



IDENTIDAD
INSTITUCIONAL

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA AL
DESGASTE EROSIVO EN UN ACERO AISI 4140
ENDURECIDO POR EL TRATAMIENTO DE
BORURIZACIÓN”**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Presenta:

M. en I. José Luis Nava Sánchez

DIRECTORES:

Dr. Iván Enrique Campos Silva

Dr. Germán Anibal Rodríguez Castro



México, D.F. Mayo 2016



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14 BIS

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 11:00 horas del día 18 del mes de Marzo 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:

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO EN UN ACERO AISI 4140 ENDURECIDO POR EL TRATAMIENTO DE BORURIZACIÓN.”

Presentada por el alumno:

NAVA
 Apellido paterno

SÁNCHEZ
 Apellido materno

JOSÉ LUIS
 Nombre(s)

Con registro:

A	1	2	0	6	3	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERIA 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 COMISION REVISORA
 Directores de tesis

DR. IVÁN ENRIQUE CAMPOS SILVA
 Presidente

DR. GERMÁN ANIBAL RODRÍGUEZ CASTRO
 Segundo Vocal

DR. JESÚS ALBERTO MEDA CAMPAÑA
 Tercer Vocal

DR. GERMÁN ANIBAL RODRÍGUEZ CASTRO
 Secretario

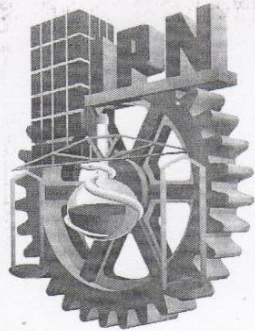
DR. ALFONSO MENESES AMADOR

DR. JOSÉ MARTÍNEZ TRINIDAD

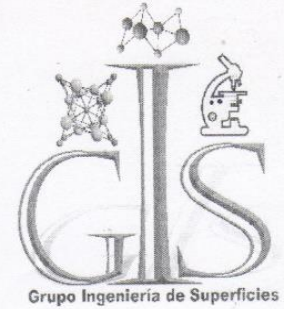
EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. RICARDO OCTAVIO A. MOTA PALOMINO
 DIRECTOR DE LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y MECÁNICA





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F., el día 12 del mes de mayo del año 2016 el que suscribe **José Luis Nava Sánchez** alumno del programa **Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica**, con numero de registro **A120636** adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de:

Dr. Iván Enrique Campos Silva

Dr. German Anibal Rodríguez Castro

Cede los derechos del trabajo titulado:

“Estudio experimental de la resistencia al desgaste erosivo en un acero AISI 4140 endurecido por el tratamiento de borurización”

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 permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección:

luis_nava683@hotmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Nombre y firma

M. en I. José Luis Nava Sánchez

Índice

Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Introducción.....	VII
ANTECEDENTES.....	IX
JUSTIFICACIÓN.....	XIV
OBJETIVOS.....	XV
Objetivos particulares:	XV
VI. METODOLOGÍA.....	XVI
CAPÍTULO I.....	1
Estado del arte.....	1
1.1 Borurización en aceros.....	1
1.2 Borurización en polvo en aceros grado maquinaria.....	1
1.3 Capas boruradas formadas en aceros.....	2
1.4 Aplicaciones del acero AISI 4140 borurado.....	5
1.5 Generalidades del desgaste erosivo por partícula sólida.....	5
1.6 Ensayos de erosión por partícula sólida.....	7
1.7 Mecanismos de desgaste de acuerdo a la acción tribológica.....	11
1.8 Especificaciones del ensayo de erosión por partícula sólida conforme a la norma ASTM G76.....	13
1.8.1 Condiciones para realizar el ensayo de erosión por partícula sólida.....	13
1.9 Mecanismos de desgaste erosivo.....	15
CAPÍTULO II.....	18
Diseño de una máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura.....	18
2.1 Pasos de la técnica de despliegue de funciones de la calidad (QFD).....	18
2.2 Identificar al cliente o consumidor.....	19
2.3 Determinar los requerimientos del cliente.....	19
2.4 Determinar la importancia relativa de los requerimientos.....	21
2.5 Identificar y evaluar la competencia.....	23
2.5.1 Identificar a la competencia.....	23
2.5.2 Evaluar a los competidores.....	24

2.6 Generación de las especificaciones de ingeniería.....	27
2.7 Determinación de la relación de los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería.....	28
2.8 Determinar los objetivos de ingeniería.....	30
2.9 Identificar la relación entre los requerimientos de ingeniería.....	32
2.10 Diseño conceptual.....	35
2.10.1 Análisis funcional.....	35
2.10.2 Definición de la función global de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.....	35
2.11 Descomposición de la función global de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.	36
2.11.1 Generación de conceptos o soluciones.....	37
2.11.2 Matriz morfológica de soluciones.....	38
2.11.3 Conceptos para la función “Soportar todos los elementos propios”.	39
2.11.4 Conceptos para la función “Suministrar una temperatura del aire a 673 K”.	39
2.11.5 Combinación de soluciones en conceptos globales.	40
2.11.6 Conceptos globales del sistema para calentar aire y la cámara de erosión a 673 K.....	41
2.11.7 Conceptos globales del sistema para rotar ángulos.	43
2.12 Diseño de detalle.....	45
2.12. 1 Diseño de las resistencias eléctricas del tubo calentador de aire.....	45
2.12.2 Diseño de la cámara de erosión.....	46
CAPÍTULO III.....	50
Procedimiento experimental	50
3.1 Tratamiento termoquímico de borurización en polvo del acero AISI 4140.	50
3.2 Caracterización de las capas boruradas.....	52
3.2.1 Difracción de rayos X.....	52
3.2.2 Ensayo de indentación instrumentada Berkovich.....	53
3.3 Ensayos de erosión por partícula sólida a baja y alta temperatura (673K).	54
3.3.1 Procedimiento de la prueba.....	55
CAPÍTULO IV.....	60
Resultados y discusiones	60

4.1 Morfología de la capa Fe₂B formada durante el tratamiento termoquímico de borurización en un acero AISI 4140.....	60
4.2 Caracterización físico-química de la capa Fe₂B, formada durante el tratamiento termoquímico de borurización en un acero AISI 4140.....	61
4.3 Ensayo de indentación instrumentada Berkovich.	62
4.3.1 Determinación de los gradientes de dureza en la capa borurada Fe ₂ B.	62
4.3.2 Definición de la razón H/E.....	63
4.3.3 Estimación de los esfuerzos residuales en la fase Fe ₂ B.....	65
4.4 Ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente.	67
4.5 Ensayos de erosión por partícula sólida a una temperatura de 673 K.	71
4.6 Mecanismos de desgaste generados en los ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K.	75
4.6 Comparativo de los resultados de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K del acero AISI 4140 borurado con respecto a otros trabajos de investigación.....	80
Conclusiones generales.	83
Perspectivas de trabajo.	84
Referencias bibliográficas.....	85
Anexo A.....	88
Manual de operación para pruebas de desgaste erosivo por impacto de partícula sólida	88
Anexo B.....	94
Manual de operación del anemómetro digital.	94
Anexo C.....	98
Planos de la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.	98
Anexo D.....	103
Mecanismos de desgaste en las huellas de erosión por partícula sólida.	103

Lista de Figuras

Figura I. Micrografía de un acero AISI 4140 endurecido por el proceso termoquímico de borurización en caja a una temperatura de 1273 K, con un tiempo de tratamiento de 8 h. (Campos <i>et al</i> , 2010)	X
Figura II. Componente dañado por el impacto de partículas sólidas. (Urm <i>et al</i> , 2006)	XI
Figura III. Relación de la tasa de erosión en aceros 12% Cr y Nimonic 901, con diferentes tratamientos térmicos a una temperatura de 866 K, en función del ángulo de impacto. (Urm <i>et al</i> , 2006)	XII
Figura IV. Relación entre la tasa de erosión y la velocidad de impacto por partícula sólida sobre aceros 12% Cr bajo diversos tratamientos térmicos. (Miyazaki and Ikeda, 2002).....	XIII
Figura 1.1 Diagrama de fases Fe-B (Matushka 1980).....	3
Figura 1.2 Fotomicrografía obtenida mediante MEB de un acero AISI 1018 endurecido por difusión de boro en donde se observa la formación de una bicapa de fases FeB y Fe ₂ B.....	4
Figura 1.3. Erosión de una superficie conforme al Angulo de impacto (a) normal 90° y (b) ángulo diferente de 90°.....	7
Figura 1.4. Tipos de abrasión: (a) abrasión de dos cuerpos y (b) abrasión de tres cuerpos (Fini <i>et al</i> , 1992).....	8
Figura 1.5. Fenómeno de erosión por partícula sólida (Hutchings, 1992).....	8
Figura 1.6. Diferentes formas en que actúan las partículas sólidas impactadas contra un material, en la formación de: (a) microcorte y micro-arado, (b) Agrietado superficial, (c) Desplazamiento del material al borde de los cráteres de impacto, (d) Grietas por fatiga superficial y sub-superficiales causadas por los múltiples impactos, (e) Formación de pequeñas hojuelas debido a la extrusión y forjado de los impactos y (f) formación de pequeñas hojuelas por procesos de extrusión inversos. (Zuhm Ghar, 1987).....	9
Figura 1.7. Dependencia típica del desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto de la partícula incidente. (Hutchings, 1992)	10
Figura 1.8. Mecanismos de remoción de material que actúan durante el desgaste erosivo cuando una partícula solida colisiona una superficie plana, para: (a) materiales dúctiles y (b) materiales frágiles. (Meng and Ludema, 1995).....	15
Figura 1.9. Diferentes mecanismos de erosión.	17
Figura 2.1. Esquema de la técnica de despliegue de funciones de la calidad (QFD).	18

Figura 2.2 Relación de los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería para la máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura.....	29
Figura 2.3 Relación entre los requerimientos de ingeniería.....	33
Figura 2.4 Casa de calidad de QFD para una máquina de ensayos de erosión por partícula sólida.	34
Figura 2.5 Función global de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.	35
Figura 2.6 Análisis funcional de la máquina de erosión por partícula sólida.	37
Figura 2.7 Conceptos propuestos para la función soportar los elementos propios a) Estructura 1 y b) Estructura 2.....	39
Figura 2.8 Conceptos propuestos para la función suministrar una temperatura de 673 K a) banco de resistencias y b) resistencias en forma de espiral.	40
Figura 2.9 Concepto global N° 1 del sistema para calentar aire y la cámara de erosión.	42
Figura 2.10 Concepto global N° 2 para el sistema para el sistema para calentar aire y la cámara de erosión.	43
Figura 2.11 Concepto global N° 1 para el sistema de rotar ángulos.....	44
Figura 2.12 Concepto global N° 2 para el sistema de rotar ángulos.....	45
Figura 2.13 Concepto global de la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.	45
Figura 3.1 Diagrama de flujo que presenta la caracterización metalográfica de los boruros de hierro en un acero AISI 4140.	52
Figura 3.2 Indentaciones Berkovich a lo largo de la capa borurada empleando una carga constante de 100 mN. La temperatura de borurización fue de 1223 K durante 6 h de exposición.....	53
Figura 3.3 Nanoindentador TTX-NHT Instruments. Propiedad del Centro de Nano ciencias y Micro y Nanotecnologías del I.P.N.....	54
Figura 3.4 Máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura (Con registro de patente de invención con número MX/a/2015/006320).	55
Figura 3.5 Fotomicrografía de SEM de la morfología de las partículas abrasivas del óxido de aluminio.....	57
Figura 3.6. Equipo de Microscopia electrónica de barrido QUANTA 3D FEG, Propiedad del Centro de Nanociencias y Micro Nanotecnologías del I.P.N... 	58

Figura 3.7. Rugosímetro mecánico marca Veeco, modelo DEKTAK 150, equipo que pertenece al Centro de Nanociencias y Micro Nanotecnologías del I.P.N.	58
Figura A1. Válvula de flujo para la partícula abrasiva.....	90
Figura A2. Dispositivo para sujeción de probetas y para girar a ángulos de 30°, 60° y 90°.	91
Figura A3. Distancia entre la boquilla y la probeta.	91
Figura A4. Formato para el reporte del ensayo de erosión por partícula sólida.	93
Figura D1 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar a) adhesión de partículas y b) agrietamiento, formación de cráteres, remoción de material y picaduras (piting).	103
Figura D2 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 60°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 60°, donde se puede observar cráteres, arado y adhesión de partículas.....	103
Figura D3 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar adhesión de partículas y residuos de las mismas, arado, formación de cráteres y remoción de material.	104
Figura D4 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar a) remoción de capa borurada, picaduras, c) fractura y agrietamiento de la capa borurada, adhesión de partículas y picaduras.	105
Figura D5 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 60°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 60°, donde se puede observar arado, adhesión de partículas, picaduras, y agrietamiento de la capa borurada....	106
Figura D6 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente en un acero AISI 4140 borurado a	

un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar arado, residuos de partículas, cráteres y agrietamiento..... 106

Figura D7 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar adhesión de partículas, formación de cráteres y agrietamiento..... 107

Figura D8 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 60°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 60°, donde se puede observar adhesión de partículas, arado, formación de cráteres, remoción de material y agrietamiento..... 107

Figura D9 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar adhesión de partículas, arado, formación de cráteres y agrietamiento..... 108

Figura D10 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar remoción de capa borurada, adhesión de partículas y agrietamiento..... 108

Figura D11 a) 4.26 Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 60°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 60°, donde se puede observar adhesión de partículas, formación de cráteres y agrietamiento..... 109

Figura D12 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar arado, adhesión de partículas, agrietamientos y formación de cráteres..... 109

Lista de tablas

Tabla 1.1 Propiedades mecánicas de los boruros de hierro. (Matuschka, 1980; Campos, 2007, Campos <i>et al</i> 2010, Hernández-Sánchez <i>et al</i> 2013, Rodríguez-Castro <i>et al</i> 2013)	4
Tabla 1.2. Clasificación de los fenómenos de desgaste de acuerdo a su clasificación tribológica. (Hutchings <i>et al</i> 1992)	12
Tabla 1.3. Condiciones para realizar el ensayo de erosión por partículas sólidas con respecto a la norma ASTM G76.	14
Tabla 2.1 Clasificación de los requerimientos del cliente para una máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura.	20
Tabla 2.2 Ponderación de los requerimientos por criterio del cliente.	22
Tabla 2.3 Máquinas de erosión identificadas como potenciales competidores.	24
Tabla 2.4 Evaluación de la competencia en función de los requerimientos del cliente.	26
Tabla 2.5 Especificaciones de ingeniería generadas para cada requerimiento del cliente.	27
Tabla 2.6 Unidades de medición y direcciones de mejoramiento de las especificaciones de ingeniería.	28
Tabla 2.7 Evaluación detallada de la competencia y objetivos de ingeniería establecidos.	31
Tabla 2.8 Matriz morfológica de soluciones o conceptos	38
Tabla 2.9 Soluciones propuestas para el concepto global N° 1 para el sistema para calentar el aire y la cámara de erosión a 673 K.	42
Tabla 2.10 Soluciones propuestas para el concepto global N° 2 para el sistema para calentar el aire y la cámara de erosión a 673 K.	42
Tabla 2.11 Soluciones propuestas para el concepto global N° 1 para el sistema de rotar ángulos.	43
Tabla 2.12 Soluciones propuestas para el concepto global N° 2 para el sistema de rotar ángulos	44
Tabla 2.11 Especificaciones de los materiales para las paredes de la cámara de erosión.	47

Resumen.

