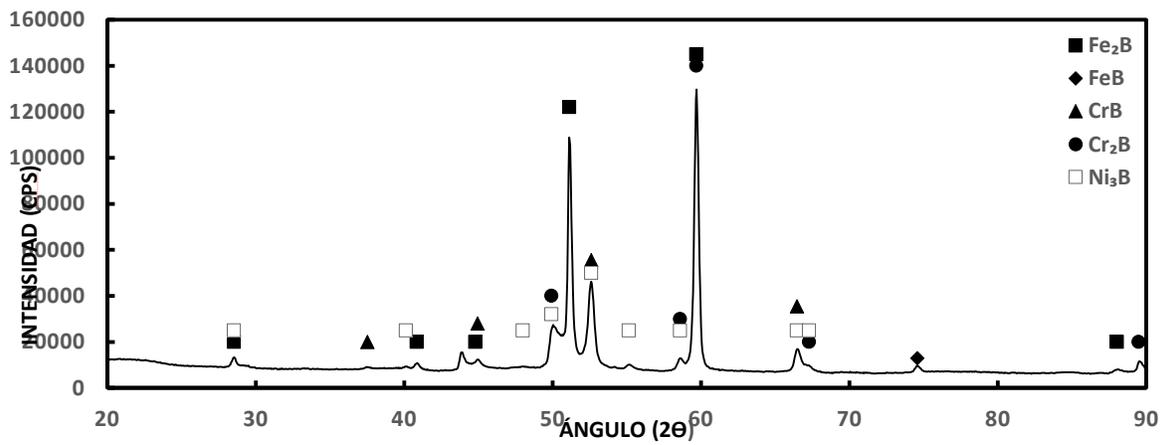
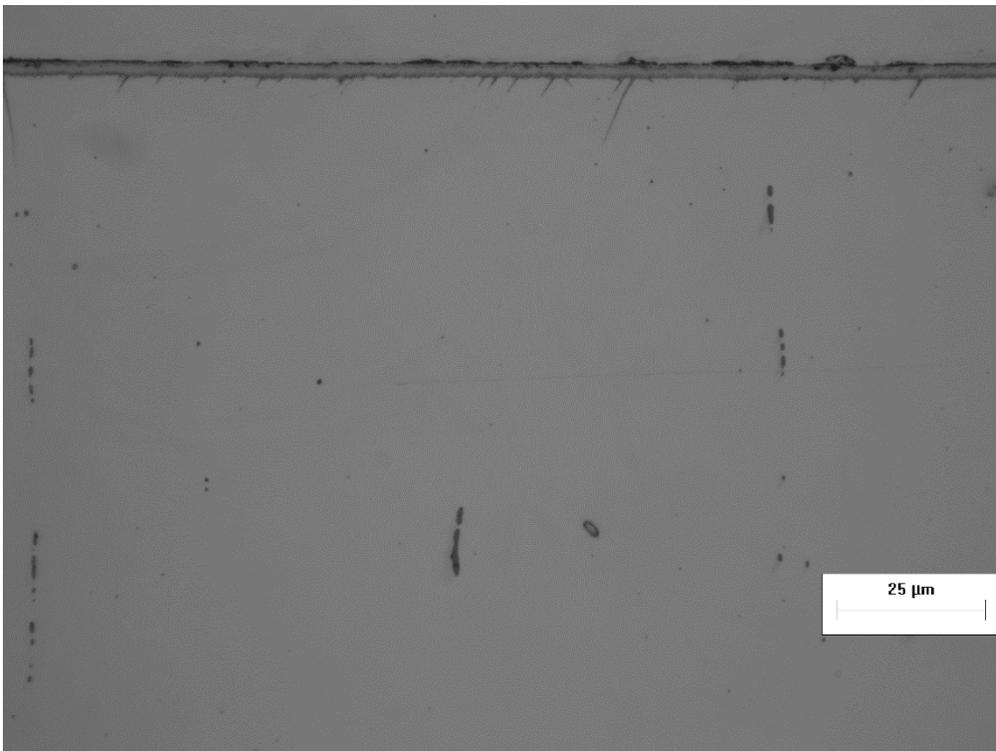


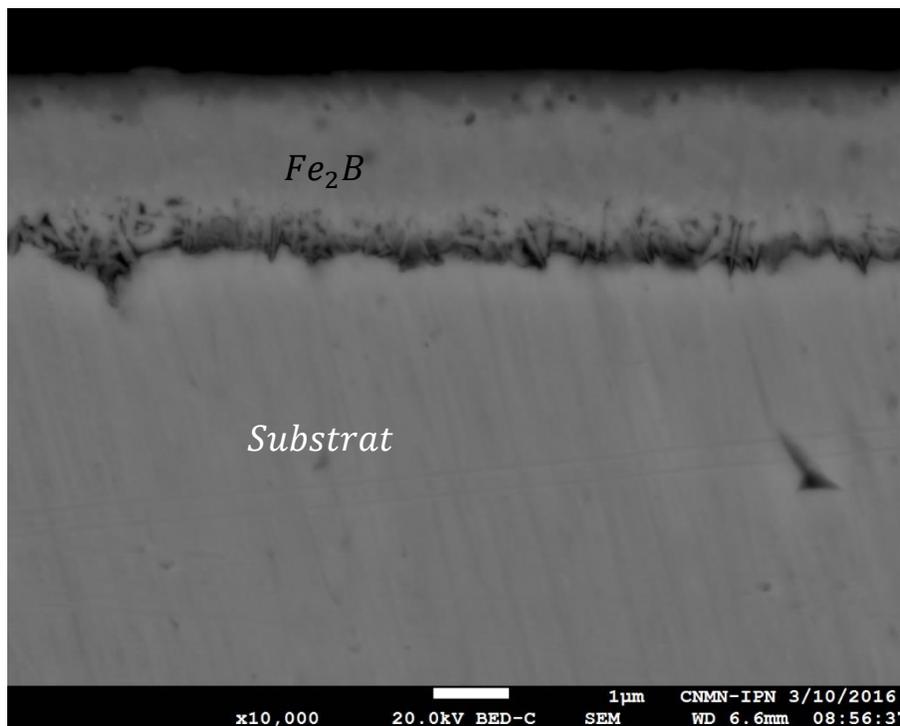
Figura 0.3 análisis DRX de la superficie del tratamiento interrumpido de 4H



*Figura 0.4 metalografía del tratamiento de borurado interrumpido
2h.en acero 316L*

*Tabla 0.3 Espesores de capa obtenidos del tratamiento de borurado interrumpido
 en acero 316L*

Tratamiento de borurado interrumpido 2h a 900°C	
Capa	Espesor (μm)
FeB	=====
Fe ₂ B	2.9 ± .02



*Figura 0.5 imagen de SEM del tratamiento de borurado
 interrumpido 2h.en acero 316L*

*Tabla 0.4 Espesores de capa obtenidos del tratamiento de borurado interrumpido en
 acero 316L*



Tratamiento de borurado interrumpido
2h a 900°C

Capa	Espesor (μm)
FeB	0.23
Fe ₂ B	2.43

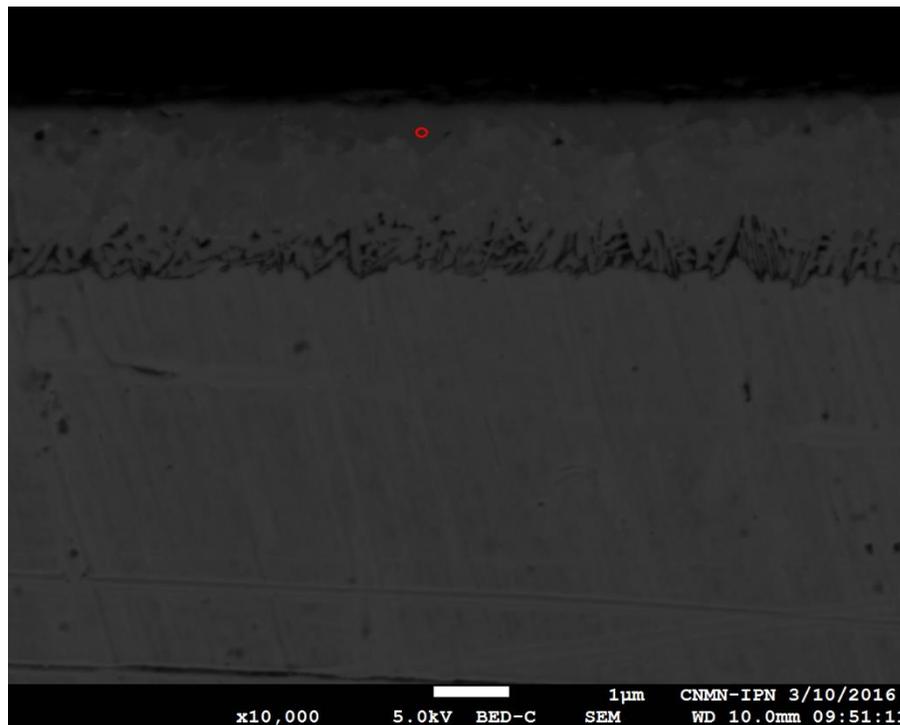
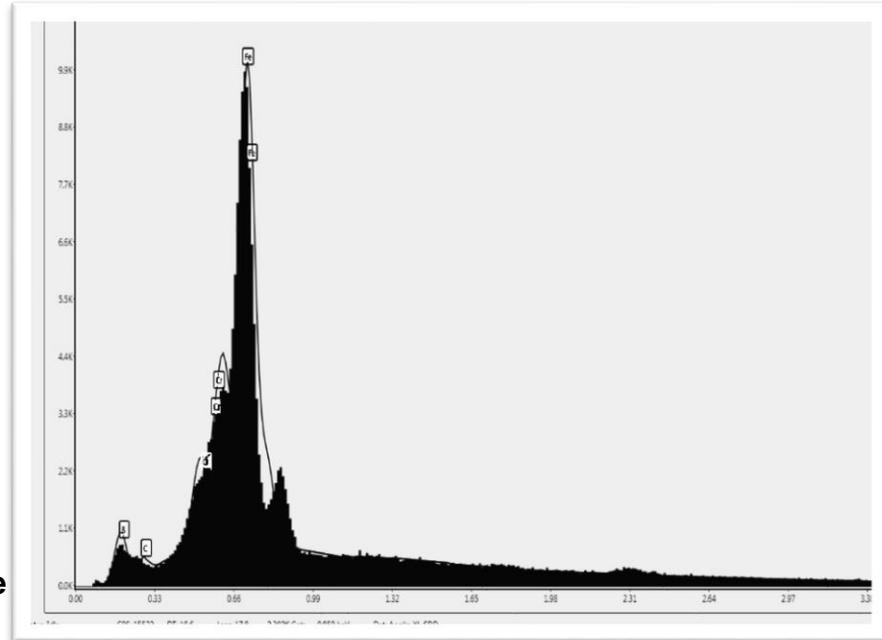


Figura 0.6 a, b análisis puntual de EDS sobre tratamiento de borurado interrumpido 2h.en acero 316L



1.13 Calculo de



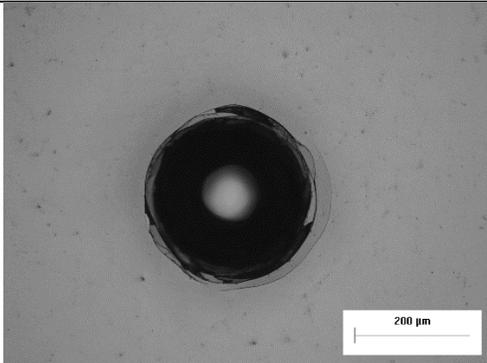
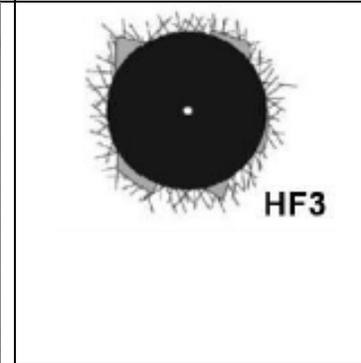
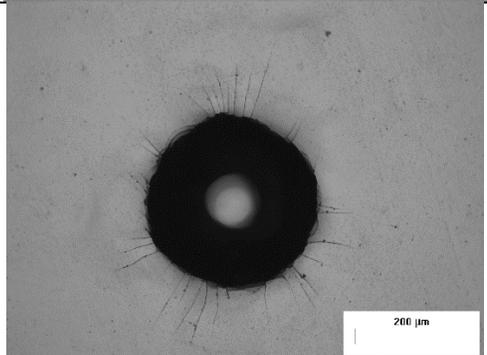
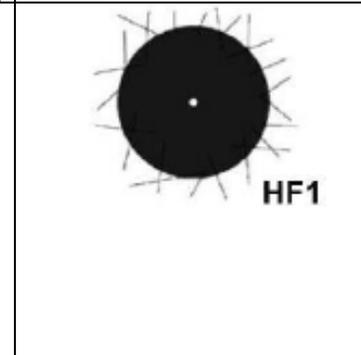


**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCULA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION**



1.14 Análisis de huellas de indentación de la prueba de Rockwell-C

Tabla 0.5 Imágenes de indentación para los tratamientos borurados a una carga de 147.5N

Condición	Imagen de la indentación	Evaluación de la adherencia
316LBC2h		
316LBI2h		

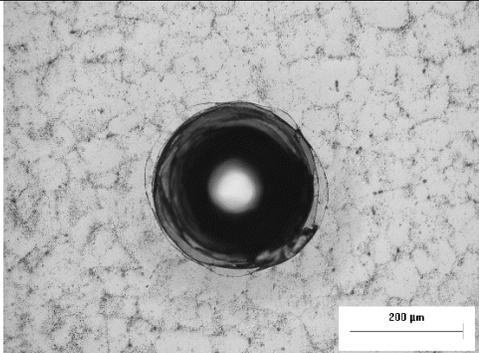
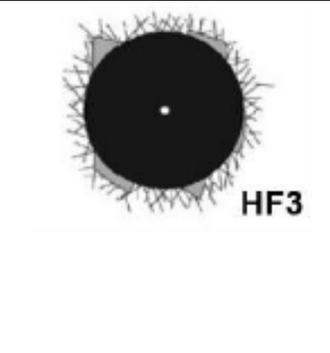
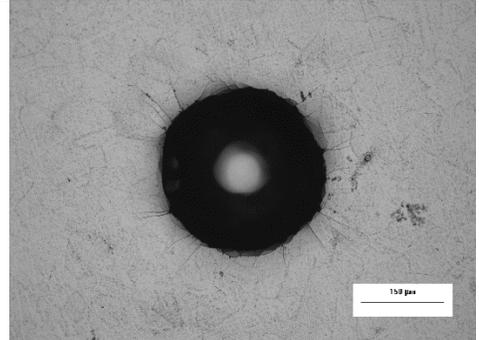
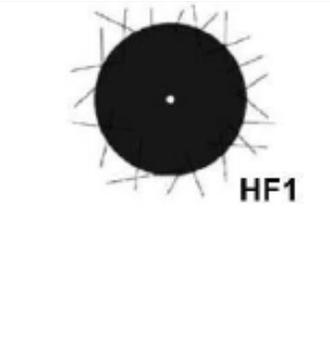
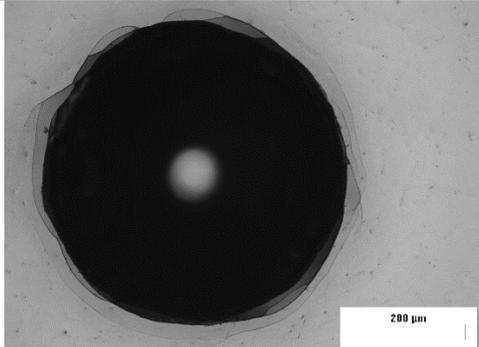
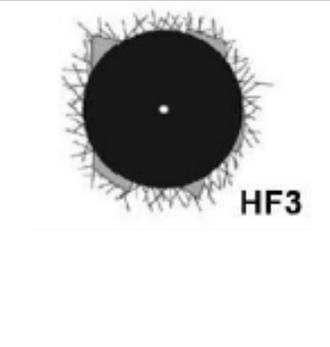
316LBC4h		
316LBI4h		

Tabla 0.6 Imágenes de indentación para los tratamientos borurados a una carga de 441,315N

Condición	Imagen de la indentación	Evaluación de la adherencia
316LBC2h		

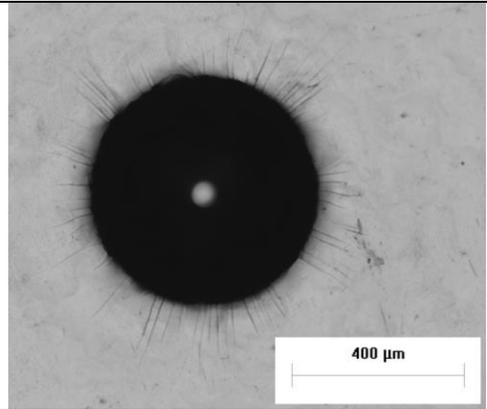
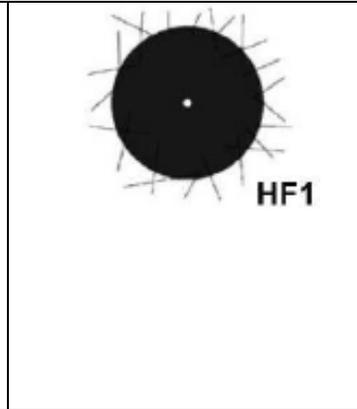
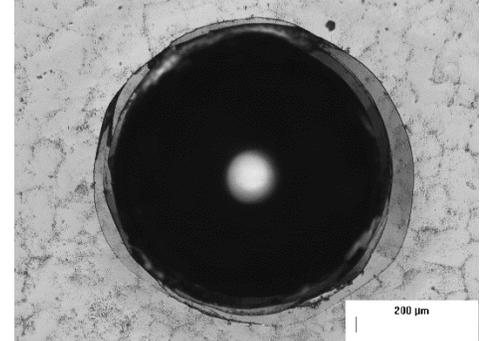
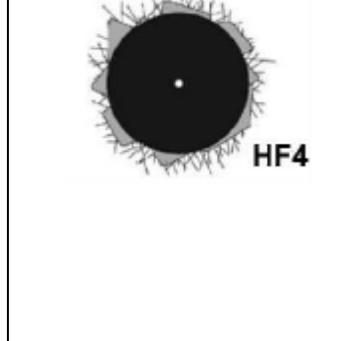
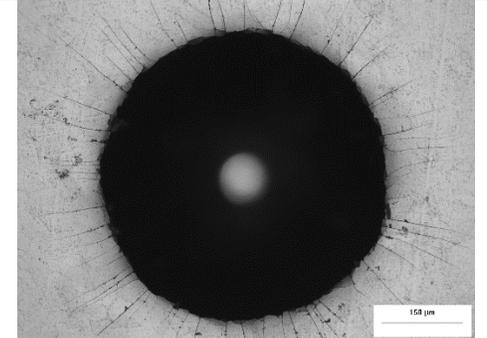
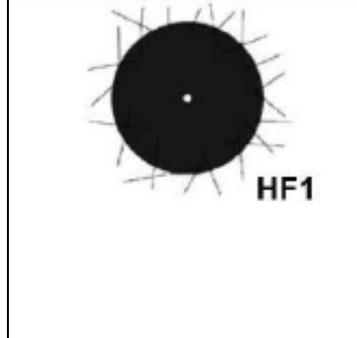
316LB12h		
316LBC4h		
316LB14h		

Tabla 0.7 Imágenes de indentación para los tratamientos borurados a una carga de 980,7N

Condición	Imagen de la indentación	Evaluación de la adherencia
-----------	--------------------------	-----------------------------