En el presente trabajo de investigación, se construyó una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura, mediante la técnica de despliegue de funciones de calidad (QFD) y empleando la norma ASTM G76, obteniéndose una máquina funcional para estudiar el desgaste erosivo por partícula sólida en un acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado.

La caracterización mecánica de las capa de boruro de hierro fue evaluada por la técnica de indentación instrumentada Berkovich, la técnica de difracción de rayos X y la técnica de microscopía electrónica de barrido.

Basándose en los resultados obtenidos de indentación instrumentada Berkovich, se estimaron los esfuerzos residuales en la capa borurada tipo Fe_2B , mediante la ecuación de Lyakhovich.

Finalmente se realizaron los ensayos de erosión por partícula solida a temperatura ambiente ya la temperatura de 673 K sobre un acero AISI 4140 y ASISI 4140 borurado, sometidos a los ángulos de incidencia de 30° , 60° y 90° Pata determinar la tasa de erosión que se origina bajo estas condiciones, la pérdida de masa que se genera y los mecanismos de falla que se obtienen a estos ángulos de incidencia.

Abstract

In this study, high temperature and room temperature erosion tests are performed on AISI 4140 steels and AISI 4140 borided steels.. With the employment of scanning electron microscope, energy-dispersive X-ray spectroscopy, and Berkovich indentation testing techniques, detailed microscopic analysis of samples is conducted to reveal the underlying causes affecting the anti-erosion performance of these steels. The erosion tests were performed using a machine developed according to some parameters of the ASTM G76-95 standard. The samples have a rectangular shape with dimensions of 25 x 25 mm and 10 mm in thickness. The abrasive were used; Aluminum oxide (Al_2O_3) with a particle size 60 μm and angular granulometry, The tests were performed using three different incident angles 30°, 60° and 90° with an approximate particle speed of 30 ± 2 m/s and a flow rate of 40 ± 1 g/min. 3 minutes per sample was the exposure time of the test, to determine the amount of mass loss.

From the results for room temperature tests by solid particle erosion, made in AISI 4140 steel and subjected to an impact angle of 30° the highest rate of erosion Angles 90° and 60 is obtained in comparison°. This confirms that for ductile and subjected to erosion of small impact angles (30°) material, predominantly plastic deformation and erosion is high in the material surface. The mechanisms of post-test fails present erosion were cut and plow. Also in the AISI 4140 borided steel, and subjected to erosion testing under an impact angle of 90°, the highest rate of erosion as compared to the Angles of 30° and 60° was obtained. The material removal was raised by cracking and fracture predominantly characteristic of brittle failures at high angles of impact (90°). For high temperature erosion test and at different angles of impact, estimates of the erosion rate values are decreased (between 12 and 15 %) compared to the results obtained in the tests performed at room temperature (Consider both AISI 4140 steel and AISI 4140 borided). In both materials, surface failure mechanisms caused during erosion test were similar to those obtained at room temperature

Introducción.

El trabajo de investigación se realizó planteando y desarrollando los rubros principales que definen y sustentan la funcionalidad de la máquina de erosión por partícula sólida, estructurándolos en el siguiente orden:

Capítulo I. Estado del arte. En esta sección se presenta una recopilación bibliográfica de diversos investigadores que han estudiado el desgaste erosivo por partícula sólida.

Capítulo II. Diseño, construcción y validación de una máquina de erosión por partícula sólida. En esta sección se plantea y desarrolla la técnica de despliegue de funciones de calidad QFD (Quality Function Deployment) por sus siglas en inglés, esta técnica tiene por objetivo desarrollar las fases de requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería para obtener un diseño óptimo y funcional para realizar los ensayos de erosión por partícula sólida.

Capítulo III. Procedimiento Experimental. Se divide en cuatro secciones principales. La primera sección define el tratamiento termoquímico de borurización en caja de un acero AISI 4140. La segunda y tercera sección de este Capítulo describen las fases formadas durante el tratamiento termoquímico de borurización en el acero AISI 4140, las propiedades de las capas boruradas formadas, la caracterización fisicoquímica del acero AISI 4140 borurado y ensayos de indentación instrumentada, con la intención de verificar el incremento de la dureza en la superficie del acero endurecido por borurización en comparación con el núcleo del acero. La cuarta sección describe los ensayos de erosión por partícula sólida a baja y a la temperatura de 673 K, sobre probetas de acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado, a tres diferentes ángulos de impacto 30°, 60° y 90° para determinar la influencia del ángulo de impacto.

Capítulo IV. Resultados y Discusiones. En esta sección se discutirán los resultados obtenidos del Capítulo III, para determinar los tipos de mecanismos de desgaste que se originan al impactar la partícula erosiva sobre el material a diferentes ángulos de impacto así como su resistencia al desgaste erosivo.

Sección V. El trabajo incluye una sección de conclusiones y perspectivas de trabajo, en la que se presentaran los principales hallazgos y aportaciones principales del trabajo. Así mismo se indicaran las acciones específicas que podrán realizarse para incrementar la eficiencia o versatilidad del equipo.

ANTECEDENTES.

El desgaste puede ser definido como la pérdida de material de una o ambas superficies, que se encuentran en contacto y movimiento relativo, las cuales se encuentran sometidas a una carga. Se considera al fenómeno de erosión por partícula sólida como una forma de desgaste producida por esfuerzos de contacto relativamente bajos, debido al repetitivo impacto de partículas sólidas sobre una superficie compacta, lo que ocasiona la pérdida de material, ya sea metálico o cerámico.

En los últimos diez años, Campos *et al.*, (2010) han realizado diversos estudios en el área de tratamientos termoquímicos empleados en la industria nacional, e implementado diferentes metodologías experimentales en investigación aplicada para automatizar y optimizar los tratamientos de borurización y nitruración, bajo técnicas alternativas que van desde métodos tradicionales como métodos en polvos, hasta técnicas innovadoras realizadas por post-descarga de microondas. Particularmente, en la borurización, se propicia la formación de compuestos intermetálicos a través de la reacción química de un medio rico en boro y la subsecuente difusión de átomos de boro, generando capas duras, resistentes al desgaste, abrasión y corrosión. Para el caso de los AISI 4140 sometidos al tratamiento de borurización, se obtuvieron algunas propiedades mecánicas tales como dureza y tenacidad a la fractura por microindentación, utilizando la técnica de microdureza Vickers, en donde se establece que la dureza de las capas de boruros de hierro (ver figura I) se incrementa conforme se incrementan la temperatura y/o el tiempo de tratamiento.

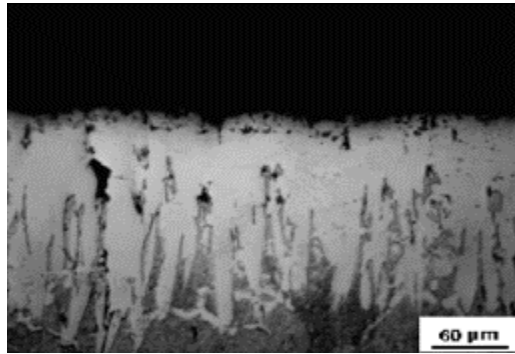


Figura I. Micrografía de un acero AISI 4140 endurecido por el proceso termoquímico de borurización en caja a una temperatura de 1273 K, con un tiempo de tratamiento de 8 h. (Campos *et al*, 2010)

La naturaleza de la superficie desempeña un papel crucial en la vida de servicio y rendimiento de los componentes de ingeniería utilizados en la corrosión y/o desgaste empleados en aplicaciones tecnológicas. Una de las soluciones para prevenir fallas superficiales causadas por la fricción y cargas de contacto es el endurecimiento superficial mediante procesos termoquímicos. (Lubas, 2009 citado por Huseyin *et al*, 2014)

En las últimas décadas los procesos termoquímicos tales como cementación, nitruración, carbo-nitruración, nitro-nitruración y borurización han sido reconocidos como atractivos métodos de endurecimiento superficial para aleaciones ferrosas. Entre estos procesos, la borurización tiene la ventaja de ser un proceso muy sencillo y económico, al lograr mejores propiedades de resistencia a la abrasión, corrosión y desgaste debido a la alta dureza obtenida en la superficie del material.

Hoy en día se tienen diversas investigaciones sobre la resistencia al desgaste en capas boruradas de aleaciones ferrosas a baja temperatura. Sin embargo, las investigaciones sobre el comportamiento tribológico a alta temperatura de las superficies boruradas son muy limitadas en literatura. En un estudio, realizado por Taktak, 2006 citado por Huseyin *et al*, 2014 sobre aceros 52100 y 440 C, se reporta que la capa borurada puede mantener su resistencia el desgaste, incluso a una temperatura de 873 K, comparado con aceros no borurados. Por otra parte Huseyin *et al*, 2014, realizaron un estudio sobre aceros borurados AISI 4140 con el propósito de examinar el desempeño tribológico a alta temperatura de las capas boruradas

en función de sus fases formadas. Como resultado de este estudio, se observó que la fase de diboruro de hierro tuvo una mejor resistencia al desgaste erosivo por partícula sólida a alta temperatura que la fase de boruro de hierro a alta temperatura (573 y 773 K), debido a que los esfuerzos residuales generados en las capas boruradas son un factor clave para determinar su resistencia al desgaste a altas temperaturas. Por ende, la baja resistencia al desgaste de la fase del boruro de hierro está asociada con la formación de altos esfuerzos residuales tensiles.

Los componentes de las turbinas de vapor, son las partes más importantes en las plantas de generación de energía eléctrica, estos componentes son dañados fuertemente por el impacto de partículas sólidas (ver Figura II). Para minimizar estos daños tratamientos superficiales como borurización, nitrurado, rociado por plasma, cromado y rociado por pistola se han implementado en estos componentes. (Urm *et al*, 2006)



Figura II. Componente dañado por el impacto de partículas sólidas. (Urm *et al*, 2006)

Urm *et al*, 2006 estudiaron el efecto de los tratamientos térmicos (borurado, nitrurado y HVOF) y los mecanismos de daño superficiales por el impacto de partículas sólidas en la superficie de aceros 12 % Cr y Nimonic 901 nitrurado usados en la fabricación de componentes para turbinas de vapor. Se determinó que en un

rango de temperaturas de 813 K a 894 K a una velocidad de impacto de 200 m/s y ángulos de impacto de 30° a 60°, la resistencia al desgaste erosivo a alta temperatura sobre aceros 12 % Cr endurecidos por difusión de boro y HVOF fue aproximadamente de 6-14 veces superior comparado a los aceros 12% Cr sin tratamiento térmico (ver Figura III). En el rango de temperaturas de 866 K a 894 K, la tasa de erosión de aceros 12 % Cr endurecidos por HVFO es mucho menor comparado con los endurecidos por difusión de boro en el rango de ángulo de impacto de 30° a 60°. La baja resistencia al impacto de partículas sólidas en los aceros 12 % Cr borurados es debido al reblandecimiento del metal base y debido a una capa de boruro delgada (65-70 μm) comparada con el HVOF (180 μm).

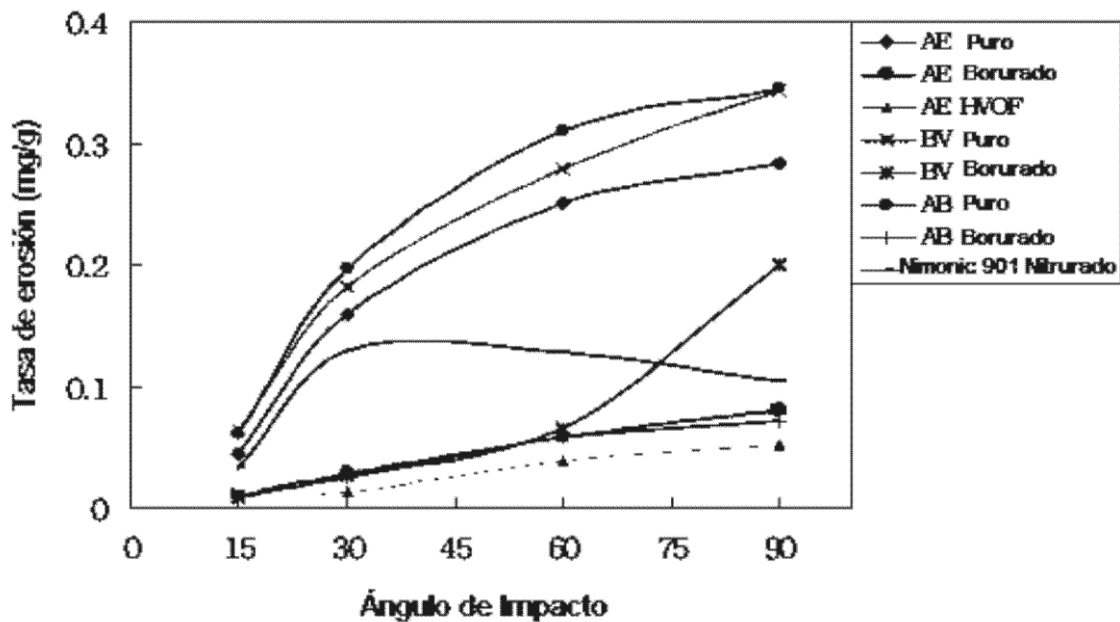


Figura III. Relación de la tasa de erosión en aceros 12% Cr y Nimonic 901, con diferentes tratamientos térmicos a una temperatura de 866 K, en función del ángulo de impacto. (Urm et al, 2006)

Con el fin de hacer frente a los graves daños ocasionados por la erosión de partículas sólidas en aceros 12% Cr utilizado para boquillas de turbinas de vapor Miyazaki and Ikeda, (2002), realizaron pruebas de erosión por partícula sólida a alta temperatura, utilizando partículas de óxido de hierro a altas velocidades de impacto. En este estudio se comparan diversos tratamientos térmicos sobre aceros 12% Cr,

observándose que el tratamiento térmico de borurización presenta una mayor resistencia al fenómeno de erosión por partícula sólida a alta temperatura en comparación a los tratamientos térmicos de nitrurado, cromado, rociado por plasma, rociado por pistola y recubrimiento de Cr_2O_3 y sin tratamiento térmico (ver Figura IV).

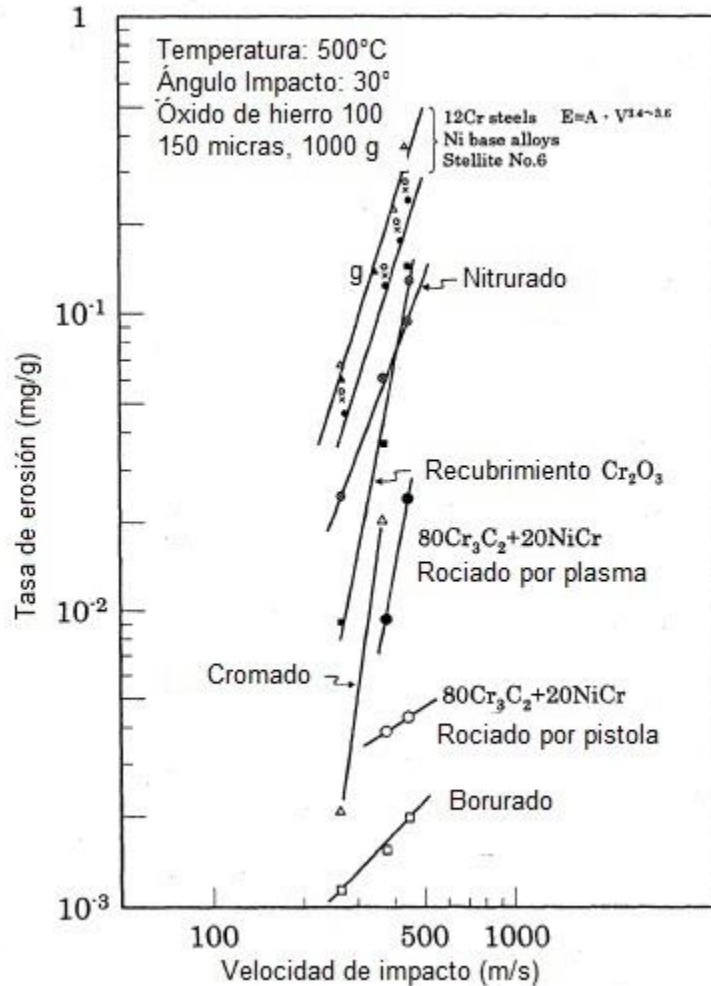


Figura IV. Relación entre la tasa de erosión y la velocidad de impacto por partícula sólida sobre aceros 12% Cr bajo diversos tratamientos térmicos. (Miyazaki and Ikeda, 2002)

JUSTIFICACIÓN

Pese a la importancia del desgaste erosivo por partícula sólida a alta temperatura, hay mínima información en literatura sobre este tipo de desgaste en capas boruradas, la mayoría de los autores presentan la evaluación de este tipo de desgaste de erosión por partículas sólidas a baja temperatura. Por tal motivo se construirá una máquina de erosión por partícula sólida a baja y alta temperatura, con el fin de aportar información de las variables que se involucran en el fenómeno de erosión por partícula sólida a baja y alta temperatura.