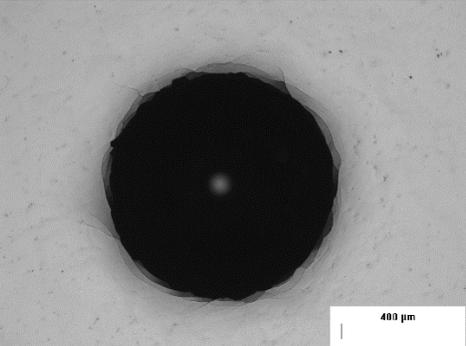
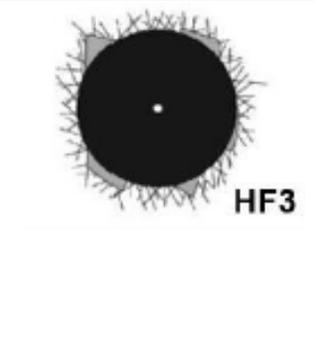
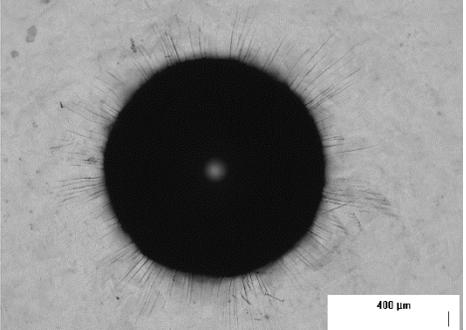
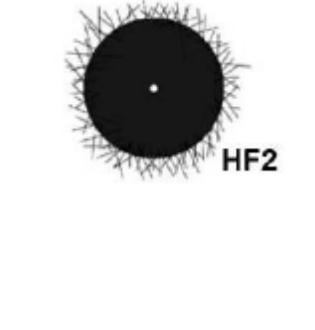
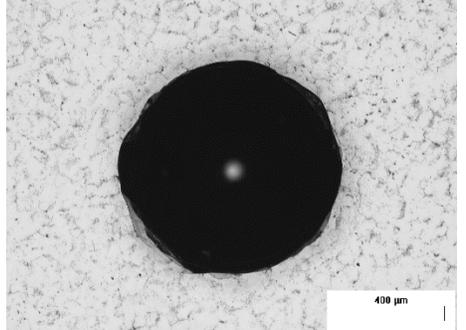
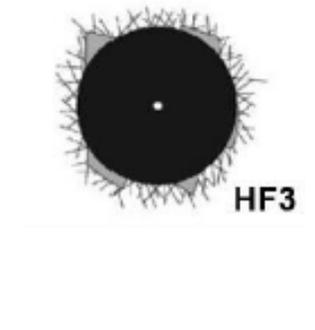
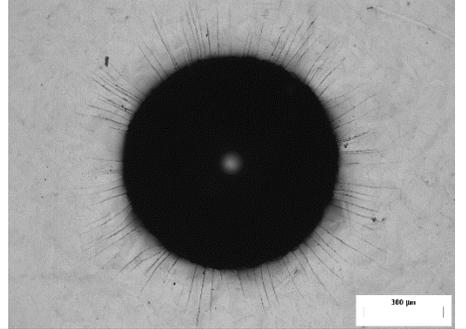
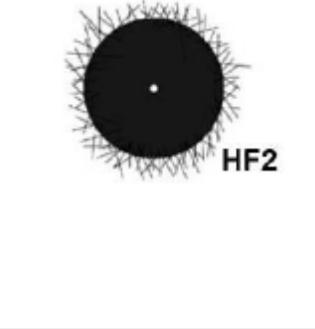
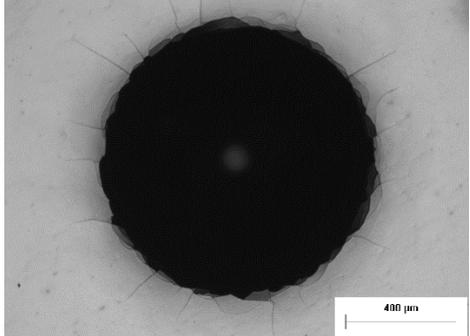
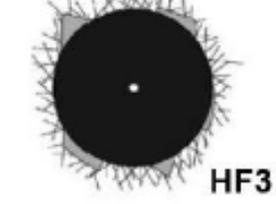
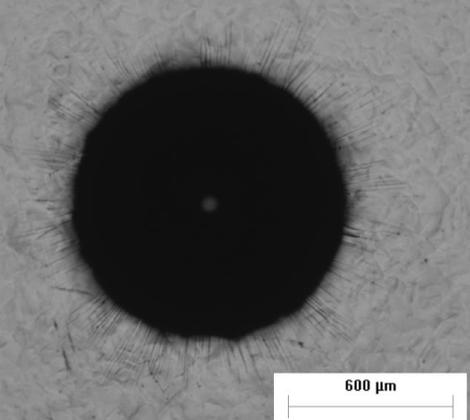
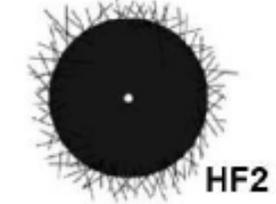
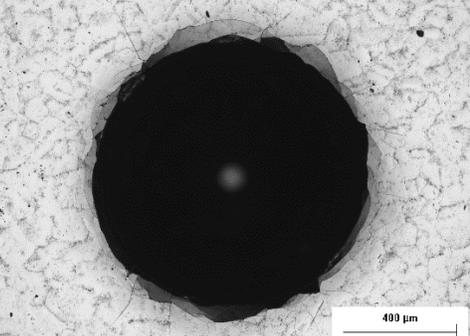
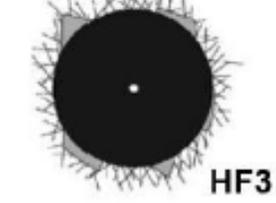
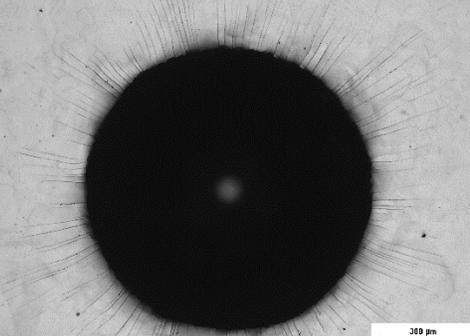
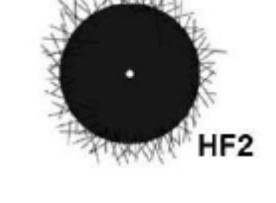
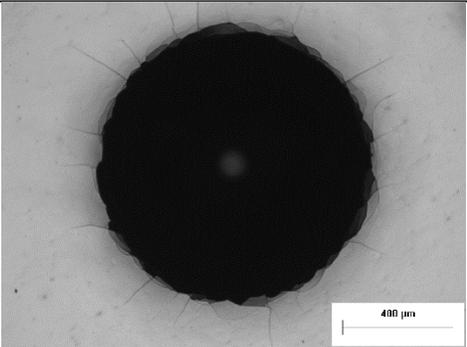
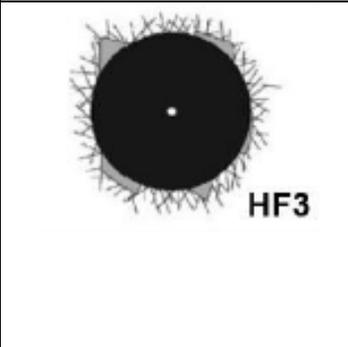
316LBC2h	 <p>400 μm</p>	 <p>HF3</p>
316LBI2h	 <p>400 μm</p>	 <p>HF2</p>
316LBC4h	 <p>400 μm</p>	 <p>HF3</p>
316LBI4h	 <p>300 μm</p>	 <p>HF2</p>

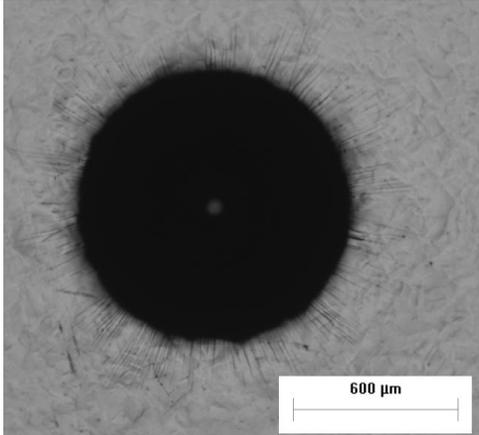
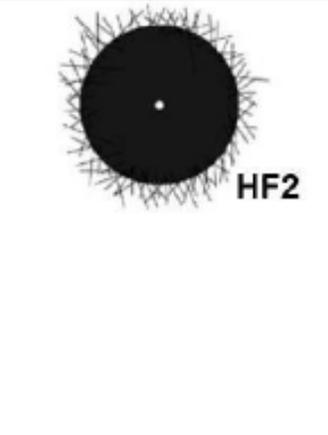
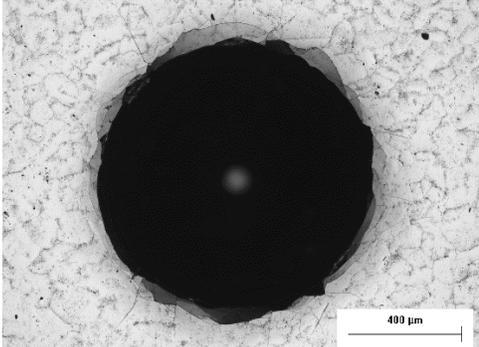
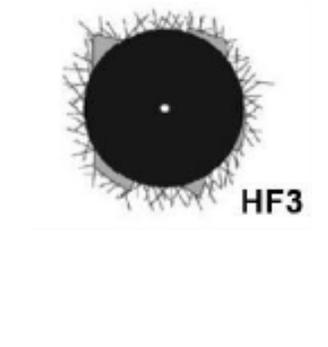
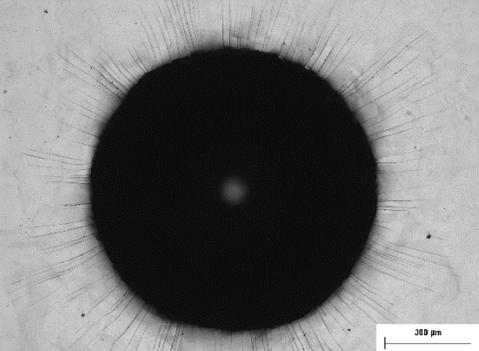
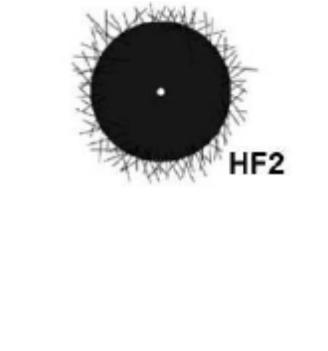
Tabla 0.8 Imágenes de indentación para los tratamientos borurados a una carga de 1471,05N

Condición	Imagen de la indentación	Evaluación de la adherencia
316LBC2h		
316LBI2h		
316LBC4h		
316LBI4h		

Al término de la evaluación óptica se concluyó que para los 4 sistemas formados para una carga máxima de 1471N los recubrimientos presentan una adherencia aceptable, cabe mencionar que para todos los sistemas las fallas se presentaron dentro de los criterios de adherencia aceptable entre los HF1 y HF3 (Figura 7)

Para complementar el análisis óptico a las indentaciones también se realizó un análisis de perfilometría con el fin de determinar las diferencias entre sistemas (continuo e interrumpido) en función a la profundidad residual de indentación. Para este estudio se desarrollo de manera similar al de análisis de adhesión.

Condición	Imagen de la indentación	Evaluación de la adherencia
316LBC2h		

316LB12h		
316LBC4h		
316LB14h		



CONCLUSIONES GENERALES

- Se produjeron sistemas de dos fases (FeB/Fe_2B), sobre la superficie de un acero inoxidable AISI 316L, mediante el tratamiento termoquímico de borurización en polvo empleando Ekabor™ II como agente borurante a una temperatura de 900 °C durante 2 y 4 horas de exposición. Los resultados obtenidos a través de la caracterización físico-química de las piezas, mostraron la presencia de ambas fases (FeB y Fe₂B), además la morfología de las capas es de una tendencia plana debido a los elementos aleantes del acero.
- Se produjo un sistema monofásico el cual esta del compuesto Fe_2B sobre el substrato de acero AISI 316L borurado mediante el proceso borurado interrumpido, el cual se llevó a cabo a una temperatura de 900 °C con un tiempos de exposición de 4 horas. La capa de la fase FeB se transforma por disociación y difusión en Fe₂B, reduciendo la fragilidad de la capa de boruro de hierro y un incremento de un 22% en el espesor de capa final.
- Se evaluó la dureza superficial mediante la prueba de indentación instrumentada Berkovich, los resultados muestran un incremento de 6.9 veces aproximadamente en la dureza superficial respecto al substrato (21.5 ± 0.3 GPa), en las muestras boruradas.
- Al finalizar las pruebas de adhesión los 4 sistemas evaluados presentan una adherencia aceptable con respecto a los criterios de la norma VDI 3198, sin embargo para las muestras de tratamiento interrumpido, estas presentan una mejor adhesión ya que durante la prueba experimental no se presenta desprendimiento de la capa.



PERSPECTIVAS DE TRABAJO

Someter al tratamiento termoquímico de borurado interrumpido a diferentes aceros de alta aleación para determinar si es posible obtener un sistema monocapa y evaluar su adherencia mediante la prueba de adhesión por indentación Rockwell-C.

Formar sistemas monofásicos a través de diferentes técnicas en la superficie del acero AISI 316L, para analizar la influencia del espesor de capa y efectos del proceso termoquímico con respecto a la adherencia que presenta los sistemas.

Determinar las diferencias de esfuerzos entre sistemas monocapa empleando la prueba de elemento finito utilizando las consideraciones aplicadas en el presente trabajo a través de resultados cuantitativos.



REFERENCIAS

- ASM International, Surface Hardening of Steels, (2002).
- ASM Metals Handbook, Vol. 4 Heat Treating, (1991).
- Bravo-Bárceñas D, (2014), "Caracterización mecánica y estructural de una aleación Co-Cr-Mo ASTM F-75 endurecida superficialmente por difusión de boro", Tesis Doctoral, SEPI ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional.
- Campos I, Ortíz D M, Bravo B O, Doñu R M A, Bravo B D, Tapia Q C, Jiménez R M Y, (2010), "Formation and kinetics of FeB/Fe₂B layers and diffusion zone at the surface of AISI 316 borided steels", Surf. Coat. Technol., 205, 403-412.
- Zhunkovskii G L, Navrotskii B S, and Kolosvetov Y P, (1972), "Boronizing of cobalt and some cobalt base alloys", Poroshkovaya Metallurgiya, 119, 888-890.
- Knotek O, Lugscheider L and Leuscheh K, (1977), "Surface layers on cobalt base alloys by boron diffusion", Thin Solid Films, 45, 331-339.
- Liu Y, Wang Y, Xia L, Song D, Wang Y, Jiao L, Yuan H, (2008), "Structure and electromechanical behaviors of a series of Co-B alloys", Electrochim Acta, 53, 2265-2271.
- Campos S I, Bravo B D, Meneses A A, Ortíz D M, Cimenoglu H, Fegueroa L U, Andraca A J, (2013), "Growth kinetics and mechanical properties of boride layers formed at the Surface of the ASTM F-75 biomedical alloy", Surf. Coat. Tech 237, 402-414.
- Minkevich A N, (1961), "Diffusion boride layers in metals", Met. Sci. and Heat Treat. 347-351.
- Liao P K and Spear K E, (1988), "B-Co (Boron-Cobalt)", Bull, Alloy Phase Diagrams 9, 471-472.



Campos-Silva, I., Ortiz-Domínguez, M., López-Perrusquia, N., Escobar-Galindo, R., Gómez-Vargas, O. and Hernández-Sánchez, E. (2009). Determination of Boron Diffusion Coefficients in Borided Tool Steels. *DDF*, 283-286, pp.681-686.

Carbucicchio, M. & Palombarini, G. (1987). Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings. *J Mater Sci Lett*, 6(10), pp.1147-1149.

Chen, K., Chen, T. and Ou, K. (2008). Development of semi-empirical formulation for extracting materials properties from nanoindentation measurements: Residual stresses, substrate effect, and creep. *Thin Solid Films*, 516(8), pp.1931-1940.

Corpus-Mejía, R. (2015). *Evaluación de la adhesión del sistema capa/substrato de un acero AISI M2 sometido al proceso de borurización por empaquetamiento*. Maestría. Instituto Politécnico Nacional.

Dearnley, P., Farrell, T. & Bell, T. (1986). Developments in plasma boronizing. *JMES*, 8(2), pp.128-131.

Fichtl, W. (1981). Boronizing and its practical applications. *Materials & Design*, 2(6), pp.276-286.

Fischer-Cripps, A. (2000). *Introduction to contact mechanics*. New York: Springer.

Genel, K. (1999). Effect of case depth on fatigue performance of AISI 8620 carburized steel. *International Journal of Fatigue*, 21(2), pp.207-212.

Genel, K. (2006). Boriding kinetics of H13 steel. *Vacuum*, 80(5), pp.451-457.

Genel, K., Demirkol, M. & Çapa, M. (2000). Effect of ion nitriding on fatigue behaviour of AISI 4140 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 279(1-2), pp.207-216.

Geoge, F. y Vander Voort, ., "Wrought Stainless Steels: Metallographic techniques and microstructures" en ASM International Handbook Committee., (1991). *ASM Handbook, Volume 09 – Metallography and Microstructures*. [S.l.]: ASM International.

Glaeser, W. y Shaffer S. "Contact Fatigue" en ASM International Handbook Committee., (1991). *ASM Handbook, Volume 19 – Fatigue and Fracture*. [S.l.]: ASM International.

Gopalakrishnan, P., Ramakrishnan, S., Shankar, P. and Palaniappa, M. (2002). Interrupted boriding of medium-carbon steels. *Metall and Mat Trans A*, 33(5), pp.1475-1485.

Gunes, I., Ulker, S. & Taktak, S. (2011). Plasma paste boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C steels. *Materials & Design*, 32(4), pp.2380-2386.



C-H. Hsueh and P. Miranda, (2004), "Combined empirical-analytical method for determining contact radius and indenter displacement during Hertzian indentation of coating/substrate systems", J. Mater. 2, 19-27.

B.V. Derjaguin, V.M. Muller, and Y.P. Toporov, (1995), "Effect of contact deformations on the adhesion of particles". J. Colloid Interface Sci. 1995. 53-314.

Jackson C. S. Yang, Do Sup Chun (1969) "Application of the hertz contact law to problems of impact in plates" United States Naval Ordnance Laboratory.

S. Liu, A. Peyronnel, Q.J. Wang, L.M. Keer. (2005), "An extension of the Hertz theory for 2D coated components" Tribology Letters. 505-511.

M. Kot, W. Rakowski, J.M. Lackner, Ł. Major, (2012), "Analysis of spherical indentations of coatings/substrate systems: experiments and finite element modeling" Materials and Design 43, 99-111.

Hertz H. London: Jones and Schott Macmillan (1863).

L.A. Galin, Contact problems in the theory of elasticity (1953).

G.M.L. Gladwell, Contact problems in the classical theory of elasticity (1980).

K.L. Johnson Contact Mechanics (1985).

ASM Handbook International, (1998), Metallography and microstructures.

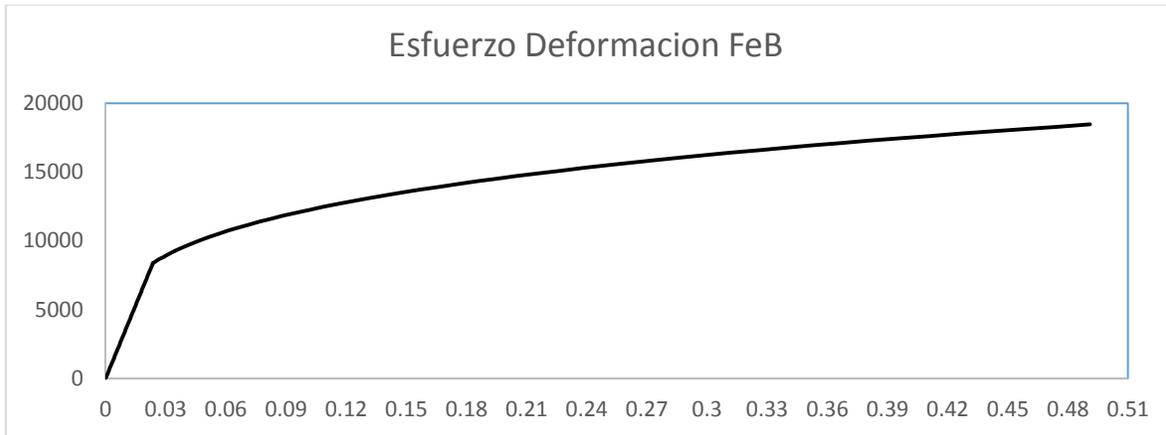
Standard guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM E 3-01, (2001).

Oliver WC, Pharr GM, (2004), "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology". J Mater Res.



ANEXO "A"

Gráfico y tabla de datos de la curva esfuerzo deformación calculada para la capa FeB para los tratamiento de borurado continuo



Deformación (mm)	Esfuerzo (MPa)
0.0001	35.484
0.0004	141.936
0.0007	248.388
0.001	354.84
0.0013	461.292
0.0016	567.744
0.0019	674.196
0.0022	780.648
0.0025	887.1
0.0028	993.552
0.0031	1100.004
0.0034	1206.456
0.0037	1312.908
0.004	1419.36
0.0043	1525.812
0.0046	1632.264
0.0049	1738.716
0.0052	1845.168
0.0055	1951.62
0.0058	2058.072
0.0061	2164.524
0.0064	2270.976



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.0067	2377.428
0.007	2483.88
0.0073	2590.332
0.0076	2696.784
0.0079	2803.236
0.0082	2909.688
0.0085	3016.14
0.0088	3122.592
0.0091	3229.044
0.0094	3335.496
0.0097	3441.948
0.01	3548.4
0.0103	3654.852
0.0106	3761.304
0.0109	3867.756
0.0112	3974.208
0.0115	4080.66
0.0118	4187.112
0.0121	4293.564
0.0124	4400.016
0.0127	4506.468
0.013	4612.92
0.0133	4719.372
0.0136	4825.824
0.0139	4932.276
0.0142	5038.728
0.0145	5145.18
0.0148	5251.632
0.0151	5358.084
0.0154	5464.536
0.0157	5570.988
0.016	5677.44
0.0163	5783.892
0.0166	5890.344
0.0169	5996.796
0.0172	6103.248
0.0175	6209.7
0.0178	6316.152
0.0181	6422.604
0.0184	6529.056
0.0187	6635.508



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

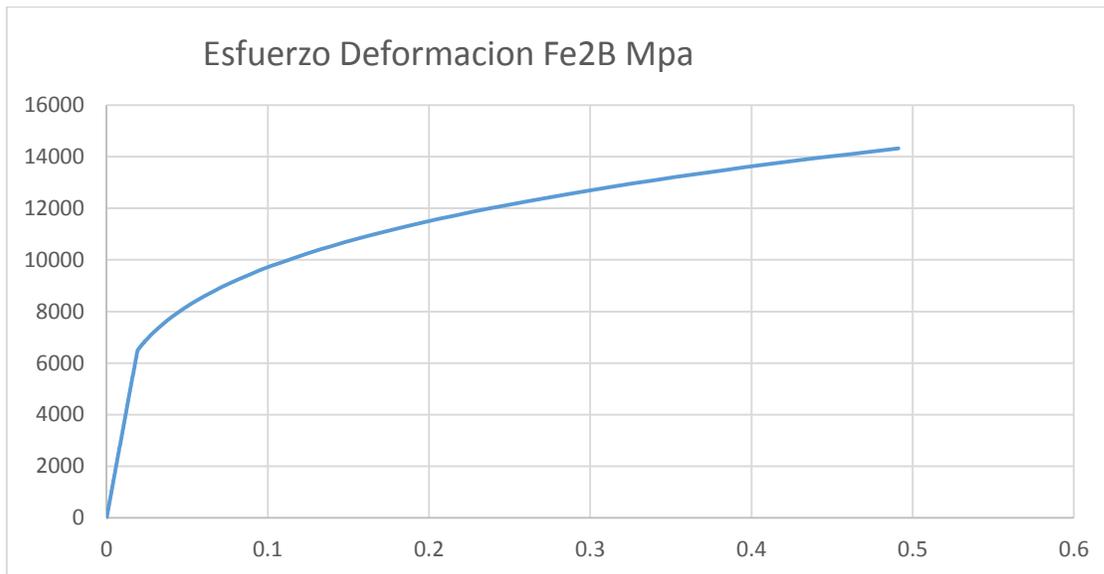


0.019	6741.96
0.0193	6848.412
0.0196	6954.864
0.0199	7061.316
0.0202	7167.768
0.0205	7274.22
0.0208	7380.672
0.0211	7487.124
0.0214	7593.576
0.0217	7700.028
0.022	7806.48
0.0223	7912.932
0.0226	8019.384
0.0229	8125.836
0.0232	8232.288
0.0235	8338.74
0.0235	8374.752714
0.0236	8384.000285
0.024	8420.703128
0.0247	8483.858042
0.0257	8571.820609
0.027	8682.462118
0.0286	8813.34938
0.0305	8961.918355
0.0327	9125.620744
0.0352	9302.033368
0.038	9488.929317
0.0411	9684.315827
0.0445	9886.446526
0.0482	10093.81591
0.0522	10305.1429
0.0565	10519.34858
0.0611	10735.53187
0.066	10952.94542
0.0712	11170.97308
0.0767	11389.10954
0.0825	11606.94258
0.0886	11824.13771
0.095	12040.42508
0.1017	12255.5885
0.1087	12469.45618