El presente trabajo de investigación describe el diseño, ensamble, construcción y validación de una máquina tribológica estandarizada de la resistencia al desgaste erosivo. La máquina se diseñó cumpliendo con los requerimientos y especificaciones establecidos en la norma ASTM G76 relacionados a la evaluación de la resistencia al desgaste erosivo por partícula sólida.

La relevancia de la máquina para ensayos de desgaste de erosión por partícula sólida, conjuntamente al diseño, construcción, validación, operación y mantenimiento, radica en realizar pruebas de erosión por partícula sólida en materiales con tratamiento térmico (borurización) y sin tratamiento térmico a baja temperatura y a alta temperatura, con ángulos de impacto de 30°, 60° y 90° para evaluar la resistencia al desgaste erosivo y determinar cuáles son las variables que influyen en este tipo de desgaste.

La máquina para pruebas de erosión por partícula sólida a baja y alta temperatura del presente estudio, forma parte de un proyecto integral diseñado por el Grupo de Ingeniería de Superficies del Instituto Politécnico Nacional, en el que se pretende desarrollar una metodología para la caracterización y clasificación mecánico-metalúrgica de las capas superficiales obtenidas mediante tratamiento térmico de borurización en caja sometidas al ensayo de erosión por partícula sólida. Considerando que diversos estudios sugieren que el incremento de la dureza mejora sensiblemente la resistencia al desgaste.

OBJETIVOS

Objetivo general: Estudiar el desgaste generado por el fenómeno de erosión por partícula sólida en un acero AISI 4140 borurado y sin tratamiento para evaluar su tasa de erosión a tres diferentes ángulos de impacto considerando temperatura ambiente y alta temperatura.

Objetivos particulares:

1. Diseñar y construir una máquina de erosión por partícula sólida mediante el método de despliegue de la función de la calidad (QFD) para obtener una máquina de fácil operación.
2. Validar una máquina de erosión mediante la norma ASTM G76 para simular el desgaste erosivo por partícula sólida en condiciones de temperatura ambiente (293 K) y alta temperatura (673 K) bajo condiciones estandarizadas.
3. Endurecer probetas de acero AISI 4140 mediante el tratamiento termoquímico de borurización en caja a una temperatura de 1223 K con un tiempo de exposición de 6h para formar capas tipo Fe_2B con un espesor de $155 \pm 9 \mu m$.
4. Evaluar el comportamiento de las probetas de acero AISI 4140 boruradas y sin tratamiento termoquímico sometidas al desgaste erosivo por partícula sólida a una temperatura de 293 K con ángulos de impacto de 30° , 60° y 90° para determinar los modos y mecanismos de desgaste que se generan en la superficie del material.
5. Evaluar el comportamiento de las probetas de acero AISI 4140 boruradas y sin tratamiento termoquímico sometidas al desgaste erosivo por partícula sólida a 673 K con ángulos de impacto de 30° , 60° y 90° para determinar los modos y mecanismos de desgaste que se generan en la superficie del material.

VI. METODOLOGÍA.

La metodología del trabajo de investigación consistió en ocho etapas:

- a) Medición de los espesores de capa del boruro Fe_2B sobre la superficie del acero AISI 4140 borurado a una temperatura de tratamiento de 1223 K con un tiempo de exposición de 6 h que se analizó por microscopia óptica, utilizando un equipo de la marca Olympus modelo GX51. Se realizaron un total de 100 mediciones del espesor de capa Fe_2B utilizando el software Image Pro-Plus V 6.0 en diferentes secciones del acero AISI 4140 endurecido, para garantizar la confiabilidad de las mediciones experimentales.
- b) Para la determinación de los gradientes de dureza, se utilizó la técnica de nanoindentación instrumentada a lo largo de la capa del boruro Fe_2B formada sobre un acero AISI 4140 borurado a una carga constante de 100 mN. Se utilizaron muestras con una temperatura de 1223 K con 6 h de tratamiento, empleando un equipo de Marca CSM instruments, Modelo TTX-NHT; mientras que el nanoindentador empleado fue una punta piramidal de diamante tipo Berkovich
- c) Se elaboraron mediciones de rugosidad a lo largo de la superficie de las probetas de acero AISI 4140 borurado en diferentes secciones de la misma para garantizar la confiabilidad de las mediciones experimentales, empleando un Rugosímetro Mitutoyo SJ-210. La estimación de la rugosidad superficial permite establecer si las muestras endurecidas y sin tratamiento térmico, se encuentran dentro del rango de la norma ASTM G76 (1995), para la aplicación de la prueba de erosión por partícula sólida.
- d) Se pesaron probetas de acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado, antes de los ensayos de erosión por partícula sólida, empleando una balanza digital ACCULAB-AL modelo 104 para tener un pesaje inicial antes de los ensayos de erosión por partícula sólida.

- e) Realización de los ensayos de erosión por partícula sólida a una temperatura de 273 K con una velocidad de 30 m/s, flujo del abrasivo de 40 gr/min y un tamaño de partícula de 60 micras utilizando como abrasivo óxido de aluminio a tres diferentes ángulos de impacto 30°, 60° y 90°, para observar cómo influye el ángulo de impacto en la resistencia del desgaste erosivo por partícula sólida en la superficie del acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado.
- f) Realización de los ensayos de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K con una velocidad de 30 m/s, flujo del abrasivo de 40 gr/min y un tamaño de partícula de 60 micras utilizando como abrasivo óxido de aluminio a tres diferentes ángulos de impacto 30°, 60° y 90°, para observar cómo influye el ángulo de impacto en la resistencia del desgaste erosivo por partícula sólida en la superficie del acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado.
- g) Se pesaron las probetas de acero AISI 4140 borurado y sin tratamiento térmico, después de los ensayos de erosión por partícula sólida considerando tiempos de exposición total de 3 y 10 minutos, empleando una balanza digital ACCULAB-AL modelo 104, para determinar la pérdida de masa de la superficie del material.
- h) Aplicación de la técnica de perfilometría a lo largo de la huella de erosión generada por el impacto de partículas sólidas a baja y alta temperatura sobre la superficie del acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado, empleando un equipo modelo Dektak 150 de marca Bruker, con el propósito de medir la profundidad de la huella generada por el desgaste erosivo por partícula sólida a tres diferentes ángulos de impacto 30°, 60° y 90°.
- i) Para la determinación de los mecanismos de desgaste generados, se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido a lo largo de la superficie del acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado a 3 diferentes ángulos de impacto. Para esta investigación, se utilizaron muestras con una temperatura de 1223 K con 6 h de tratamiento, empleando un equipo de Marca QUANTA, Modelo 3DFEG.

CAPÍTULO I

Estado del arte

El presente Capítulo describe el tratamiento termoquímico de borurización, los parámetros que se involucran en el mismo, las características de las fases que se obtienen en este proceso, las principales aplicaciones de un acero AISI 4140 sometido al tratamiento termoquímico de borurización en polvo así como las principales propiedades mecánicas de este acero endurecido y por último, se menciona el ensayo de erosión por partícula, los parámetros que se involucran en este ensayo y los diferentes mecanismos de falla que se presentan en el desgaste erosivo por partícula sólida.

1.1 Borurización en aceros.

La borurización es un tratamiento termoquímico alternativo a procesos de difusión como el nitrurado, carburizado, carbonitrurado y boronitrurado para la obtención de superficies extremadamente duras, resistentes al desgaste, a la abrasión y a la corrosión en medios ácidos o alcalinos sobre materiales ferrosos y no ferrosos. Debido a que se trata de un proceso difusivo, las variables que se pueden controlar son: temperatura, tiempos de exposición y potencial del boro el cual está relacionado con el área de contacto efectiva sobre la superficie de la muestra. El proceso implica el calentamiento del material en un rango de 973 K a 1273 K, durante 1 a 12 horas en contacto con un medio de borurización adecuado: sólido (polvo o pasta), líquido (baño en sales), gaseoso, por plasma, por lecho fluidizado y además de la borurización multicomponencial.

1.2 Borurización en polvo en aceros grado maquinaria.

El método consiste en empaquetar las probetas a borurizar con una mezcla de polvo rica en boro, dentro un contenedor de acero preferentemente inoxidable, sellado, previamente saturado, para evitar la difusión de boro hacia las paredes del contenedor durante el tratamiento. Este método ofrece varias ventajas, es fácil de llevar a cabo y de relativa seguridad, además el método no requiere de la presencia

de una atmosfera inerte (Matuschka, 1980). Comercialmente es posible encontrar polvos de carburo de boro con las siguientes composiciones:

- 5%B₄C, 90% SiC, 5% KBF₄
- 50%B₄C, 45% SiC, 5% KBF₄
- 85%B₄C, 15% SiC, 15% Na₂B₄O₇
- 95%B₄C, 5% Na₂B₄O₇
- 84%B₄C, 16% Na₂B₄O₇

Donde el carburo de silicio actúa como diluyente el cual controla el flujo de boro activo; los otros compuestos actúan como activadores (substancias que inducen la reacción del boro en el substrato ferroso para la formación de una capa borurada). (Jain and Sundararajan, 2002). El espesor de la capa formada depende de cuatro factores importantes: tiempo de tratamiento, temperatura, composición del substrato y el potencial del boro del compuesto (porcentaje en peso de boro atómico presente).

1.3 Capas boruradas formadas en aceros.

La estructura de los boruros está determinada por el tamaño relativo de los átomos de boro y los átomos del material sobre el cual difunde, además de su fuerte tendencia a combinarse entre ellos. El boro es altamente soluble en metales con un volumen atómico pequeño, tales como hierro puro y sus aleaciones.

Dependiendo de las características del substrato y del potencial de boro que se empleó durante el tratamiento, pueden generarse capas de una fase (Fe₂B) o de dos fases (FeB y Fe₂B) sobre la superficie, que corresponden a capas duras y de una morfología aserrada. De acuerdo a Matushka (1980), la composición de los boruros de hierro formados en la superficie del substrato se obtienen del diagrama de fases Fe-B de la Figura 1. La fase FeB y Fe₂B tienen un porcentaje en peso de boro aproximado de 16.23% y 8,83%, respectivamente (ver Figura 1.2). La fase Fe₂B, tiene una estructura cristalina tetragonal y se forma bajo la generación de esfuerzos de compresión. La fase FeB tiene una estructura cristalina ortorrómbica

formándose bajo la generación de esfuerzos de tensión, además de que es un intermetálico más frágil que el boruro Fe_2B . La capa de boruros de hierro formada en el substrato ferroso puede ser de una fase o de dos fases, generalmente cuando se forma una capa de una sola fase, la fase formada es Fe_2B . Cuando se forma una capa de dos fases se forma una capa polifásica tipo $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$. En la Tabla 1.1 se presentan algunas propiedades mecánicas y químicas de los boruros de hierro (Matuschka, 1980; Campos, 2007).

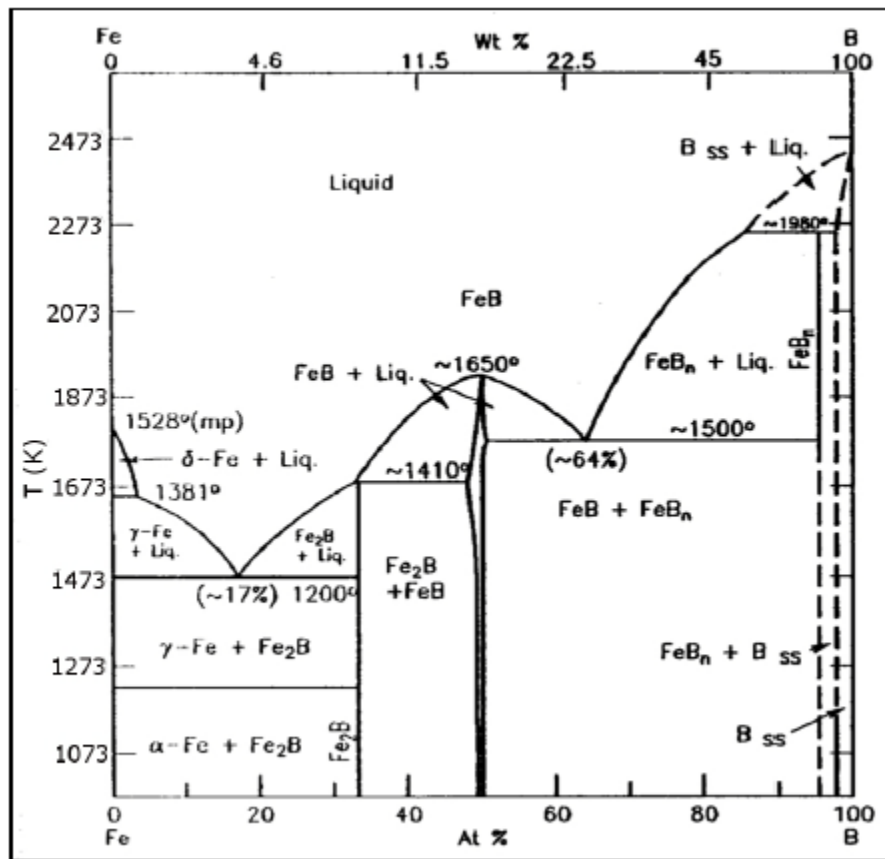


Figura 1.1 Diagrama de fases Fe-B (Matushka 1980)

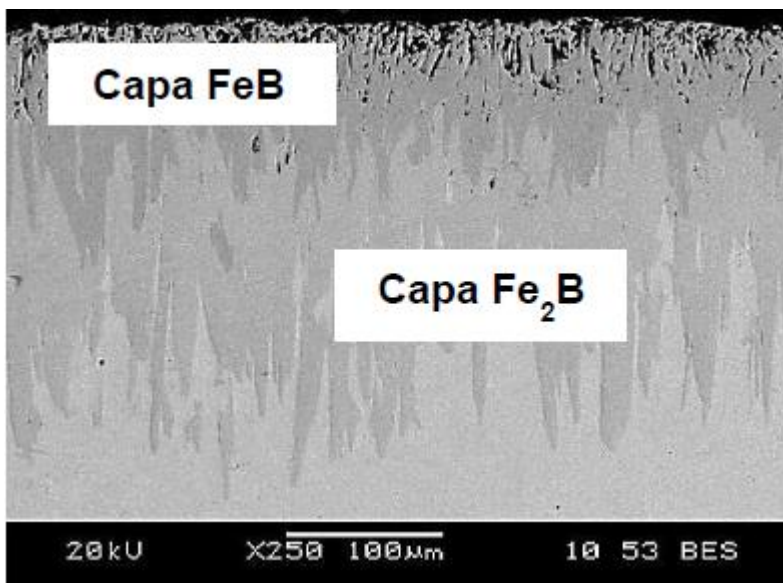


Figura 1.2 Fotomicrografía obtenida mediante MEB de un acero AISI 1018 endurecido por difusión de boro en donde se observa la formación de una bicapa de fases FeB y Fe₂B.