0.116	12681.89305
0.1236	12892.79435
0.1315	13102.08034
0.1397	13309.69185
0.1482	13515.5867
0.157	13719.73663
0.1661	13922.12479
0.1755	14122.74373
0.1852	14321.59361
0.1952	14518.68084
0.2055	14714.01683
0.2161	14907.61708
0.227	15099.5003
0.2382	15289.68779
0.2497	15478.20285
0.2615	15665.07029
0.2736	15850.31609
0.286	16033.96705
0.2987	16216.05054
0.3117	16396.59425
0.325	16575.62605
0.3386	16753.17381
0.3525	16929.26528
0.3667	17103.92803
0.3812	17277.18929
0.396	17449.07598
0.4111	17619.61457
0.4265	17788.83112
0.4422	17956.75118
0.4582	18123.39981
0.4745	18288.80155
0.4911	18452.98041

Gráfico y tabla de datos de la curva esfuerzo deformación calculada para la capa Fe_2B para los tratamiento de borurado continuo



Deformacion (mm)	Esfuerzo Mpa
0.0001	33.884
0.0004	135.536
0.0007	237.188
0.001	338.84
0.0013	440.492
0.0016	542.144
0.0019	643.796
0.0022	745.448
0.0025	847.1
0.0028	948.752
0.0031	1050.404
0.0034	1152.056
0.0037	1253.708
0.004	1355.36
0.0043	1457.012
0.0046	1558.664
0.0049	1660.316
0.0052	1761.968
0.0055	1863.62
0.0058	1965.272
0.0061	2066.924



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.0064	2168.576
0.0067	2270.228
0.007	2371.88
0.0073	2473.532
0.0076	2575.184
0.0079	2676.836
0.0082	2778.488
0.0085	2880.14
0.0088	2981.792
0.0091	3083.444
0.0094	3185.096
0.0097	3286.748
0.01	3388.4
0.0103	3490.052
0.0106	3591.704
0.0109	3693.356
0.0112	3795.008
0.0115	3896.66
0.0118	3998.312
0.0121	4099.964
0.0124	4201.616
0.0127	4303.268
0.013	4404.92
0.0133	4506.572
0.0136	4608.224
0.0139	4709.876
0.0142	4811.528
0.0145	4913.18
0.0148	5014.832
0.0151	5116.484
0.0154	5218.136
0.0157	5319.788
0.016	5421.44
0.0163	5523.092
0.0166	5624.744
0.0169	5726.396
0.0172	5828.048
0.0175	5929.7
0.0178	6031.352
0.0181	6133.004
0.0184	6234.656



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

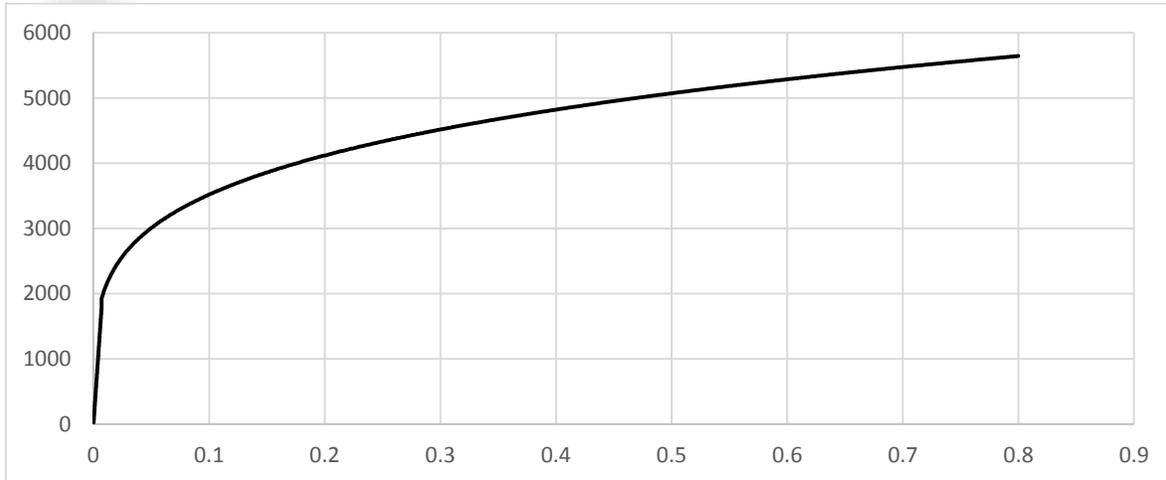


0.0187	6336.308
0.019	6437.96
0.0193	6503.129324
0.0196	6527.640358
0.0199	6551.869346
0.0202	6575.823714
0.0205	6599.510584
0.0208	6622.936795
0.0211	6646.108911
0.0214	6669.033244
0.0217	6691.715863
0.022	6714.162605
0.0223	6736.37909
0.0226	6758.370731
0.0229	6780.142742
0.0232	6801.700153
0.0235	6823.047813
0.0236	6830.117902
0.024	6858.173769
0.0247	6906.432155
0.0257	6973.609937
0.027	7058.047635
0.0286	7157.850749
0.0305	7271.025937
0.0327	7395.595677
0.0352	7529.683449
0.038	7671.568765
0.0411	7819.716053
0.0445	7972.783475
0.0482	8129.617934
0.0522	8289.241616
0.0565	8450.834166
0.0611	8613.713333
0.066	8777.315896
0.0712	8941.179907
0.0767	9104.928764
0.0825	9268.257282
0.0886	9430.919716
0.095	9592.719607
0.1017	9753.501238
0.1087	9913.142493



0.116	10071.54892
0.1236	10228.64882
0.1315	10384.38914
0.1397	10538.73214
0.1482	10691.65262
0.157	10843.13558
0.1661	10993.17436
0.1755	11141.76907
0.1852	11288.92528
0.1952	11434.65299
0.2055	11578.9657
0.2161	11721.87972
0.227	11863.41354
0.2382	12003.58736
0.2497	12142.42265
0.2615	12279.94181
0.2736	12416.16794
0.286	12551.12453
0.2987	12684.83533
0.3117	12817.32419
0.325	12948.6149
0.3386	13078.73111
0.3525	13207.69626
0.3667	13335.53348
0.3812	13462.26556
0.396	13587.91492
0.4111	13712.50354
0.4265	13836.05296
0.4422	13958.58429
0.4582	14080.11812
0.4745	14200.67461
0.4911	14320.27341

Gráfico y tabla de datos de la curva esfuerzo deformación calculada para la *Zona de Difusion* para los tratamientos de borurado continuo.



Deformacion (mm)	Esfuerzo (Mpa)
0.0001	25.505
0.00012	30.606
0.00014	35.707
0.00016	40.808
0.00018	45.909
0.0002	51.01
0.00022	56.111
0.00024	61.212
0.00026	66.313
0.00028	71.414
0.0003	76.515
0.00032	81.616
0.00034	86.717
0.00036	91.818
0.00038	96.919
0.0004	102.02
0.00042	107.121
0.00044	112.222
0.00046	117.323
0.00048	122.424
0.0005	127.525
0.00052	132.626
0.00054	137.727
0.00056	142.828



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.00058	147.929
0.0006	153.03
0.00062	158.131
0.00064	163.232
0.00066	168.333
0.00068	173.434
0.0007	178.535
0.00072	183.636
0.00074	188.737
0.00076	193.838
0.00078	198.939
0.0008	204.04
0.00082	209.141
0.00084	214.242
0.00086	219.343
0.00088	224.444
0.0009	229.545
0.00092	234.646
0.00094	239.747
0.00096	244.848
0.00098	249.949
0.001	255.05
0.00102	260.151
0.00104	265.252
0.00106	270.353
0.00108	275.454
0.0011	280.555
0.00112	285.656
0.00114	290.757
0.00116	295.858
0.00118	300.959
0.0012	306.06
0.00122	311.161
0.00124	316.262
0.00126	321.363
0.00128	326.464
0.0013	331.565
0.00132	336.666
0.00134	341.767
0.00136	346.868
0.00138	351.969



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.0014	357.07
0.00142	362.171
0.00144	367.272
0.00146	372.373
0.00148	377.474
0.0015	382.575
0.00152	387.676
0.00154	392.777
0.00156	397.878
0.00158	402.979
0.0016	408.08
0.00162	413.181
0.00164	418.282
0.00166	423.383
0.00168	428.484
0.0017	433.585
0.00172	438.686
0.00174	443.787
0.00176	448.888
0.00178	453.989
0.0018	459.09
0.00182	464.191
0.00184	469.292
0.00186	474.393
0.00188	479.494
0.0019	484.595
0.00192	489.696
0.00194	494.797
0.00196	499.898
0.00198	504.999
0.002	510.1
0.00202	515.201
0.00204	520.302
0.00206	525.403
0.00208	530.504
0.0021	535.605
0.00212	540.706
0.00214	545.807
0.00216	550.908
0.00218	556.009
0.0022	561.11



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.00222	566.211
0.00224	571.312
0.00226	576.413
0.00228	581.514
0.0023	586.615
0.00232	591.716
0.00234	596.817
0.00236	601.918
0.00238	607.019
0.0024	612.12
0.00242	617.221
0.00244	622.322
0.00246	627.423
0.00248	632.524
0.0025	637.625
0.00252	642.726
0.00254	647.827
0.00256	652.928
0.00258	658.029
0.0026	663.13
0.00262	668.231
0.00264	673.332
0.00266	678.433
0.00268	683.534
0.0027	688.635
0.00272	693.736
0.00274	698.837
0.00276	703.938
0.00278	709.039
0.0028	714.14
0.00282	719.241
0.00284	724.342
0.00286	729.443
0.00288	734.544
0.0029	739.645
0.00292	744.746
0.00294	749.847
0.00296	754.948
0.00298	760.049
0.003	765.15
0.00302	770.251



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.00304	775.352
0.00306	780.453
0.00308	785.554
0.0031	790.655
0.00312	795.756
0.00314	800.857
0.00316	805.958
0.00318	811.059
0.0032	816.16
0.00322	821.261
0.00324	826.362
0.00326	831.463
0.00328	836.564
0.0033	841.665
0.00332	846.766
0.00334	851.867
0.00336	856.968
0.00338	862.069
0.0034	867.17
0.00342	872.271
0.00344	877.372
0.00346	882.473
0.00348	887.574
0.0035	892.675
0.00352	897.776
0.00354	902.877
0.00356	907.978
0.00358	913.079
0.0036	918.18
0.00362	923.281
0.00364	928.382
0.00366	933.483
0.00368	938.584
0.0037	943.685
0.00372	948.786
0.00374	953.887
0.00376	958.988
0.00378	964.089
0.0038	969.19
0.00382	974.291
0.00384	979.392



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.00386	984.493
0.00388	989.594
0.0039	994.695
0.00392	999.796
0.00394	1004.897
0.00396	1009.998
0.00398	1015.099
0.004	1020.2
0.00402	1025.301
0.00404	1030.402
0.00406	1035.503
0.00408	1040.604
0.0041	1045.705
0.00412	1050.806
0.00414	1055.907
0.00416	1061.008
0.00418	1066.109
0.0042	1071.21
0.00422	1076.311
0.00424	1081.412
0.00426	1086.513
0.00428	1091.614
0.0043	1096.715
0.00432	1101.816
0.00434	1106.917
0.00436	1112.018
0.00438	1117.119
0.0044	1122.22
0.00442	1127.321
0.00444	1132.422
0.00446	1137.523
0.00448	1142.624
0.0045	1147.725
0.00452	1152.826
0.00454	1157.927
0.00456	1163.028
0.00458	1168.129
0.0046	1173.23
0.00462	1178.331
0.00464	1183.432
0.00466	1188.533



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.00468	1193.634
0.0047	1198.735
0.00472	1203.836
0.00474	1208.937
0.00476	1214.038
0.00478	1219.139
0.0048	1224.24
0.00482	1229.341
0.00484	1234.442
0.00486	1239.543
0.00488	1244.644
0.0049	1249.745
0.00492	1254.846
0.00494	1259.947
0.00496	1265.048
0.00498	1270.149
0.005	1275.25
0.00502	1280.351
0.00504	1285.452
0.00506	1290.553
0.00508	1295.654
0.0051	1300.755
0.00512	1305.856
0.00514	1310.957
0.00516	1316.058
0.00518	1321.159
0.0052	1326.26
0.00522	1331.361
0.00524	1336.462
0.00526	1341.563
0.00528	1346.664
0.0053	1351.765
0.00532	1356.866
0.00534	1361.967
0.00536	1367.068
0.00538	1372.169
0.0054	1377.27
0.00542	1382.371
0.00544	1387.472
0.00546	1392.573
0.00548	1397.674



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.0055	1402.775
0.00552	1407.876
0.00554	1412.977
0.00556	1418.078
0.00558	1423.179
0.0056	1428.28
0.00562	1433.381
0.00564	1438.482
0.00566	1443.583
0.00568	1448.684
0.0057	1453.785
0.00572	1458.886
0.00574	1463.987
0.00576	1469.088
0.00578	1474.189
0.0058	1479.29
0.00582	1484.391
0.00584	1489.492
0.00586	1494.593
0.00588	1499.694
0.0059	1504.795
0.00592	1509.896
0.00594	1514.997
0.00596	1520.098
0.00598	1525.199
0.006	1530.3
0.00602	1535.401
0.00604	1540.502
0.00606	1545.603
0.00608	1550.704
0.0061	1555.805
0.00612	1560.906
0.00614	1566.007
0.00616	1571.108
0.00618	1576.209
0.0062	1581.31
0.00622	1586.411
0.00624	1591.512
0.00626	1596.613
0.00628	1601.714
0.0063	1606.815



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.00632	1611.916
0.00634	1617.017
0.00636	1622.118
0.00638	1627.219
0.0064	1632.32
0.00642	1637.421
0.00644	1642.522
0.00646	1647.623
0.00648	1652.724
0.0065	1657.825
0.00652	1662.926
0.00654	1668.027
0.00656	1673.128
0.00658	1678.229
0.0066	1683.33
0.00662	1688.431
0.00664	1693.532
0.00666	1698.633
0.00668	1703.734
0.0067	1708.835
0.00672	1713.936
0.00674	1719.037
0.00676	1724.138
0.00678	1729.239
0.0068	1734.34
0.00682	1739.441
0.00684	1744.542
0.00686	1749.643
0.00688	1754.744
0.0069	1759.845
0.00692	1764.946
0.00694	1770.047
0.00696	1775.148
0.00698	1780.249
0.00708	1929.79665
0.00808	1988.549369
0.00908	2041.923589
0.01008	2090.93022
0.01108	2136.311234
0.01208	2178.628561
0.01308	2218.318783



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.01408	2255.728368
0.01508	2291.137234
0.01608	2324.775022
0.01708	2356.832641
0.01808	2387.47065
0.01908	2416.825468
0.02008	2445.014058
0.02108	2472.137522
0.02208	2498.283889
0.02308	2523.530315
0.02408	2547.944831
0.02508	2571.587751
0.02608	2594.51282
0.02708	2616.768146
0.02808	2638.39698
0.02908	2659.438355
0.03008	2679.927631
0.03108	2699.896948
0.03208	2719.375612
0.03308	2738.390424
0.03408	2756.965965
0.03508	2775.124838
0.03608	2792.887876
0.03708	2810.27433
0.03808	2827.302023
0.03908	2843.987496
0.04008	2860.346125
0.04108	2876.392233
0.04208	2892.139185
0.04308	2907.599472
0.04408	2922.78479
0.04508	2937.706104
0.04608	2952.37371
0.04708	2966.797291
0.04808	2980.985962
0.04908	2994.948318
0.05008	3008.692472
0.05108	3022.22609
0.05208	3035.556426
0.05308	3048.690351
0.05408	3061.634377



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.05508	3074.394689
0.05608	3086.977157
0.05708	3099.387368
0.05808	3111.630635
0.05908	3123.712023
0.06008	3135.636358
0.06108	3147.408245
0.06208	3159.032082
0.06308	3170.512072
0.06408	3181.852233
0.06508	3193.056411
0.06608	3204.12829
0.06708	3215.071398
0.06808	3225.889121
0.06908	3236.584704
0.07008	3247.161266
0.07108	3257.621801
0.07208	3267.969189
0.07308	3278.206197
0.07408	3288.33549
0.07508	3298.359632
0.07608	3308.281094
0.07708	3318.102257
0.07808	3327.825416
0.07908	3337.452787
0.08008	3346.986505
0.08108	3356.428636
0.08208	3365.781172
0.08308	3375.046039
0.08408	3384.225101
0.08508	3393.320157
0.08608	3402.332952
0.08708	3411.265171
0.08808	3420.118448
0.08908	3428.894366
0.09008	3437.594457
0.09108	3446.220207
0.09208	3454.773059
0.09308	3463.254408
0.09408	3471.665613
0.09508	3480.007989



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.09608	3488.282815
0.09708	3496.491332
0.09808	3504.634747
0.09908	3512.714231
0.10008	3520.730925
0.10108	3528.685937
0.10208	3536.580344
0.10308	3544.415195
0.10408	3552.191511
0.10508	3559.910285
0.10608	3567.572484
0.10708	3575.179052
0.10808	3582.730905
0.10908	3590.228937
0.11008	3597.674022
0.11108	3605.067008
0.11208	3612.408724
0.11308	3619.699979
0.11408	3626.941561
0.11508	3634.134239
0.11608	3641.278764
0.11708	3648.37587
0.11808	3655.426272
0.11908	3662.43067
0.12008	3669.389745
0.12108	3676.304165
0.12208	3683.174582
0.12308	3690.001633
0.12408	3696.785941
0.12508	3703.528114
0.12608	3710.228748
0.12708	3716.888425
0.12808	3723.507715
0.12908	3730.087176
0.13008	3736.627353
0.13108	3743.128779
0.13208	3749.591978
0.13308	3756.017461
0.13408	3762.405728
0.13508	3768.757272
0.13608	3775.072572



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.13708	3781.352099
0.13808	3787.596315
0.13908	3793.805672
0.14008	3799.980613
0.14108	3806.121572
0.14208	3812.228976
0.14308	3818.303241
0.14408	3824.344778
0.14508	3830.353988
0.14608	3836.331265
0.14708	3842.276996
0.14808	3848.19156
0.14908	3854.07533
0.15008	3859.928669
0.15108	3865.751938
0.15208	3871.545488
0.15308	3877.309664
0.15408	3883.044807
0.15508	3888.751248
0.15608	3894.429317
0.15708	3900.079333
0.15808	3905.701614
0.15908	3911.296469
0.16008	3916.864203
0.16108	3922.405116
0.16208	3927.919502
0.16308	3933.407651
0.16408	3938.869848
0.16508	3944.306372
0.16608	3949.717498
0.16708	3955.103497
0.16808	3960.464635
0.16908	3965.801174
0.17008	3971.11337
0.17108	3976.401478
0.17208	3981.665745
0.17308	3986.906418
0.17408	3992.123738
0.17508	3997.317941
0.17608	4002.489261
0.17708	4007.637929



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.17808	4012.76417
0.17908	4017.868208
0.18008	4022.950261
0.18108	4028.010546
0.18208	4033.049276
0.18308	4038.066659
0.18408	4043.062902
0.18508	4048.038209
0.18608	4052.992779
0.18708	4057.92681
0.18808	4062.840496
0.18908	4067.734027
0.19008	4072.607594
0.19108	4077.461382
0.19208	4082.295573
0.19308	4087.110349
0.19408	4091.905888
0.19508	4096.682364
0.19608	4101.43995
0.19708	4106.178818
0.19808	4110.899135
0.19908	4115.601067
0.20008	4120.284777
0.20108	4124.950427
0.20208	4129.598175
0.20308	4134.228179
0.20408	4138.840592
0.20508	4143.435568
0.20608	4148.013256
0.20708	4152.573806
0.20808	4157.117364
0.20908	4161.644074
0.21008	4166.154078
0.21108	4170.647519
0.21208	4175.124533
0.21308	4179.58526
0.21408	4184.029833
0.21508	4188.458387
0.21608	4192.871053
0.21708	4197.267961
0.21808	4201.64924



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.21908	4206.015017
0.22008	4210.365416
0.22108	4214.700562
0.22208	4219.020577
0.22308	4223.325581
0.22408	4227.615694
0.22508	4231.891032
0.22608	4236.151713
0.22708	4240.397851
0.22808	4244.629559
0.22908	4248.846949
0.23008	4253.050132
0.23108	4257.239217
0.23208	4261.414312
0.23308	4265.575525
0.23408	4269.722959
0.23508	4273.85672
0.23608	4277.976911
0.23708	4282.083633
0.23808	4286.176986
0.23908	4290.257071
0.24008	4294.323985
0.24108	4298.377826
0.24208	4302.418689
0.24308	4306.44667
0.24408	4310.461862
0.24508	4314.464357
0.24608	4318.454249
0.24708	4322.431627
0.24808	4326.39658
0.24908	4330.349199
0.25008	4334.28957
0.25108	4338.21778
0.25208	4342.133914
0.25308	4346.038058
0.25408	4349.930296
0.25508	4353.81071
0.25608	4357.679383
0.25708	4361.536395
0.25808	4365.381827
0.25908	4369.215758



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.26008	4373.038268
0.26108	4376.849433
0.26208	4380.649331
0.26308	4384.438037
0.26408	4388.215628
0.26508	4391.982177
0.26608	4395.737758
0.26708	4399.482445
0.26808	4403.216309
0.26908	4406.939423
0.27008	4410.651856
0.27108	4414.353679
0.27208	4418.04496
0.27308	4421.72577
0.27408	4425.396175
0.27508	4429.056243
0.27608	4432.70604
0.27708	4436.345632
0.27808	4439.975084
0.27908	4443.594462
0.28008	4447.203828
0.28108	4450.803247
0.28208	4454.39278
0.28308	4457.97249
0.28408	4461.542438
0.28508	4465.102686
0.28608	4468.653292
0.28708	4472.194318
0.28808	4475.725822
0.28908	4479.247863
0.29008	4482.760498
0.29108	4486.263785
0.29208	4489.757781
0.29308	4493.242543
0.29408	4496.718125
0.29508	4500.184584
0.29608	4503.641973
0.29708	4507.090348
0.29808	4510.529762
0.29908	4513.960268
0.30008	4517.381919