Tabla 1.1 Propiedades mecánicas de los boruros de hierro. (Matuschka, 1980; Campos, 2007, Campos *et al* 2010, Hernández-Sánchez *et al* 2013, Rodríguez-Castro *et al* 2013).

Propiedades	FeB	Fe ₂ B
Densidad (g/cm ³)	6.75	7.43
Coefficiente de expansión térmica (x10 ⁶ /K)	23 en un rango de 200 a 873K	7.65-9.2 en un rango de 646 y 1346 K
Dureza (HV)	1900-2200	1800-2000
Módulo de elasticidad(GPa)	590	285 a 295
Esfuerzos residuales(MPa)	Tensiles con magnitudes de 428-1604	De compresión con magnitudes de -600 a -2000
Tenacidad a la fractura (MPa m ^{1/2})	1.48-3.2	2.01-4.65

1.4 Aplicaciones del acero AISI 4140 borurado.

El borurado es un método que mejora considerablemente las propiedades mecánicas, físicas y químicas de la superficie de materiales, (Matuschka, 1980), y la resistencia al desgaste es una de ellas.

El acero AISI 4140 es un material de bajo costo con una amplia gama de aplicaciones industriales tales como en la fabricación de flechas, engranes, válvulas, pernos, coples, ejes, pernos de alta temperatura, rodillos, cuerpos de herramientas de corte, árbol de levas, ejes de tráiler, eslabones de cadena, resortes, cigüeñales, espárragos, flechas de mecanismo hidráulicos, etc. Una vez sometido al proceso de termoquímico de borurización se obtiene un material con elevada dureza superficial (1800 HV) y un substrato tenaz. Las aplicaciones industriales para un acero AISI 4140 borurado, son en pistones, alabes de turbinas de vapor, tornillos y barriles de extrusión, válvulas antiretorno y herramientas de matrices de prensa.

En aplicaciones industriales la presencia de una sola fase Fe_2B es deseable en comparación con una polifásica tipo FeB/Fe_2B debido a la formación de grietas en la interfase de crecimiento provocado por la diferencia en los coeficientes de dilatación térmica de ambas fases, que generan esfuerzos residuales de compresión y tensión durante el crecimiento de los boruros. Estos esfuerzos afectan las propiedades de las capas FeB y Fe_2B como la adherencia sobre el substrato, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión. La vida de servicio de las capas FeB y Fe_2B depende de la distribución de los esfuerzos residuales generados.

1.5 Generalidades del desgaste erosivo por partícula sólida.

El desgaste puede ser definido como el contacto de dos cuerpos que se encuentran en contacto y movimiento relativo. Este fenómeno se presenta en las superficies de los materiales. Dando como resultado que el desgaste, es la pérdida de material, y la disminución de las dimensiones.

Los mecanismos de daño en los materiales se ocasionan principalmente a la deformación plástica, formación y propagación de grietas, corrosión y/o desgaste.

Desde hace unas décadas el desgaste comenzó a ser un tema importante ya que se necesita ser estudiado y comprendido, por lo que empezó a aparecer en los libros de diseño y en la mente de los diseñadores, ideas sencillas de cómo prevenirlo o combatirlo, entre esas ideas se tienen:

1. Mantener baja la presión de contacto
2. Mantener baja la velocidad de deslizamiento
3. Mantener lisas las superficies de rodamientos
4. Usar materiales duros
5. Asegurar bajos coeficientes de fricción
6. Usar lubricantes

La erosión es un fenómeno por medio del cual, el material es removido de una superficie durante el impacto de partículas duras. Las partículas impactan la superficie del material a diversas velocidades y ángulos de incidencia, donde el desgaste se da a través de diferentes mecanismos de desgaste. En la Figura 1.3 se muestran esquemas de como partículas erosivas actúan en una superficie en dependencia del ángulo de impacto. Para el fenómeno de erosión en ángulos de 90° , la energía de la partícula es consumida durante la deformación de la superficie y para ángulos menores, esa energía es utilizada para deformar y cortar el material de la superficie.

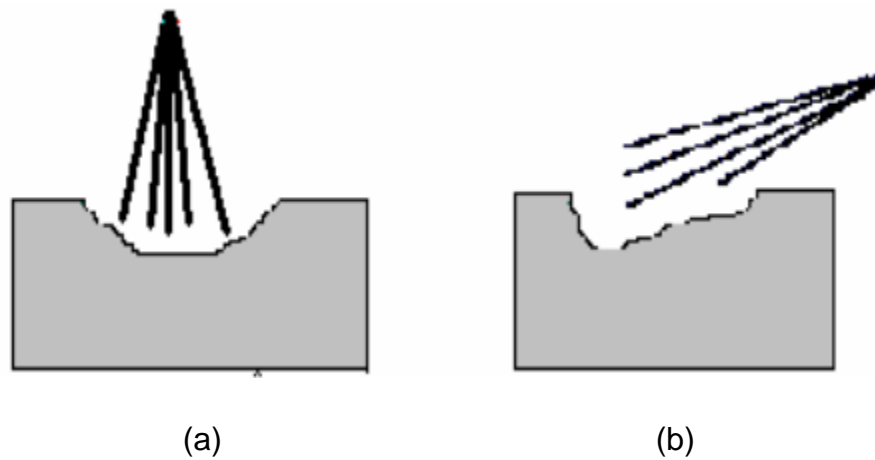


Figura 1.3. Erosión de una superficie conforme al Angulo de impacto (a) normal 90° y (b) ángulo diferente de 90° .

1.6 Ensayos de erosión por partícula sólida.

El fenómeno conocido como desgaste erosivo por partícula sólida ocurre cuando partículas sólidas impactan una superficie, es en general una de varias formas de degradación del material clasificado como desgaste. Difiere del concepto de abrasión, en donde existen dos formas básicas de abrasión. Abrasión por desgaste de dos cuerpos Figura 1.4 (a) y abrasión por desgaste de tres cuerpos Figura 4 (b), que también involucra partículas sueltas. El primero de ellos ocurre cuando las protuberancias duras sobre una superficie son deslizadas contra otra. Un ejemplo de esto es el pulido de muestras mediante el uso de lijas. Mientras que en la abrasión por desgaste de tres cuerpos las partículas se presionan contra la superficie y se mueven a lo largo de ella, generalmente porque están atrapadas entre dos superficies de deslizamiento, el caso de aceites lubricantes contaminados, en un sistema de deslizamiento, puede ser un claro ejemplo de este tipo de abrasión.

Los rangos de desgaste en la abrasión de tres cuerpos, son generalmente más bajos, que en el sistema de abrasión de dos cuerpos. En el fenómeno de erosión, varias fuerzas de orígenes diferentes pueden actuar sobre una partícula en contacto

con una superficie sólida. En la Figura 1.5 se muestra el fenómeno de erosión por partícula sólida.



Figura 1.4. Tipos de abrasión: (a) abrasión de dos cuerpos y (b) abrasión de tres cuerpos (Fini *et al*, 1992).

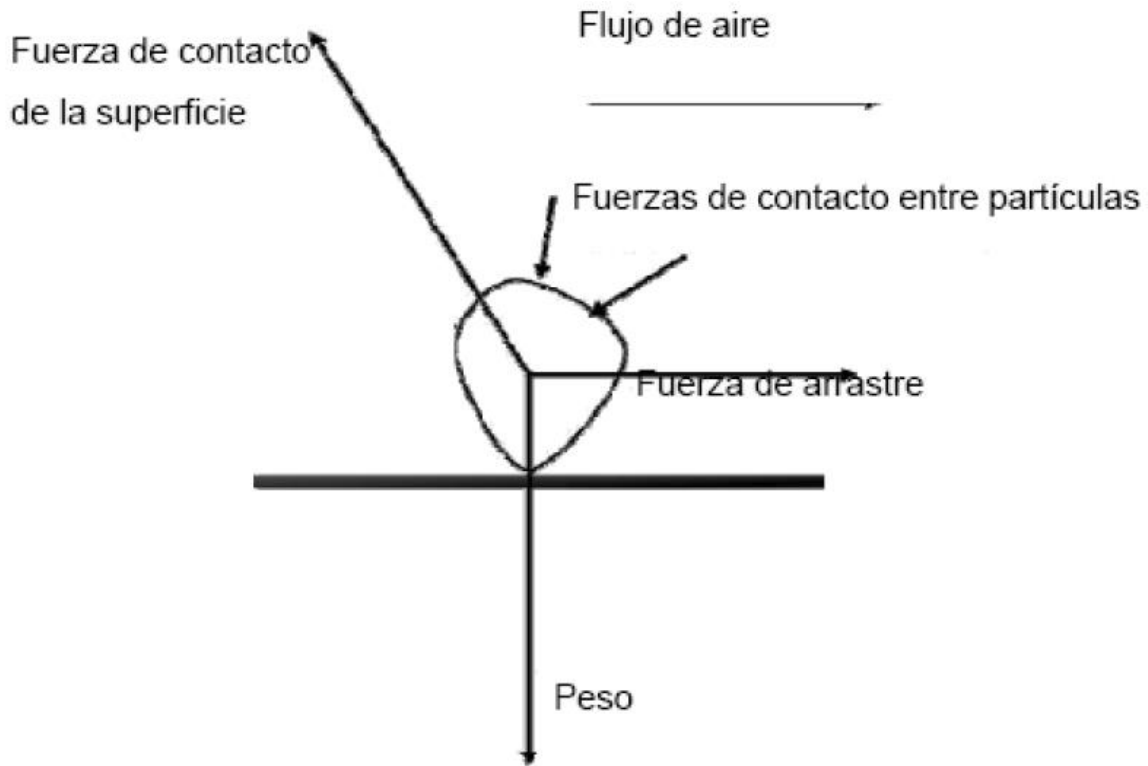


Figura 1.5. Fenómeno de erosión por partícula sólida (Hutchings, 1992).

Las partículas que ocasionan el fenómeno de desgaste erosivo pueden presentarse en ambientes secos o húmedos pudiendo actuar en forma muy variada tal como lo muestra la Figura 1.6. Cuando el medio de trabajo es húmedo (por ejemplo, un medio con agua y partículas de arena), la erosión y la corrosión son fenómenos que actúan en forma sinérgica, provocando la degradación acelerada de los materiales. (Zhum Ghar, 1987)

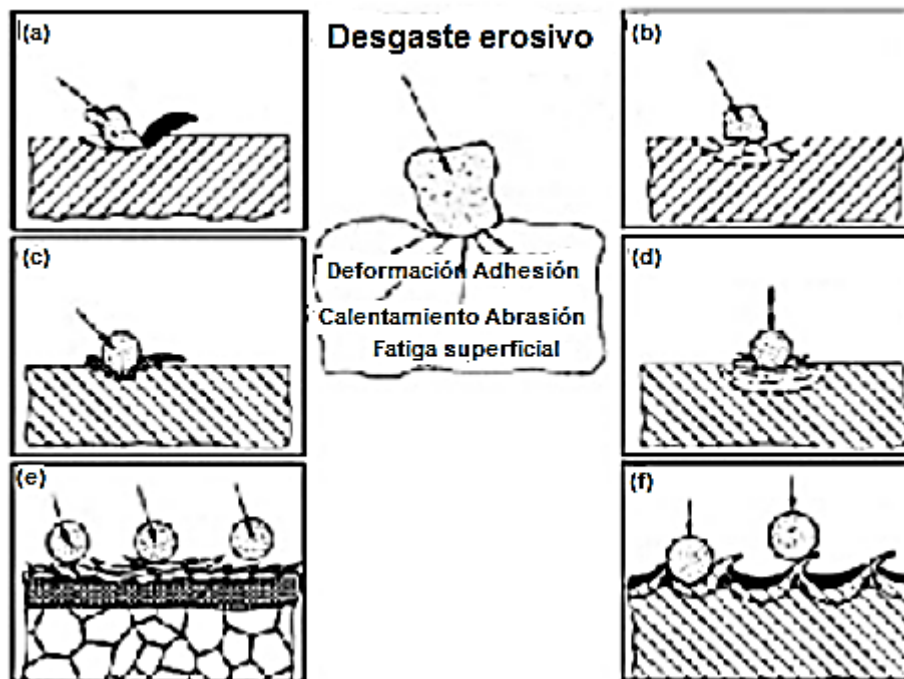


Figura 1.6. Diferentes formas en que actúan las partículas sólidas impactadas contra un material, en la formación de: (a) microcorte y micro-arado, (b) Agrietado superficial, (c) Desplazamiento del material al borde de los cráteres de impacto, (d) Grietas por fatiga superficial y sub-superficiales causadas por los múltiples impactos, (e) Formación de pequeñas hojuelas debido a la extrusión y forjado de los impactos y (f) formación de pequeñas hojuelas por procesos de extrusión inversos. (Zuhm Ghar, 1987).

En el desgaste de erosión por partículas sólidas se observan dos tipos de comportamiento: Dúctil y frágil. En el primero, el material es removido por un efecto de corte y arado, mientras que en el segundo, es desplazado por la formación de grietas o fracturas. Ambos tienen una marcada dependencia con el ángulo de incidencia. Si la deformación plástica domina, entonces la erosión máxima sucede a un ángulo pequeño (erosión dúctil), por el contrario, si la erosión máxima sucede a un ángulo alto, se considera que es ocasionado por fractura frágil. Esta tendencia se observa con frecuencia en los gráficos utilizados en los estudios de erosión para clasificar los materiales, como se muestra en la Figura 1.7. (Hutchings, 1992)

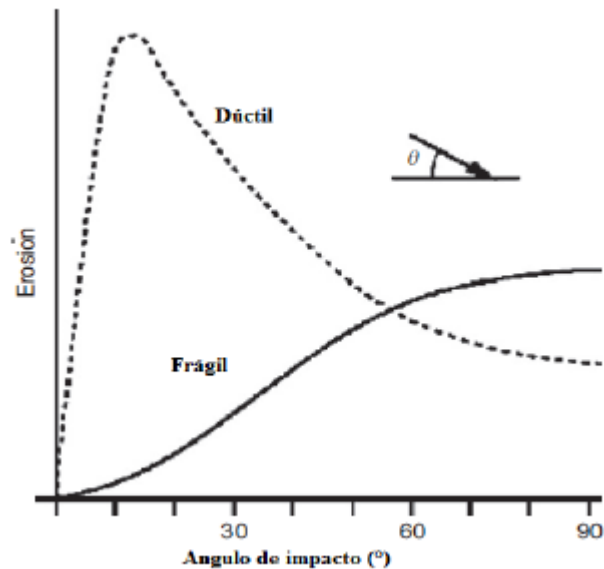


Figura 1.7. Dependencia típica del desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto de la partícula incidente. (Hutchings, 1992)

1.7 Mecanismos de desgaste de acuerdo a la acción tribológica.

En un óptimo diseño tribológico, la pérdida de masa de un material es un proceso muy lento, pero es estable y continuo. Clasificar los tipos de desgaste que se pueden presentar en un material es difícil. La razón es que el desgaste o la resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca del material, como lo es el esfuerzo o la dureza, sino que está en función del sistema en el que se encuentra, esto último fue propuesto por Czichos, 1986 donde el término “sistema” cubre los materiales de los que son manufacturados diferentes componentes. Como un intento de estandarizar, el trabajo elaborado por Czichos, 1986 ha sido usado para establecer bases para la especificación de la norma alemana DIN 50 320. Esta norma define cuatro mecanismos de desgaste básicos: adhesión, abrasión, fatiga y acciones triboquímicas, otros mecanismos como picadura, fretting, erosión, cavitación, etc. son mostrados por los cuatro mecanismos mencionados anteriormente. En la Tabla 1.2, se puede observar que la norma DIN 50 320 muestra los fenómenos de desgaste de acuerdo a la acción tribológica. (Hutchings *et al* 1992).