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.30108	4520.794768
0.30208	4524.198865
0.30308	4527.594263
0.30408	4530.981011
0.30508	4534.359162
0.30608	4537.728763
0.30708	4541.089866
0.30808	4544.442518
0.30908	4547.786769
0.31008	4551.122666
0.31108	4554.450257
0.31208	4557.76959
0.31308	4561.080712
0.31408	4564.383668
0.31508	4567.678505
0.31608	4570.965269
0.31708	4574.244005
0.31808	4577.514757
0.31908	4580.77757
0.32008	4584.032488
0.32108	4587.279555
0.32208	4590.518814
0.32308	4593.750308
0.32408	4596.974079
0.32508	4600.190171
0.32608	4603.398624
0.32708	4606.59948
0.32808	4609.79278
0.32908	4612.978565
0.33008	4616.156876
0.33108	4619.327752
0.33208	4622.491234
0.33308	4625.64736
0.33408	4628.79617
0.33508	4631.937703
0.33608	4635.071997
0.33708	4638.19909
0.33808	4641.31902
0.33908	4644.431825
0.34008	4647.537541
0.34108	4650.636207



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.34208	4653.727857
0.34308	4656.81253
0.34408	4659.89026
0.34508	4662.961083
0.34608	4666.025035
0.34708	4669.082152
0.34808	4672.132467
0.34908	4675.176016
0.35008	4678.212832
0.35108	4681.242951
0.35208	4684.266405
0.35308	4687.283228
0.35408	4690.293454
0.35508	4693.297115
0.35608	4696.294244
0.35708	4699.284874
0.35808	4702.269038
0.35908	4705.246766
0.36008	4708.21809
0.36108	4711.183043
0.36208	4714.141655
0.36308	4717.093958
0.36408	4720.039982
0.36508	4722.979757
0.36608	4725.913315
0.36708	4728.840685
0.36808	4731.761896
0.36908	4734.67698
0.37008	4737.585964
0.37108	4740.488879
0.37208	4743.385753
0.37308	4746.276615
0.37408	4749.161493
0.37508	4752.040416
0.37608	4754.913412
0.37708	4757.780509
0.37808	4760.641734
0.37908	4763.497116
0.38008	4766.346681
0.38108	4769.190456
0.38208	4772.028469



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.38308	4774.860746
0.38408	4777.687314
0.38508	4780.508198
0.38608	4783.323426
0.38708	4786.133023
0.38808	4788.937014
0.38908	4791.735426
0.39008	4794.528284
0.39108	4797.315612
0.39208	4800.097437
0.39308	4802.873783
0.39408	4805.644674
0.39508	4808.410136
0.39608	4811.170191
0.39708	4813.924866
0.39808	4816.674183
0.39908	4819.418167
0.40008	4822.156841
0.40108	4824.890228
0.40208	4827.618353
0.40308	4830.341238
0.40408	4833.058906
0.40508	4835.77138
0.40608	4838.478683
0.40708	4841.180837
0.40808	4843.877865
0.40908	4846.569789
0.41008	4849.256631
0.41108	4851.938413
0.41208	4854.615158
0.41308	4857.286885
0.41408	4859.953618
0.41508	4862.615377
0.41608	4865.272184
0.41708	4867.924059
0.41808	4870.571024
0.41908	4873.2131
0.42008	4875.850307
0.42108	4878.482665
0.42208	4881.110195
0.42308	4883.732918



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.42408	4886.350853
0.42508	4888.964021
0.42608	4891.572441
0.42708	4894.176133
0.42808	4896.775117
0.42908	4899.369412
0.43008	4901.959037
0.43108	4904.544012
0.43208	4907.124356
0.43308	4909.700088
0.43408	4912.271226
0.43508	4914.83779
0.43608	4917.399798
0.43708	4919.957269
0.43808	4922.51022
0.43908	4925.058671
0.44008	4927.602639
0.44108	4930.142143
0.44208	4932.677199
0.44308	4935.207828
0.44408	4937.734045
0.44508	4940.255868
0.44608	4942.773316
0.44708	4945.286405
0.44808	4947.795152
0.44908	4950.299575
0.45008	4952.799691
0.45108	4955.295517
0.45208	4957.78707
0.45308	4960.274366
0.45408	4962.757422
0.45508	4965.236254
0.45608	4967.71088
0.45708	4970.181315
0.45808	4972.647576
0.45908	4975.109678
0.46008	4977.567638
0.46108	4980.021472
0.46208	4982.471195
0.46308	4984.916824
0.46408	4987.358374



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.46508	4989.79586
0.46608	4992.229299
0.46708	4994.658704
0.46808	4997.084093
0.46908	4999.50548
0.47008	5001.922879
0.47108	5004.336307
0.47208	5006.745778
0.47308	5009.151306
0.47408	5011.552908
0.47508	5013.950596
0.47608	5016.344387
0.47708	5018.734294
0.47808	5021.120331
0.47908	5023.502514
0.48008	5025.880857
0.48108	5028.255373
0.48208	5030.626076
0.48308	5032.992981
0.48408	5035.356102
0.48508	5037.715453
0.48608	5040.071046
0.48708	5042.422897
0.48808	5044.771018
0.48908	5047.115423
0.49008	5049.456126
0.49108	5051.79314
0.49208	5054.126477
0.49308	5056.456153
0.49408	5058.782179
0.49508	5061.104569
0.49608	5063.423335
0.49708	5065.738491
0.49808	5068.05005
0.49908	5070.358024
0.50008	5072.662426
0.50108	5074.963269
0.50208	5077.260565
0.50308	5079.554327
0.50408	5081.844567
0.50508	5084.131298



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.50608	5086.414531
0.50708	5088.69428
0.50808	5090.970557
0.50908	5093.243372
0.51008	5095.51274
0.51108	5097.77867
0.51208	5100.041177
0.51308	5102.30027
0.51408	5104.555962
0.51508	5106.808266
0.51608	5109.057191
0.51708	5111.302751
0.51808	5113.544956
0.51908	5115.783818
0.52008	5118.019349
0.52108	5120.251559
0.52208	5122.480461
0.52308	5124.706064
0.52408	5126.928382
0.52508	5129.147423
0.52608	5131.363201
0.52708	5133.575725
0.52808	5135.785006
0.52908	5137.991056
0.53008	5140.193886
0.53108	5142.393505
0.53208	5144.589925
0.53308	5146.783156
0.53408	5148.97321
0.53508	5151.160096
0.53608	5153.343825
0.53708	5155.524407
0.53808	5157.701853
0.53908	5159.876173
0.54008	5162.047378
0.54108	5164.215477
0.54208	5166.380482
0.54308	5168.542401
0.54408	5170.701245
0.54508	5172.857024
0.54608	5175.009748



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.54708	5177.159427
0.54808	5179.30607
0.54908	5181.449689
0.55008	5183.590291
0.55108	5185.727888
0.55208	5187.862488
0.55308	5189.994102
0.55408	5192.122738
0.55508	5194.248407
0.55608	5196.371118
0.55708	5198.49088
0.55808	5200.607702
0.55908	5202.721595
0.56008	5204.832567
0.56108	5206.940627
0.56208	5209.045786
0.56308	5211.148051
0.56408	5213.247432
0.56508	5215.343938
0.56608	5217.437578
0.56708	5219.528361
0.56808	5221.616296
0.56908	5223.701392
0.57008	5225.783658
0.57108	5227.863102
0.57208	5229.939733
0.57308	5232.01356
0.57408	5234.084592
0.57508	5236.152837
0.57608	5238.218304
0.57708	5240.281001
0.57808	5242.340937
0.57908	5244.398121
0.58008	5246.45256
0.58108	5248.504263
0.58208	5250.553239
0.58308	5252.599495
0.58408	5254.643041
0.58508	5256.683884
0.58608	5258.722032
0.58708	5260.757494



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.58808	5262.790277
0.58908	5264.820391
0.59008	5266.847842
0.59108	5268.872639
0.59208	5270.894789
0.59308	5272.914302
0.59408	5274.931183
0.59508	5276.945443
0.59608	5278.957087
0.59708	5280.966125
0.59808	5282.972563
0.59908	5284.976409
0.60008	5286.977672
0.60108	5288.976358
0.60208	5290.972476
0.60308	5292.966032
0.60408	5294.957035
0.60508	5296.945492
0.60608	5298.93141
0.60708	5300.914797
0.60808	5302.89566
0.60908	5304.874007
0.61008	5306.849844
0.61108	5308.823179
0.61208	5310.79402
0.61308	5312.762373
0.61408	5314.728247
0.61508	5316.691647
0.61608	5318.652581
0.61708	5320.611056
0.61808	5322.56708
0.61908	5324.520658
0.62008	5326.471799
0.62108	5328.420509
0.62208	5330.366796
0.62308	5332.310665
0.62408	5334.252124
0.62508	5336.19118
0.62608	5338.127839
0.62708	5340.062109
0.62808	5341.993996



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.62908	5343.923507
0.63008	5345.850648
0.63108	5347.775427
0.63208	5349.697849
0.63308	5351.617922
0.63408	5353.535651
0.63508	5355.451045
0.63608	5357.364108
0.63708	5359.274848
0.63808	5361.183271
0.63908	5363.089383
0.64008	5364.993191
0.64108	5366.894701
0.64208	5368.79392
0.64308	5370.690854
0.64408	5372.585509
0.64508	5374.477892
0.64608	5376.368008
0.64708	5378.255864
0.64808	5380.141466
0.64908	5382.024821
0.65008	5383.905934
0.65108	5385.784811
0.65208	5387.66146
0.65308	5389.535884
0.65408	5391.408092
0.65508	5393.278088
0.65608	5395.145879
0.65708	5397.01147
0.65808	5398.874869
0.65908	5400.736079
0.66008	5402.595108
0.66108	5404.451961
0.66208	5406.306644
0.66308	5408.159164
0.66408	5410.009524
0.66508	5411.857732
0.66608	5413.703794
0.66708	5415.547714
0.66808	5417.389498
0.66908	5419.229153



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.67008	5421.066684
0.67108	5422.902096
0.67208	5424.735395
0.67308	5426.566587
0.67408	5428.395677
0.67508	5430.222671
0.67608	5432.047574
0.67708	5433.870391
0.67808	5435.691129
0.67908	5437.509792
0.68008	5439.326386
0.68108	5441.140917
0.68208	5442.953389
0.68308	5444.763809
0.68408	5446.572181
0.68508	5448.37851
0.68608	5450.182803
0.68708	5451.985064
0.68808	5453.785298
0.68908	5455.583511
0.69008	5457.379708
0.69108	5459.173894
0.69208	5460.966075
0.69308	5462.756254
0.69408	5464.544439
0.69508	5466.330632
0.69608	5468.114841
0.69708	5469.897069
0.69808	5471.677322
0.69908	5473.455605
0.70008	5475.231923
0.70108	5477.00628
0.70208	5478.778682
0.70308	5480.549133
0.70408	5482.31764
0.70508	5484.084205
0.70608	5485.848835
0.70708	5487.611534
0.70808	5489.372308
0.70908	5491.13116
0.71008	5492.888095