Tabla 1.2. Clasificación de los fenómenos de desgaste de acuerdo a su clasificación tribológica. (Hutchings *et al* 1992)

Estructura del sistema	Tipo de desgaste	Mecanismos eficaces(individualmente o combinados)			
		Adhesión	Abrasión	Fatiga de superficie	Reacciones tribo-químicas
Sólido interfase media(completa separación de película por un fluido) -Solido	-----			X	X
Sólido -Solido (con fricción, lubricación, frontera, lubricación mixta)	Desgaste por deslizamiento	X	X	X	X
	Desgaste por rodamiento	X	X	X	X
	Desgaste por impacto	X	X	X	X
	Desgaste por rozamiento	X	X	X	X
Sólido -Sólido y Partículas	Abrasión de deslizamiento		X		
	Abrasión de deslizamiento (Abrasión de tres cuerpos)		X		
	Abrasión por rodamiento (Abrasión de tres cuerpos)		X		
Sólido -Fluido con partículas	Desgaste erosivo		X	X	X
Sólido -Fluidos	Material, cavitación, erosión			X	X
	Erosión por goteo			X	X

1.8 Especificaciones del ensayo de erosión por partícula sólida conforme a la norma ASTM G76.

Para realizar los ensayos de erosión por partícula sólida se utiliza la norma ASTM G76. Esta norma cubre la pérdida de material por la erosión del impacto de partículas que impactan en la superficie de un material. Este ensayo puede ser usado en el laboratorio para medir la erosión de partículas sólidas de diferentes materiales y se ha utilizado como una prueba de detección para clasificación de la tasa de erosión de partículas sólidas de materiales simulando entornos de servicios. Los servicios de erosión real implican tamaños de partícula, velocidades, ángulos de ataque, entornos, etc.

1.8.1 Condiciones para realizar el ensayo de erosión por partícula sólida.

Para realizar el ensayo se establece y se mide la velocidad de las partículas abrasivas y el flujo de las mismas. Se prepara la superficie de la probeta para lograr una uniformidad y para tener una rugosidad en la superficie de $1\mu\text{m}$.

Después se monta la probeta con el ángulo que se requiera en la máquina de erosión. Se somete la probeta al choque de partículas abrasivas en un intervalo de tiempo seleccionado, se retira la probeta y se limpia cuidadosamente para calcular la pérdida de masa de la probeta. Se repite este proceso para determinar al menos cuatro puntos en un tiempo total de al menos 10 min y se grafican los valores de la pérdida de masa en función del tiempo transcurrido. La tasa de erosión se obtiene de la pendiente de la pérdida de masa en función del tiempo transcurrido.

En este método de ensayo se pueden utilizar una gama de tamaños de probetas y configuraciones. Una configuración óptima es una tira rectangular de aproximadamente de 10 por 30 por 2 mm de espesor. Probetas más grandes y otras formas pueden ser utilizadas, solo que se tienen que documentar en el ensayo.

El material abrasivo que se utiliza debe ser uniforme en características esenciales tales como tamaño de partícula, humedad, pureza, composición química, etc. Las partículas abrasivas que se emplean para este tipo de ensayo pueden ser de óxido de aluminio (Al_2O_3), carburo de silicio, carburo de boro, alúmina, sílica, entre otros.

Cabe mencionar que estas partículas deberán tener un tamaño promedio de 50 micras. En la Tabla 1.3 se establecen las condiciones para el ensayo de erosión por partículas sólida.

Tabla 1.3. Condiciones para realizar el ensayo de erosión por partículas sólidas con respecto a la norma ASTM G76.

Parámetros	Características	Observaciones
Boquilla	Dimensiones de 1.5 mm \pm 0.075 mm de diámetro interior y al menos 50 mm de longitud.	Si se utiliza una boquilla de diferentes dimensiones se tiene que documentar en el ensayo.
Velocidad de la partícula abrasiva	Debe de ser de 30 \pm 2 m/s, a esta velocidad el flujo de gas deberá de ser aproximadamente de 8 L/min y la presión del sistema estará en un rango de 140 kPa (20 psi)	La presión dependerá del diseño específico del sistema.
Flujo del abrasivo	Será de 2 \pm 0.05 gr/min, este corresponde a un flujo de partículas abrasivas sobre la superficie de la probeta.	Si se utiliza un flujo diferente se deberá documentar en el ensayo
Distancia de la boquilla con respecto a la probeta	Deberá de ser de 10 \pm 1 mm	-----
Tiempo del ensayo	El tiempo del ensayo será de 10 minutos para alcanzar las condiciones establecidas.	Tiempos más largos son permisibles siempre y cuando el cráter final de erosión sea más profundo que 1 mm.

1.9 Mecanismos de desgaste erosivo.

Cuando un material dúctil es impactado, se forman cráteres en la superficie del material, alrededor de los cuales aparece una pequeña proa constituida del material removido. Después de múltiples impactos, el material es arrancado en forma de debris (partículas de desgaste). La forma y tamaño de los cráteres formados dependen (entre otras variables) de la velocidad de impacto, tamaño y ángulo de impacto de las partículas. En la Figura 1.8 (a) es presentado el mecanismo de formación de proa en materiales dúctiles.

Para materiales frágiles como el vidrio, cerámicos o metales muy duros, el mecanismo de remoción es distinto. En estos materiales los impactos repetitivos por el impacto de las partículas sólidas causan micro-grietas superficiales, las cuales crecen hasta que se unen, provocando el arranque del material en forma de lascas. Este mecanismo es representado en la Figura 1.8 (b). Es interesante notar que un material (aunque sea dúctil), después de estar sometido a múltiples impactos, puede sufrir cambios estructurales que lo llevan a comportarse como un material frágil.

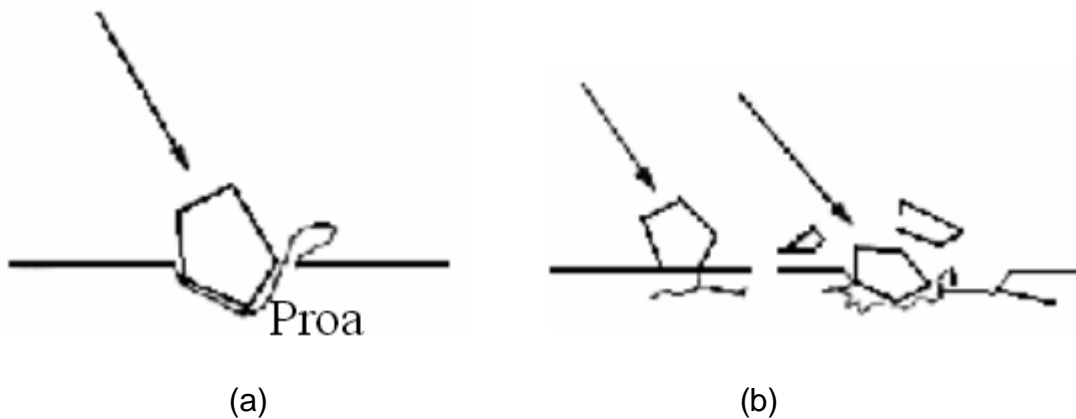


Figura 1.8. Mecanismos de remoción de material que actúan durante el desgaste erosivo cuando una partícula sólida colisiona una superficie plana, para: (a) materiales dúctiles y (b) materiales frágiles. (Meng and Ludema, 1995)

Por ende, son varios los mecanismos de pérdida de masa que están presentes durante un ensayo de erosión por partícula sólida. Mecanismos que dependen entonces del tipo del material ensayado (dúctil o frágil), del ángulo de impacto de las partículas y otras variables. Las regiones fracturadas a partir de estos mecanismos de desgaste, presentan una apariencia muy diferente al ser observadas en el microscopio, siendo que las fallas no necesariamente están unidas a las características de ductilidad y fragilidad macroscópicas del material. Una falla dúctil corresponde a situaciones en que ocurre deformación plástica, la cual puede ser relacionada con el tamaño y morfología de las partículas sólidas (marcas de desprendimiento de material, arañones, surcos, etc.). La deformación por fractura frágil, se debe el surgimiento de grietas y desprendimiento de lascas del material. Estas grietas en materiales dúctiles pueden aparecer después de un proceso de endurecimiento superficial en la superficie. (Meng and Ludema, 1995)

Un bajo ángulo de impacto favorece a un proceso de desgaste parecido a la abrasión, como se ilustra en la Figura 1.9 (a), porque la partícula tiende a dejar una huella más extendida de impacto a través de la superficie. Si el ángulo es alto y la velocidad es pequeña, los esfuerzos al momento del impacto son insuficientes para que ocurra una deformación plástica y el desgaste se origina como fatiga superficial, donde se muestra en la Figura 1.9 (b). Cuando la velocidad se incrementa y llega a tener niveles medios con un ángulo alto, se hace posible ya sea una deformación plástica o un mecanismo de erosión por fractura frágil, la cual se muestra en la Figura 9 (c). En cambio cuando la velocidad es muy grande, puede llegar a ocurrir una fusión por derretimiento entre la superficie impactada y la partícula incidente, esto se presenta en la Figura 9 (d). Cuando ocurre el impacto de un cuerpo muy grande se presenta un flujo superplástico y una fusión entre los materiales interactuantes, como se ilustra en la Figura 9 (e) (Gwidon, 2005).

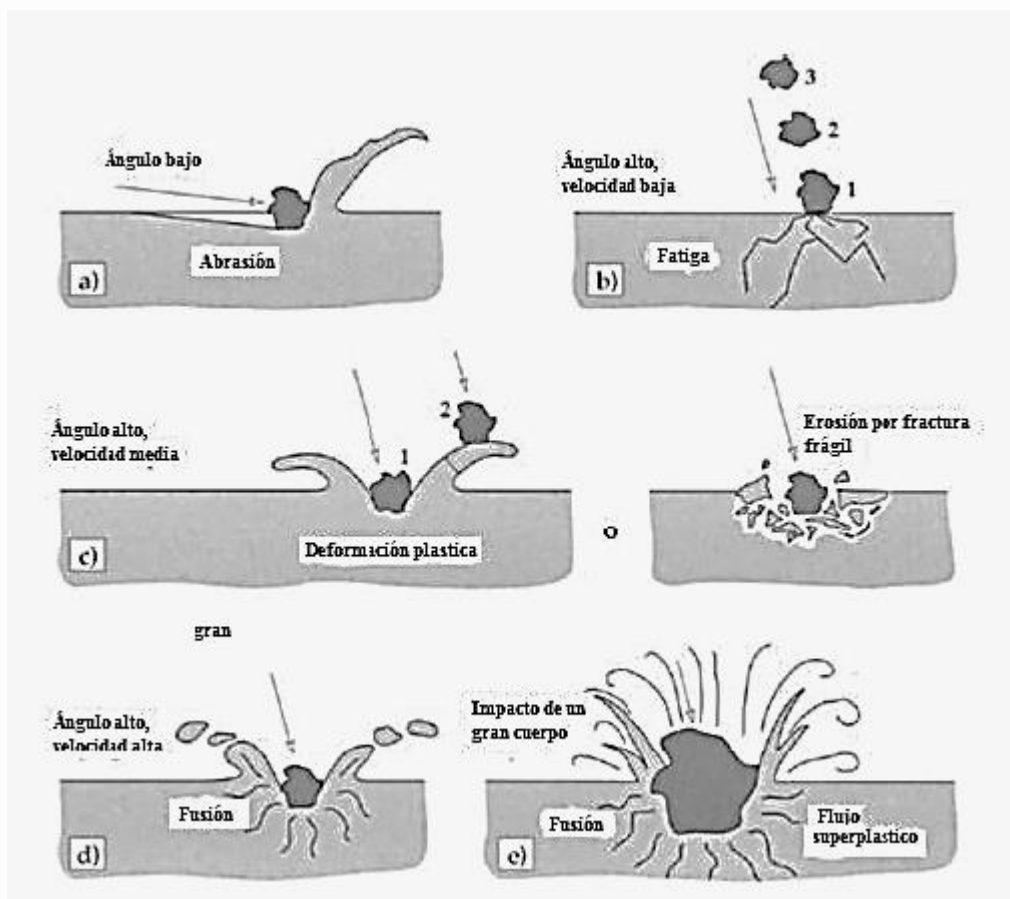


Figura 1.9. Diferentes mecanismos de erosión.

CAPÍTULO II

Diseño de una máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura

El Capítulo 2 describe la metodología de diseño empleada para la construcción de la máquina de ensayos de erosión por partícula sólida, mediante la técnica de despliegue de funciones de calidad QFD (Quality Function Deployment, por sus siglas en inglés). Esta técnica tiene por objetivo desarrollar las fases de requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería, diseño conceptual, diseño de detalle, para obtener un diseño óptimo y funcional para realizar los ensayos de erosión.

2.1 Pasos de la técnica de despliegue de funciones de la calidad (QFD).

La técnica que se empleó para el diseño de la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura es la técnica de QFD, que consta de 8 pasos principales mostrados en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Esquema de la técnica de despliegue de funciones de la calidad (QFD).

2.2 Identificar al cliente o consumidor

Las máquinas de ensayos de erosión por partícula sólida son utilizadas en la actualidad por escuelas o centros de investigación, los cuales tienen por objetivo explicar cómo afecta este fenómeno en componentes industriales. Por lo tanto, fueron identificados dos clientes potenciales:

- Centros de investigación que estudian el desgaste erosivo en materiales ingenieriles
- Universidades públicas o privadas que evalúan fenómeno de desgaste erosivo

2.3 Determinar los requerimientos del cliente.

Con la identificación de los clientes potenciales, es indispensable conocer qué funcionalidades requiere la máquina para realizar los ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura. Sin embargo, los requerimientos determinados se encuentran principalmente en relación a las necesidades en institutos de investigación de materiales, debido la importancia de estudiar el fenómeno del desgaste erosivo en diferentes tipos de materiales ingenieriles.

Los requerimientos que solicita el cliente son los siguientes:

- ♣ Tener un flujo controlado del abrasivo
- ♣ Pueda ser ajustada la máquina para diferentes velocidades
- ♣ Simple operación de la máquina
- ♣ Para diferentes tipos de probetas
- ♣ Que tenga un bajo costo
- ♣ La máquina debe trabajar de una forma limpia
- ♣ Debe contar con pocas piezas
- ♣ Las piezas utilizadas deben ser comerciales
- ♣ Las piezas deben ser durables
- ♣ Fácil mantenimiento
- ♣ Que cuente con un sistema para girar la probeta a ángulos de 30°, 60°y 90°

- ♣ Capacidad para realizar la mayor cantidad de ensayos
- ♣ Que la boquilla sea durable
- ♣ Que se pueda trabajar con diferentes tamaños de partículas abrasivas
- ♣ Que la máquina trabaje a alta temperatura en un rango de 298 a 673 K

Una vez identificados los requerimientos del cliente, se uso el metodo de Kano (Ullman, 2003) con el objetivo de determinar su importancia o clasificación. Según este método los requerimientos pueden ser de tres tipos:

- Básico (si el producto o servicio no lo posee puede causar desagrado al cliente).
- Funcional (si el producto lo posee puede generar un cierto agrado al cliente).
- Innovador (si el producto lo posee el cliente puede estar muy satisfecho o sorprendido).

Tabla 2.1 Clasificación de los requerimientos del cliente para una máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

Requerimiento del cliente	Tipo de requerimiento
Tener un flujo controlado del abrasivo	Básico
Que el flujo del aire comprimido pueda ser ajustado para diferentes velocidades	Básico
Simple operación	Funcional
Ajustable para diferentes tipos de probetas	Básico
Que la máquina tenga un bajo costo	Funcional
La máquina debe trabajar de una forma limpia	Innovador
Debe de contar con pocas piezas	Funcional
Las piezas utilizadas deben ser comerciales	Funcional
Las piezas deben ser durables	Funcional
Facil mantenimiento	Funcional
Que pueda evaluarse el angulo de impacto del abrasivo	Funcional
Que pueda realizar la mayor cantidad de ensayos	Funcional
Que la boquilla sea durable	Funcional
Que se pueda trabajar con diferentes tamaños de partículas abrasivas	Básico
Que la máquina realice los ensayos de erosión a alta temperatura en un rango de temperatura ambiente a 673 K	Innovador

Durante esta etapa el método QFD recomienda eliminar los requerimientos básicos de la tabla anterior y solo trabajar con los funcionales y novedosos. En este caso, se mantendrán los requerimientos básicos ya que al examinarlos detenidamente, se estableció que pueden generar información valiosa en las etapas posteriores del método de QFD.

2.4 Determinar la importancia relativa de los requerimientos.

En el paso anterior se identificaron las funciones o requerimientos que son más deseables en la máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura. Desafortunadamente, los diferentes clientes aprecian los requerimientos de forma diferente. Por ende, el que un requerimiento sea básico, funcional, o novedoso solo nos da un parámetro de evaluación muy pobre. Se consideran dos requerimientos básicos, en el sentido propio de la palabra, ambos pesan lo mismo en la evaluación. Por lo tanto, se solicitó a los clientes que evaluaran los requerimientos usando la técnica de distribución de 100 puntos. Los resultados de la ponderación de los requerimientos de los diferentes clientes se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Ponderación de los requerimientos por criterio del cliente.

Requerimiento del cliente	Instituciones de investigación	Escuelas públicas o privadas
Tener un flujo controlado del abrasivo	10	9
Que el flujo del aire comprimido pueda ser ajustado para diferentes velocidades	7	6
Simple operación	10	7
Ajustable para diferentes tipos de probetas	6	5
Que la máquina tenga un bajo costo	7	10
La máquina debe trabajar de una forma limpia	10	8
Debe de contar con pocas piezas	6	7
Las piezas utilizadas deben ser comerciales	4	10
Las piezas deben ser durables	5	6
Fácil mantenimiento	7	6
Que pueda evaluarse el ángulo de impacto del abrasivo	6	7
Que pueda realizar la mayor cantidad de ensayos	10	6
Que la boquilla sea durable	7	6
Que pueda trabajar con diferentes tamaños de partículas abrasivas	5	7
Que la máquina realice ensayos de erosión a alta temperatura	0	0
Total	100	100

2.5 Identificar y evaluar la competencia.

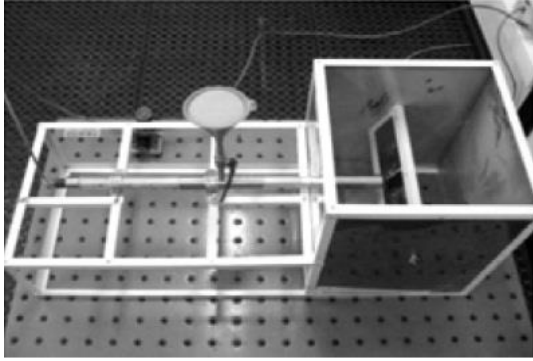

Durante este paso se realizaron dos tareas, la primera fue identificar a la competencia, es decir, las máquinas de erosión por partícula sólida que existen en el mercado o instituciones de investigación o similares a las que se plantea diseñar. La segunda tarea consistió en determinar si las máquinas de erosión por partícula sólida identificadas anteriormente conocen o no los requerimientos del cliente. A continuación, se describe de forma más detallada el desarrollo de éstas tareas.

2.5.1 Identificar a la competencia.

Como se mencionó anteriormente, la primera tarea fue buscar e identificar las máquinas de erosión por partícula sólida que representan posible rival para la máquina a diseñar. En la búsqueda de estas máquinas se consideraron máquinas de erosión por partícula sólida funcionales y de un costo relativamente económico. En otras palabras, usar los requerimientos del cliente como un factor de búsqueda, teniendo en mente el tipo de máquina que se desea diseñar.

Dentro de la búsqueda de máquinas de erosión por partícula sólida, fueron encontradas dos máquinas que podrían ser potenciales competidores para la máquina que se pretende diseñar, aunque cabe mencionar que estas máquinas no funcionan a alta temperatura. Las máquinas son mostradas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Máquinas de erosión identificadas como potenciales competidores.

Equipo	Imagen de la máquina por partícula sólida
<p>Máquina de erosión por partícula sólida Universidad de Colombia</p>	
<p>Máquina de erosión por partícula sólida ESIME Unidad Zacatenco del I.P.N.</p>	

2.5.2 Evaluar a los competidores.

Una vez que los competidores han sido identificados, se procedió a realizar un análisis más profundo de los mismos, con el objetivo de determinar que tanto conocen o cumplen con los requerimientos del cliente e identificar posibles puntos de mejoramiento para el diseño. La comparativa de los requerimientos con respecto a los competidores se muestra en la Tabla 2.4. En esta tabla, los competidores serán designados por un símbolo específico para realizar la comparación entre ellos. Los símbolos correspondientes para cada uno de los competidores son los siguientes:

- ↔ Universidad de Colombia
- ESIME Unidad Zacatenco

Adicionalmente los símbolos representativos son usados para evaluar a los competidores en cinco niveles diferentes. La clasificación o significado de cada uno de estos números para la evaluación de los competidores es mostrado a continuación:

- 1.- El producto no cumple con el requerimiento
- 2.- El producto cumple con el requerimiento un poco
- 3.- El producto cumple con el requerimiento algo
- 4.- El producto cumple con el requerimiento bastante
- 5.- El producto cumple con el requerimiento completamente

Tabla 2.4 Evaluación de la competencia en función de los requerimientos del cliente.

Requerimiento del cliente	Valor de cumplimiento de los requerimientos del cliente de cada competidor				
	1	2	3	4	5
Tener un flujo controlado del abrasivo				■ ↔	
Que el flujo del aire comprimido pueda ser ajustado para diferentes velocidades		■ ↔			
Simple operación				■	↔
Ajustable para diferentes tipos de probetas			↔ ■		
Que la máquina tenga un bajo costo				■ ↔	
La máquina debe trabajar de una forma limpia			↔ ■		
Debe de contar con pocas piezas				■ ↔	
Las piezas utilizadas deben de ser comerciales			■ ↔		
Las piezas deben ser durables			■ ↔		
Fácil mantenimiento		↔	■		
Que pueda evaluarse el angulo de impacto del abrasivo				■ ↔	
Que pueda realizar la mayor cantidad de ensayos			↔ ■		
Que la boquilla sea durable			■ ↔		
Que se pueda trabajar con diferentes tamaños de particulas abrasivas			↔ ■		
Que la máquina de erosión por partícula sólida realice ensayos a alta temperatura en un rango de temperatura ambiente a 673 K	■ ↔				

2.6 Generación de las especificaciones de ingeniería.

En el desarrollo de este paso, se traducen los requerimientos del cliente en términos medibles para determinar cada uno de los requerimientos del cliente y un enunciado que pueda ser representado por alguna unidad de medición (fuerza, velocidad, longitud, área, número de piezas años, etc.). Es importante mencionar que para el requerimiento del cliente se identificó una especificación de ingeniería. Las especificaciones de ingeniería generadas para la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Especificaciones de ingeniería generadas para cada requerimiento del cliente.

Requerimiento del cliente	Especificaciones de ingeniería
Tener un flujo controlado del abrasivo	Cantidad de abrasivo utilizado por minuto
Que el flujo del aire comprimido pueda ser ajustado para diferentes velocidades	Velocidad del flujo del aire comprimido
Simple operacion	Número de pasos para realizar un ensayo
Ajustable para diferentes tipos de probetas	Geometría y tamaño de probetas
Que la máquina tenga un bajo costo	Costo del equipo
La máquina debe trabajar de una forma limpia	Sin fuga del abrasivo en la camra de erosión
Debe de contar con pocas piezas	Número de sistemas principales
Diferentes piezas pueden ser adaptables	Las piezas utilizadas deben ser comerciales
Las piezas deben ser durables	Tiempo de vida de las piezas
Tiempo de mantenimiento	Fácil mantenimiento
Que pueda evaluarse el ángulo de impacto del abrasivo	Sistema para girar la probeta a ángulos de 30°, 60° y 90°
Que pueda realizar la mayor cantidad de ensayos	Minimo tiempo entre fallas
Que la boquilla sea durable	Tiempo de vida boquilla
Que se pueda trabajar con diferentes tamaños de particulas abrasivas	Diametro externo máximo de la boquilla
Que pueda funcionar en un rango de temperatura ambiente a 673 K que es la temperatura utilizada en turbinas de vapor.	Arreglo de resistencias eléctricas para obtener la temperatura deseada

Con el establecimiento de las especificaciones de ingeniería, fueron determinadas las direcciones de mejoramiento de cada una de las especificaciones. En otras palabras, determinar si un requerimiento es mejor al tener mayor dimensión (más fuerza, más velocidad, etc.) o si es mejor que un requerimiento se presente con menor valor (menos peso, menos piezas, etc.). En la Tabla 2.6 se muestran todas las especificaciones del cliente indicando su respectiva dimensión y dirección de mejoramiento.

Tabla 2.6 Unidades de medición y direcciones de mejoramiento de las especificaciones de ingeniería.

Especificación de ingeniería	Unidad de medición	Dirección de mejoramiento
Cantidad de abrasivo utilizado por minuto	Gramos por minuto(g/m)	↓
Velocidad del flujo de aire	Metros por segundo (m/s)	↕
Número de pasos para realizar un ensayo	Número(#)	↕
Longitud maxima de probetas	Milímetros (mm)	↕
Costo del equipo	Pesos	↓
Cantidad de abrasivo utilizado en los ensayos	Gramos por minuto (g/m)	↓
Número de sistemas principales	Número(#)	↓
Diferentes piezas pueden ser adaptables	Número(#)	↑
Tiempo medio entre fallas	Minutos(m)	↓
Tiempo de mantenimiento	Horas(h)	↓
Sistema para girar la probeta a angulos de 30°,60° y 90°	Grados(°g)	↑
Tiempo de mantenimiento entre fallas	Minutos(m)	↓
Tiempo de vida de la boquilla	Horas(h)	↓
Diametro externo máximo de la boquilla	Milímetros(mm)	↑
Potencia y de las resistencias eléctricas	Watts (wts)	↓

2.7 Determinación de la relación de los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería.

Cada especificacion de ingeniería genera un requerimeinto del cliente, sin embargo, existe la posibilidad de que una especificacion de ingenieria este relacionada con más de un requerimiento. Por ende, la siguiente etapa consiste en determinar esa precisa relación de los requeriemintos del cliente y las especificaciones de ingenieria. Para desarrollar dicha relacion se consideran los símbolos mostrados a continuación, especificando el significado de cada uno 9= relación fuerte, 3= relación meda y 1= relación débil. Por otro lado, en la Figura 2.2 se muestra la relación de los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería para la máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

Máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura		Especificaciones de ingeniería (Cómo)														
		Cantidad de abrasivo utilizado por minuto	Presión del aire comprimido	Número de pasos para realizar el	Longitud máxima de la probeta y espesor	Costo del equipo	Cantidad de abrasivo utilizado en los ensayos	Número de sistemas principales	Las piezas utilizadas deben ser	Tiempo de vida de las piezas	Fácil mantenimiento	Facilidad para cambiar de ángulos	Tiempo requerido en cada ensayo	Tiempo de vida de la boquilla	Díametro externo máximo de la boquilla	Potencia de las resistencias eléctricas
Dirección de mejoramiento		↓	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑
Unidades		g/m	m/s	#	m	\$	g/m	#	#	h	m	°g	m	h	mm	wts
Requerimientos del cliente (Qué)	Tener un flujo controlado del abrasivo	9	9		9	3		9					9			
	Que el flujo del aire comprimido pueda ser ajustado para diferentes velocidades	3	9	9	9	1		9	3	3	3		9	3		
	Simple operación			9				3	9	3	3	9	1	3		
	Ajustable para diferentes tipos de probetas	1	9	1	9	9		9					9			
	Que la máquina tenga un bajo costo		9		3	9	1	9				3	1			
	La máquina debe trabajar de una forma limpia		1	3				9	9	1	1		9	3		
	Debe contar con pocas piezas		3	9	3	3	9	9	3	3		9	9	3		
	Diferentes piezas deben ser adaptables			1					3	9	9		1			
	Las piezas deben ser durables			1					3	9	9		1			
	Tiempo de mantenimiento			9	1				3			9		1	9	
	Que cuente con un sistema simple para girar la probeta a ángulos de 30°, 60° y 90°							9	3				9			
	Que pueda realizar la mayor cantidad de ensayos		1	9					9			9		9		
	Que la boquilla sea durable							9								
	Que se pueda trabajar con diferentes tamaños de partículas														9	
Que funcione a una temperatura de temperatura ambiente a 673 K																9

Figura 2.2 Relación de los requerimientos del cliente y las especificaciones de ingeniería para la máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

2.8 Determinar los objetivos de ingeniería.

La obtención de los objetivos de ingeniería es la parte más importante del QFD, debido a que son los parámetros o características operacionales que deberá cumplir la máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura. La fase consta de dos etapas generales: evaluación de los competidores con respecto a las especificaciones de ingeniería y establecimiento de los objetivos de ingeniería. En este paso, se determina que tan bien la competencia conoce o cumple con las especificaciones de ingeniería. Tal evaluación considera a los competidores de forma más específica o detallada. Al desarrollar las especificaciones de ingeniería se establecieron parámetros medibles en función de las características de una máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura. Por lo tanto, se evaluaron los competidores con el objetivo de obtener los valores o características de cada uno de ellos para que cumplieran con cada una de las especificaciones de ingeniería previamente establecidas.