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.71108	5494.643119
0.71208	5496.396236
0.71308	5498.147452
0.71408	5499.896769
0.71508	5501.644195
0.71608	5503.389732
0.71708	5505.133386
0.71808	5506.875161
0.71908	5508.615063
0.72008	5510.353095
0.72108	5512.089262
0.72208	5513.823569
0.72308	5515.55602
0.72408	5517.286621
0.72508	5519.015375
0.72608	5520.742286
0.72708	5522.467361
0.72808	5524.190602
0.72908	5525.912015
0.73008	5527.631603
0.73108	5529.349372
0.73208	5531.065325
0.73308	5532.779468
0.73408	5534.491804
0.73508	5536.202338
0.73608	5537.911074
0.73708	5539.618016
0.73808	5541.32317
0.73908	5543.026538
0.74008	5544.728126
0.74108	5546.427938
0.74208	5548.125977
0.74308	5549.822249
0.74408	5551.516756
0.74508	5553.209505
0.74608	5554.900498
0.74708	5556.58974
0.74808	5558.277235
0.74908	5559.962987
0.75008	5561.647001
0.75108	5563.32928



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

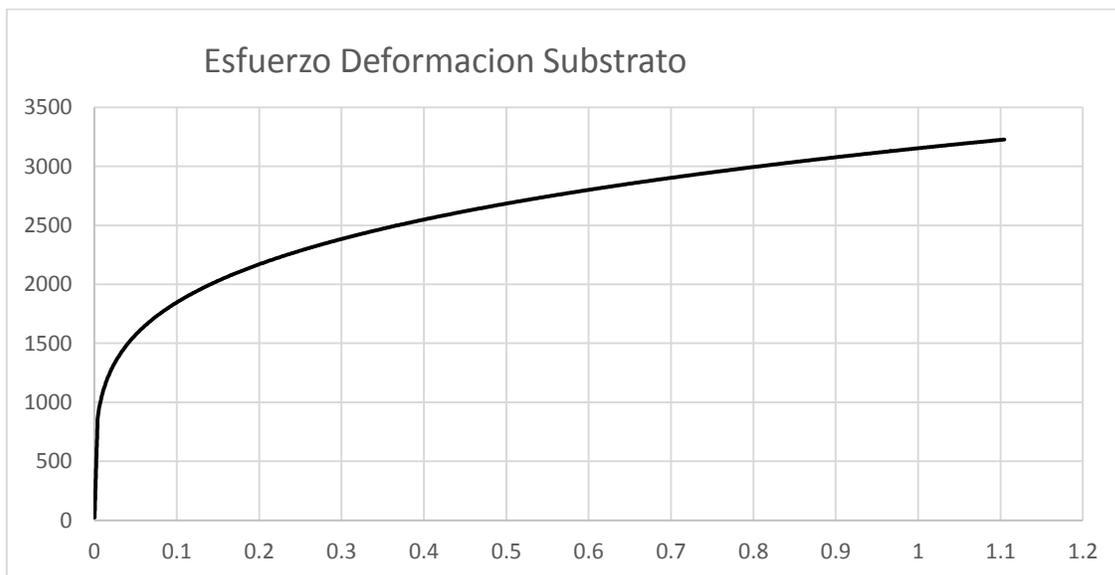


0.75208	5565.009828
0.75308	5566.688651
0.75408	5568.36575
0.75508	5570.041132
0.75608	5571.714799
0.75708	5573.386756
0.75808	5575.057007
0.75908	5576.725555
0.76008	5578.392405
0.76108	5580.057561
0.76208	5581.721027
0.76308	5583.382806
0.76408	5585.042902
0.76508	5586.70132
0.76608	5588.358063
0.76708	5590.013136
0.76808	5591.666541
0.76908	5593.318283
0.77008	5594.968366
0.77108	5596.616793
0.77208	5598.263569
0.77308	5599.908696
0.77408	5601.55218
0.77508	5603.194023
0.77608	5604.834229
0.77708	5606.472803
0.77808	5608.109748
0.77908	5609.745067
0.78008	5611.378764
0.78108	5613.010843
0.78208	5614.641308
0.78308	5616.270162
0.78408	5617.897409
0.78508	5619.523052
0.78608	5621.147096
0.78708	5622.769543
0.78808	5624.390398
0.78908	5626.009664
0.79008	5627.627344
0.79108	5629.243443
0.79208	5630.857962



0.79308	5632.470907
0.79408	5634.082281
0.79508	5635.692087
0.79608	5637.300329
0.79708	5638.907009
0.79808	5640.512133
0.79908	5642.115702
0.80008	5643.717721

Gráfico y tabla de datos de la curva esfuerzo deformación calculada para el *Substrato* para el tratamiento de borurado continuo.



Deformacion elastica	Esfuerzo elastico Mpa
0.0001	22.484
0.0002	44.968
0.0003	67.452
0.0004	89.936
0.0005	112.42
0.0006	134.904
0.0007	157.388
0.0008	179.872



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.0009	202.356
0.001	224.84
0.0011	247.324
0.0012	269.808
0.0013	292.292
0.0014	314.776
0.0015	337.26
0.0016	359.744
0.0017	382.228
0.0018	404.712
0.0019	427.196
0.002	449.68
0.0021	472.164
0.0022	494.648
0.0023	517.132
0.0024	539.616
0.0025	562.1
0.0026	584.584
0.0027	607.068
0.0028	629.552
0.0029	652.036
0.003	674.52
0.0031	697.004
0.0032	719.488
0.0033	741.972
0.0034	764.456
0.0035	786.94
0.0036	809.424
0.0037	831.908
0.0038	854.392
0.0048	912.345119
0.0058	953.3472901
0.0068	989.2330872
0.0078	1021.269565
0.0088	1050.292195
0.0098	1076.883272
0.0108	1101.466142
0.0118	1124.359008
0.0128	1145.807576
0.0138	1166.005839
0.0148	1185.109856



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.0158	1203.247186
0.0168	1220.523539
0.0178	1237.027573
0.0188	1252.834435
0.0198	1268.008419
0.0208	1282.604993
0.0218	1296.67237
0.0228	1310.252746
0.0238	1323.383272
0.0248	1336.096847
0.0258	1348.42275
0.0268	1360.387166
0.0278	1372.01361
0.0288	1383.323288
0.0298	1394.335394
0.0308	1405.067359
0.0318	1415.53507
0.0328	1425.753044
0.0338	1435.734588
0.0348	1445.491932
0.0358	1455.036342
0.0368	1464.378223
0.0378	1473.527206
0.0388	1482.492222
0.0398	1491.281572
0.0408	1499.902985
0.0418	1508.363671
0.0428	1516.670365
0.0438	1524.829373
0.0448	1532.846604
0.0458	1540.727606
0.0468	1548.477592
0.0478	1556.101473
0.0488	1563.603875
0.0498	1570.989165
0.0508	1578.261469
0.0518	1585.424688
0.0528	1592.482519
0.0538	1599.438465
0.0548	1606.29585
0.0558	1613.057831



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.0568	1619.727411
0.0578	1626.307446
0.0588	1632.800657
0.0598	1639.209637
0.0608	1645.53686
0.0618	1651.784689
0.0628	1657.955382
0.0638	1664.051095
0.0648	1670.073894
0.0658	1676.025757
0.0668	1681.908579
0.0678	1687.724175
0.0688	1693.47429
0.0698	1699.160596
0.0708	1704.784701
0.0718	1710.348149
0.0728	1715.852425
0.0738	1721.29896
0.0748	1726.689129
0.0758	1732.024257
0.0768	1737.305621
0.0778	1742.534454
0.0788	1747.711942
0.0798	1752.839233
0.0808	1757.917431
0.0818	1762.947608
0.0828	1767.930795
0.0838	1772.867991
0.0848	1777.760163
0.0858	1782.608243
0.0868	1787.413137
0.0878	1792.175721
0.0888	1796.896842
0.0898	1801.577323
0.0908	1806.217959
0.0918	1810.819524
0.0928	1815.382767
0.0938	1819.908414
0.0948	1824.397172
0.0958	1828.849725
0.0968	1833.266739



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.0978	1837.64886
0.0988	1841.996717
0.0998	1846.31092
0.1008	1850.592063
0.1018	1854.840723
0.1028	1859.057464
0.1038	1863.24283
0.1048	1867.397356
0.1058	1871.521558
0.1068	1875.615942
0.1078	1879.681
0.1088	1883.717211
0.1098	1887.725042
0.1108	1891.704948
0.1118	1895.657373
0.1128	1899.582751
0.1138	1903.481503
0.1148	1907.354042
0.1158	1911.200771
0.1168	1915.022081
0.1178	1918.818356
0.1188	1922.589972
0.1198	1926.337292
0.1208	1930.060676
0.1218	1933.760472
0.1228	1937.437021
0.1238	1941.090657
0.1248	1944.721706
0.1258	1948.330488
0.1268	1951.917313
0.1278	1955.482487
0.1288	1959.026309
0.1298	1962.549071
0.1308	1966.051059
0.1318	1969.532553
0.1328	1972.993826
0.1338	1976.435148
0.1348	1979.856781
0.1358	1983.258983
0.1368	1986.642005
0.1378	1990.006096



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.1388	1993.351496
0.1398	1996.678444
0.1408	1999.987173
0.1418	2003.277909
0.1428	2006.550878
0.1438	2009.806298
0.1448	2013.044384
0.1458	2016.265348
0.1468	2019.469397
0.1478	2022.656733
0.1488	2025.827557
0.1498	2028.982063
0.1508	2032.120444
0.1518	2035.242889
0.1528	2038.349582
0.1538	2041.440706
0.1548	2044.516438
0.1558	2047.576954
0.1568	2050.622427
0.1578	2053.653026
0.1588	2056.668916
0.1598	2059.670261
0.1608	2062.657221
0.1618	2065.629956
0.1628	2068.588618
0.1638	2071.533361
0.1648	2074.464336
0.1658	2077.381688
0.1668	2080.285563
0.1678	2083.176103
0.1688	2086.053449
0.1698	2088.917739
0.1708	2091.769108
0.1718	2094.607689
0.1728	2097.433614
0.1738	2100.247012
0.1748	2103.04801
0.1758	2105.836734
0.1768	2108.613306
0.1778	2111.377847
0.1788	2114.130478



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.1798	2116.871315
0.1808	2119.600474
0.1818	2122.318069
0.1828	2125.024213
0.1838	2127.719015
0.1848	2130.402585
0.1858	2133.07503
0.1868	2135.736456
0.1878	2138.386966
0.1888	2141.026663
0.1898	2143.655649
0.1908	2146.274022
0.1918	2148.881881
0.1928	2151.479322
0.1938	2154.066442
0.1948	2156.643333
0.1958	2159.210089
0.1968	2161.766801
0.1978	2164.313558
0.1988	2166.85045
0.1998	2169.377565
0.2008	2171.894987
0.2018	2174.402804
0.2028	2176.901098
0.2038	2179.389953
0.2048	2181.86945
0.2058	2184.33967
0.2068	2186.800692
0.2078	2189.252595
0.2088	2191.695457
0.2098	2194.129353
0.2108	2196.554359
0.2118	2198.97055
0.2128	2201.377999
0.2138	2203.776778
0.2148	2206.166959
0.2158	2208.548613
0.2168	2210.921809
0.2178	2213.286617
0.2188	2215.643104
0.2198	2217.991336



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCULA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



0.2208	2220.331382
0.2218	2222.663305
0.2228	2224.987171
0.2238	2227.303044
0.2248	2229.610986
0.2258	2231.91106
0.2268	2234.203326
0.2278	2236.487847
0.2288	2238.764682