La investigación detallada de las máquinas de erosión por partícula sólida (competencia) permitió observar el estado de dichos equipos y el valor en el cual cumplen con las especificaciones de ingeniería. Tomando tales valores como referencia es posible establecer los objetivos de ingeniería satisfechos e insatisfechos. Los objetivos de ingeniería satisfechos son los valores preferentes que debería presentar el nuevo equipo que se quiere diseñar, mientras que los insatisfechos son valores que no debe presentar el nuevo equipo, o en otras palabras, si el nuevo equipo presentara características inferiores a estos valores se considera que no es un equipo competitivo. Sin embargo, entre los objetivos satisfechos e insatisfechos existe un intervalo. El intervalo entre los valores máximos (satisfecho) y los mínimos (insatisfecho) es la información que será de utilidad en las etapas siguientes, sobre todo en el diseño de detalle para lograr proponer un equipo competitivo. La Tabla 2.7 muestra la comparación de los equipos de la competencia, además de mostrar los objetivos de ingeniería establecidos para la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

Tabla 2.7 Evaluación detallada de la competencia y objetivos de ingeniería establecidos

Especificación de ingeniería	Unidad de medición	Dirección de mejoramiento	Competidores		Objetivos de ingeniería	
			Universidad de Colombia	ESIME Unidad Zacatenco I.P.N.	Objetivo Satisfecho	Objetivo Insatisfecho
Cantidad de abrasivo utilizado por minuto	Gramos por minuto(g/m)	↓	40	40	40	42
Velocidad del flujo de aire	Metros por segundo (m/s)	↑	30	30	30	32
Número de pasos para realizar un ensayo	Número(#)	↓	-	-	5	7
Longitud máxima de probetas	Milímetros (mm)	↑	25	50	100	120
Costo del equipo	Pesos	↓	-	-	8000	10000
Cantidad de abrasivo utilizado en los ensayos	Gramos por minuto (g/m)	↓	400	400	120	125
Número de sistemas principales	Número(#)	↓	4	5	4	6
Diferentes piezas pueden ser adaptables	Número(#)	↑	4	3	6	7
Tiempo medio entre fallas	Minutos(m)	↓	-	-	5	10
Tiempo de mantenimiento	Horas(h)	↓	-	-	1	2
Que pueda evaluarse el ángulo de impacto del abrasivo	Grados(°g)	↑	0-90	0-90	0-90	0-95
Tiempo de mantenimiento entre fallas	Minutos(m)	↓	-	-	20	30
Tiempo de vida de la boquilla	Horas(h)	↑	-	-	80	90
Diametro externo máximo de la boquilla	Milímetros(mm)	↑	4	6	6	7
Potencia y de las resistencias eléctricas	KiloWatts (wts)	↓	-	-	15	17

En la Tabla 2.7 se ve claramente que falta información sobre los demás equipos. Por lo tanto, en tales casos fue necesario recurrir a información bibliográfica obtenida con anterioridad para lograr establecer los objetivos de ingeniería. Algunos objetivos fueron obtenidos a través de los clientes potenciales, esto debido a su experiencia y conocimiento sobre el ensayo de erosión por partícula sólida, permitiendo establecer objetivos de ingeniería razonables.

2.9 Identificar la relación entre los requerimientos de ingeniería.

Aunque el establecimiento de los objetivos de ingeniería es la parte más importante del QFD puesto que la información es de gran ayuda para siguientes fases del diseño de la máquina. Normalmente no es posible cumplir completamente con todos los objetivos satisfactorios establecidos en el QFD. Por lo tanto, es necesario observar que relación guardan las especificaciones de ingeniería entre ellas , y lograr proponer un diseño que cumpla con todas las especificaciones entre los intervalos identificados en los objetivos de ingeniería. Una relación obvia presente en este caso, es la relación negativa entre la velocidad máxima de impacto y el flujo de la partícula abrasiva.

La relación entre las especificaciones de ingeniería es presentada por medio de la casa de QFD tomando solo la parte superior (ver Figura 2.3), donde se realiza la comparación entre las especificaciones de ingeniería. Para determinar dicha relación se usaron los símbolos presentados a continuación mencionando su respectivo significado.

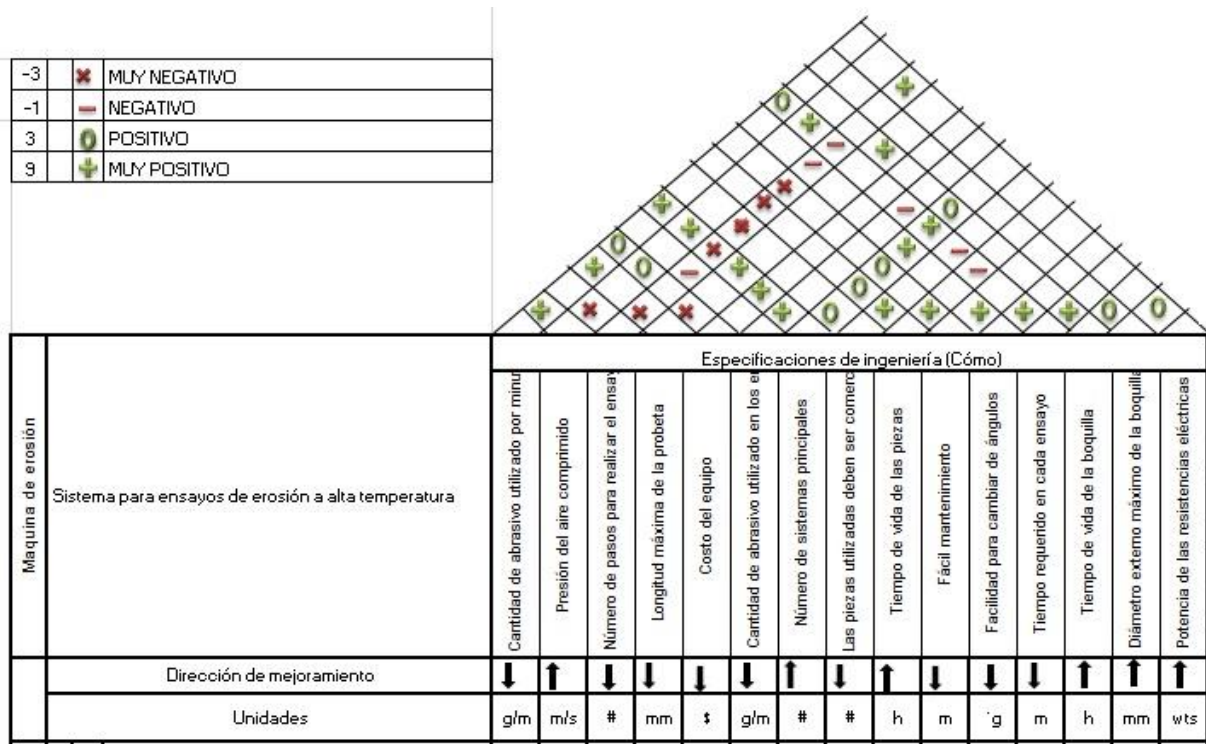


Figura 2.3 Relación entre los requerimientos de ingeniería.

Por último, se presenta la casa de calidad completa de la máquina de ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura.(Figura 2.4)

Los valores mostrados en la casa de la calidad de la absoluta importancia y la relativa importancia, indican que un valor o porcentaje alto en los requerimientos y especificaciones de ingeniería, resolvera de una manera más eficiente los requerimientos de ingeniería que el cliente requiere y de esta manera, obtener una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura funcional.

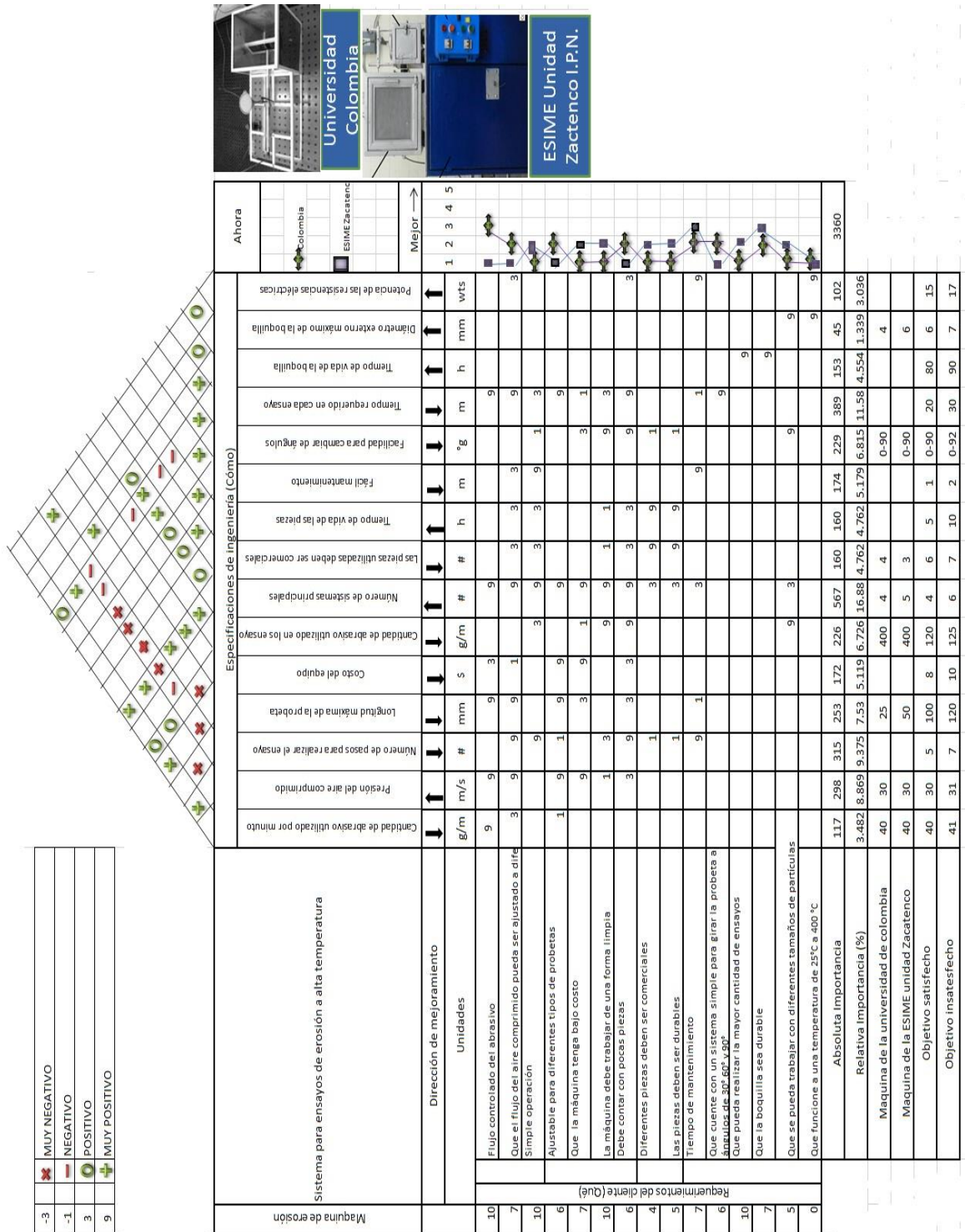


Figura 2.4 Casa de calidad de QFD para una máquina de ensayos de erosión por partícula sólida.

2.10 Diseño conceptual

2.10.1 Análisis funcional.

El análisis funcional de una máquina de erosión por partícula sólida tiene por objetivo obtener de qué manera se asegura la realización de su función. Durante este Capítulo se mencionan los pasos principales para el desarrollo de un análisis funcional, por lo que se propone establecer la función global de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

2.10.2 Definición de la función global de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

El primer paso para el diseño conceptual fue el definir correctamente la función que debe realizar la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura. Para definir la función global se optó por la representación de la misma como un sistema o una caja negra. Básicamente se define la función como un proceso de transformación, por lo tanto, es necesario identificar que flujos de energía, información y/o material entran dentro del proceso o función de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura. Tales flujos son transformados por la función y se convierten en nuevos flujos de energía, información y/o material a la salida. La Figura 2.5 muestra tal representación junto con los flujos de entrada y salida identificados

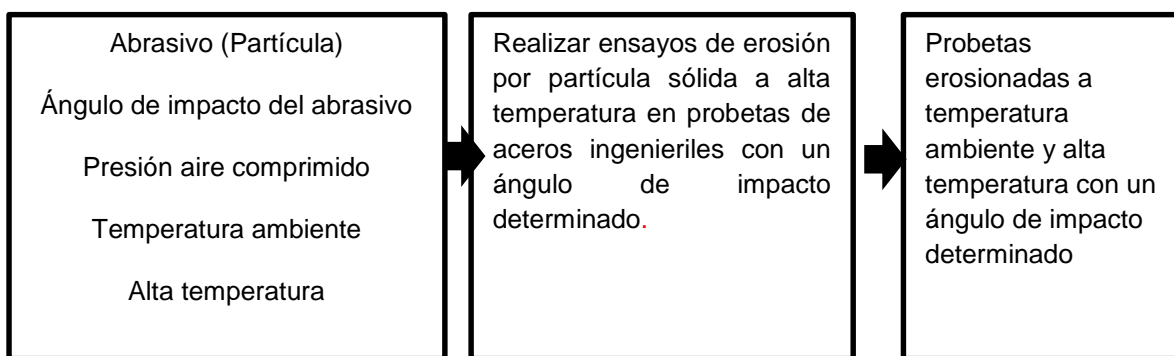


Figura 2.5 Función global de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

Con el establecimiento de la función global de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura es necesario determinar las condiciones de frontera de la misma. En otras palabras, la máquina interactúa con ciertos objetos que se encuentran a su alrededor y que son parte del mismo y que de igual forma intercambian energía, información y/o material con la máquina. Analizando este hecho, fueron determinadas las siguientes fronteras para una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura:

- ✓ Operador de la máquina
- ✓ Herramientas de ajuste
- ✓ Zona de trabajo (laboratorio)
- ✓ Probetas de aceros ingenieriles

2.11 Descomposición de la función global de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

El definir la función de una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura solo permite establecer que debe realizar la máquina pero no cómo lo realiza. Mediante una descomposición de la función global es posible encontrar las diferentes funciones individuales que unidas llevan a cabo la función global. Tal descomposición solo se desarrolló hasta el punto en el que se identificaron soluciones viables o directas para una subfunción. El análisis funcional para la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura se presenta en la Figura 2.6.

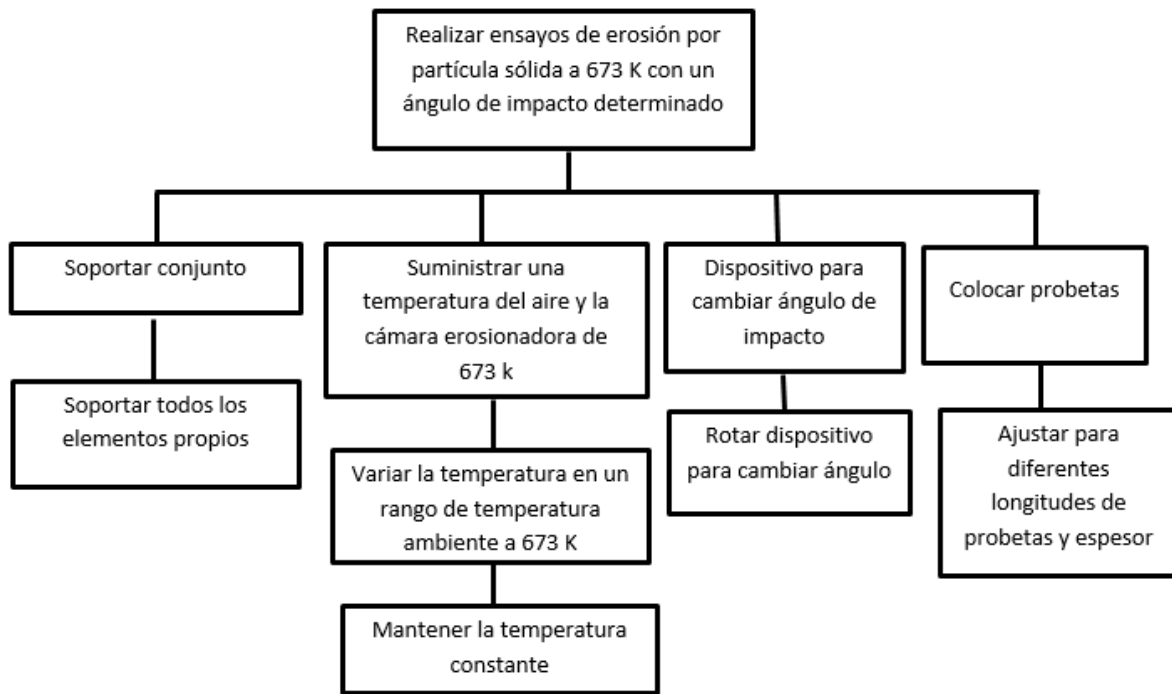


Figura 2.6 Análisis funcional de la máquina de erosión por partícula sólida.

Las subfunciones identificadas en el último nivel de descomposición fueron analizadas y se observó que es posible establecer una solución para cada una de ellas de forma directa, y que además describían completamente la función global de la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

2.11.1 Generación de conceptos o soluciones.

Tomando como punto de partida las subfunciones identificadas en el último nivel de descomposición del análisis funcional, se proponen diferentes soluciones para cada una de ellas o conceptos por medio del uso de una matriz morfológica de soluciones. Con el establecimiento de diversas soluciones para la subfunciones se procedió a combinarlas en sistemas o conceptos globales, tanto para el sistema para girar ángulos como para el sistema de alta temperatura. Ambos sistemas fueron evaluados independientemente por una matriz de evaluación avanzada y posteriormente unidos para obtener un concepto global final.

2.11.2 Matriz morfológica de soluciones.

Durante el análisis funcional fueron establecidas funciones o subfunciones que presentaban una solución directa. En la generación conceptual se desarrolló este planteamiento de ideas a un nivel de mayor detalle con lo que fue posible proponer un mayor número de soluciones o conceptos para cada subfunción. Usando una matriz morfológica de soluciones (ver Tabla 2.8) se obtuvieron los siguientes conceptos para cada función.

Tabla 2.8 Matriz morfológica de soluciones o conceptos

Función	Solución 1	Solución 2
Soportar todos los elementos propios	Estructura 1	Estructura 2
Suministrar una temperatura del aire y de la cámara de erosión de 673 K	Resistencias electricas tipo espiral	Banco de resistencias
Variar la temperatura en un rango de temperatura ambiente a 673 K	Pirometro Digital	Pirometro analógico
Mantener la temperatura constante	Control de temperatura analogico	Control de temperatura Digital
Rotar dispositivo para cambiar angulo	Dsipoitivo 1	Dispositivo 2
Ajustar para diferentes longitudes de probetas y espesor	Portaprobetas 1	Portaprobetas 2

Las soluciones presentadas en la Tabla 2.8 surgieron en mayor medida por la consulta de información bibliográfica de componentes de maquinaria y de teoría de diseño mecánico. Sin embargo, aunque ciertas soluciones pueden ser representadas fácilmente por medio de su nombre, otras requieren una representación por medio de una imagen o croquis para mostrar la solución propuesta. Entre las funciones cuyas soluciones o conceptos generados requieren una representación gráfica se consideraron las siguientes:

- Soportar todos los elementos propios
- Suministrar una temperatura del aire y la cámara de erosión de 673 K
- Rotar dispositivo para cambiar ángulo

2.11.3 Conceptos para la función “Soportar todos los elementos propios”.

Los conceptos propuestos para esta función son referidos como estructuras, es decir, qué configuración o forma estructural era más conveniente para la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura. Considerando las diversas arquitecturas identificadas en el estado del arte, se propusieron 2 configuraciones estructurales diferentes. Tales estructuras se muestran a continuación (Figura 2.7).

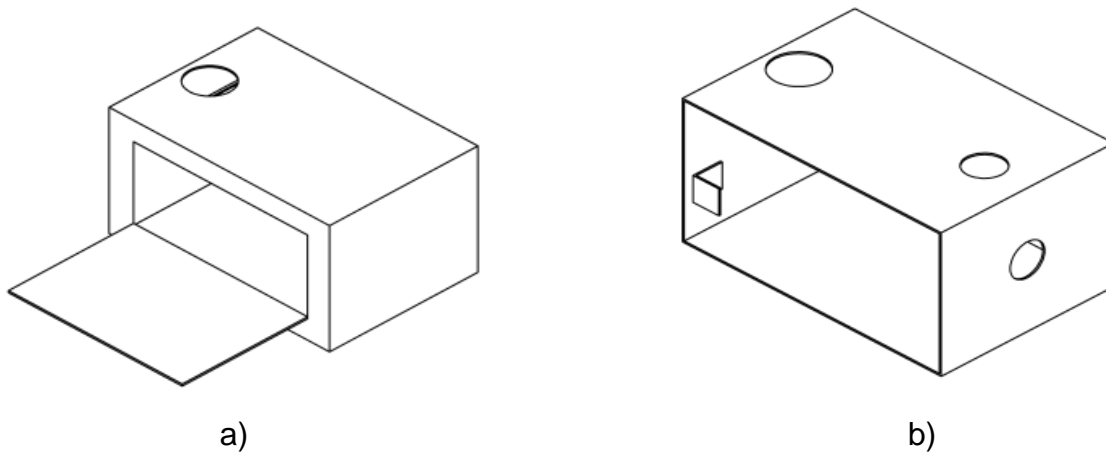
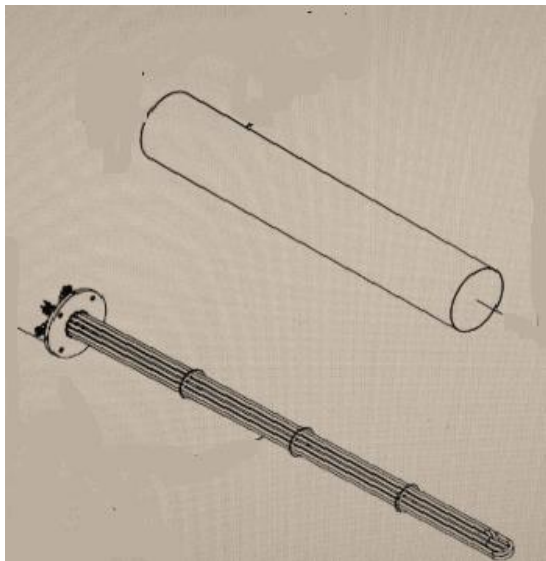


Figura 2.7 Conceptos propuestos para la función soportar los elementos propios a) Estructura 1 y b) Estructura 2.

2.11.4 Conceptos para la función “Suministrar una temperatura del aire a 673 K”.

La función está directamente enfocada a solucionar el aspecto de proponer un equipo para calentar el aire a 673 K. La solución para la temperatura del aire es simplemente proponer un tubo hueco donde aloje las resistencias eléctricas para el paso del aire comprimido para alcanzar la temperatura de 673 K (Ver Figura 2.8).



a)



b)

Figura 2.8 Conceptos propuestos para la función suministrar una temperatura de 673 K a) banco de resistencias y b) resistencias en forma de espiral.

2.11.5 Combinación de soluciones en conceptos globales.

Con el establecimiento de diferentes soluciones para cada una de las subfunciones, se procedió a combinar dichas soluciones en conceptos que resolvieran la función global. Desafortunadamente considerando el número de soluciones propuestas, se llevaría a la obtención de un número aún mayor de conceptos globales, por lo tanto, se analizaron las diversas soluciones mencionadas anteriormente con el objetivo de identificar, cuáles de ellas son las más viables o posibles de ser implementadas en la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

Aunado a lo anterior, se decidió no generar conceptos globales directamente de máquinas de erosión por partícula sólida a alta temperatura, considerando los diferentes estudios y información obtenida de equipos de erosión por partícula sólida. Con lo mencionado anteriormente, se tomó la decisión de dividir la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura en 2 sistemas principales. Estos 2 sistemas son el sistema para calentar el aire y la cámara de erosión a una temperatura de 673 K y el sistema de rotar ángulos.

Por medio de lo anterior, y considerando solo las soluciones más viables, fueron desarrollados conceptos globales para el sistema para calentar aire y la cámara de erosión a 673 K y conceptos globales para el sistema de rotar ángulos. En la parte siguiente serán descritos cada uno de los conceptos globales generados, mencionado qué soluciones representa y un dibujo esquemático o representativo del mismo.

2.11.6 Conceptos globales del sistema para calentar aire y la cámara de erosión a 673 K.

En el sistema para calentar aire y la cámara de erosión a 673 K, se tiene que ver cómo será calentado el aire, la cámara de erosión y dónde se colocaran las probetas para los ensayos. Las funciones que se identificaron en el análisis funcional que serán resueltas para los sistemas mencionados anteriormente se muestran a continuación:

1. Mantener una temperatura constante de 673 K.
2. Variar la temperatura en un rango de temperatura ambiente a 673 K.
3. Soportar todos los elementos propios.

Con la identificación de las funciones que debe resolver el sistema para calentar aire y la cámara de erosión a 673 K, además de retomar la información sobre las soluciones propuestas para cada una de estas funciones, fue posible la obtención de 2 conceptos globales para el sistema. A continuación se describen cada uno de estos conceptos globales por medio de tablas e imágenes para el mismo, haciendo mención de las soluciones consideradas para cada función identificada seguido de la figura o esquema de la solución global.

Tabla 2.9 Soluciones propuestas para el concepto global N° 1 para el sistema para calentar el aire y la cámara de erosión a 673 K.

Función que debe realizar	Concepto propuesto
Soportar todos los elementos propios	Estructura 1
Suministrar una temperatura del aire y de la cámara de erosión a 673 K	Resistencias eléctricas tipo espiral
Variar la temperatura en un rango de temperatura ambiente a 673 K	Pirómetro digital
Mantener la temperatura constante	Control de temperatura analógico
Rotar dispositivo para cambiar ángulo	Dispositivo 1
Ajustar para diferentes longitudes de probetas y espesor	Portaprobetas 1

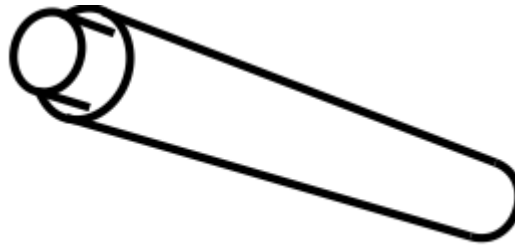


Figura 2.9 Concepto global N° 1 del sistema para calentar aire y la cámara de erosión.

Tabla 2.10 Soluciones propuestas para el concepto global N° 2 para el sistema para calentar el aire y la cámara de erosión a 673 K.

Función que debe realizar	Concepto propuesto
Soportar todos los elementos propios	Estructura 2
Suministrar una temperatura del aire y de la cámara de erosión de 673 K	Banco de resistencias
Variar la temperatura en un rango de temperatura ambiente a 673 K	Pirómetro analógico
Mantener la temperatura constante	Control de temperatura digital
Rotar dispositivo para cambiar ángulo	Dispositivo 2
Ajustar para diferentes longitudes de probetas y espesor	Portaprobetas 2



Figura 2.10 Concepto global N° 2 para el sistema para el sistema para calentar aire y la cámara de erosión.

2.11.7 Conceptos globales del sistema para rotar ángulos.

El sistema para rotar ángulos en términos muy generales son los mecanismos o medios para girar la probeta. Más aún, considera los modos para girar el portaprobetas de forma correcta. Al igual que en el sistema para calentar el aire y la cámara de erosión fueron identificadas las funciones que serán resueltas por el sistema para rotar ángulos. Tales funciones se enlistan a continuación.

1. Girar las probetas
2. Facilidad para cambiar ángulos.
3. Ajustar distancia con respecto a la boquilla.

Al igual que en los conceptos globales propuestos para el sistema para calentar aire y la cámara de erosión a 673 K, se establecieron los conceptos globales para el sistema de rotar ángulos. Sin embargo, en el caos del sistema para rotar ángulos fueron obtenidos 2 diferentes conceptos globales, cada uno de ellos se presentan a continuación con más detalle en las Tablas 2.11 y 2.12 y en las Figuras 2.11 y 2.12 siguientes.

Tabla 2.11 Soluciones propuestas para el concepto global N° 1 para el sistema de rotar ángulos.

Función que debe realizar	Concepto propuesto
Soportar todos los elementos propios	Estructura 1
Suministrar una temperatura del aire y de la cámara de erosión a 673 K	Resistencias eléctricas tipo espiral
Variar la temperatura en un rango de temperatura ambiente a 673 K	Pirómetro digital
Mantener la temperatura constante	Control de temperatura analógico
Rotar dispositivo para cambiar ángulo	Dispositivo 1
Ajustar para diferentes longitudes de probetas y espesor	Portaprobetas 1

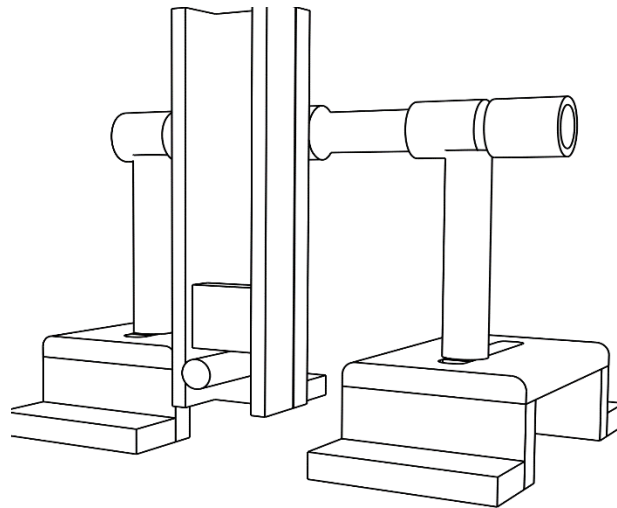


Figura 2.11 Concepto global N° 1 para el sistema de rotar ángulos.

Tabla 2.12 Soluciones propuestas para el concepto global N° 2 para el sistema de rotar ángulos

Función que debe realizar	Concepto propuesto
Soportar todos los elementos propios	Estructura 2
Suministrar una temperatura del aire y de la cámara de erosión a 673 K	Banco de resistencias
Variar la temperatura en un rango de temperatura ambiente a 673 K	Pirómetro analógico
Mantener la temperatura constante	Control de temperatura digital
Rotar dispositivo para cambiar ángulo	Dispositivo 2
Ajustar para diferentes longitudes de probetas y espesor	Portaprobetas 2

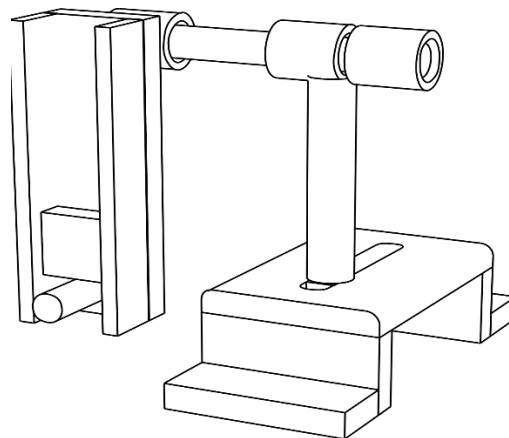


Figura 2.12 Concepto global N° 2 para el sistema de rotar ángulos.

Con la identificación de los conceptos globales ganadores, ambos fueron combinados, y como resultado se obtuvo el concepto global ganador de la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura. El concepto resultante de la combinación de ambos sistemas se presenta en la Figura 2.13. (El manual de operación se muestra en el Anexo A y B y los planos de la máquina se muestran en el Anexo C.

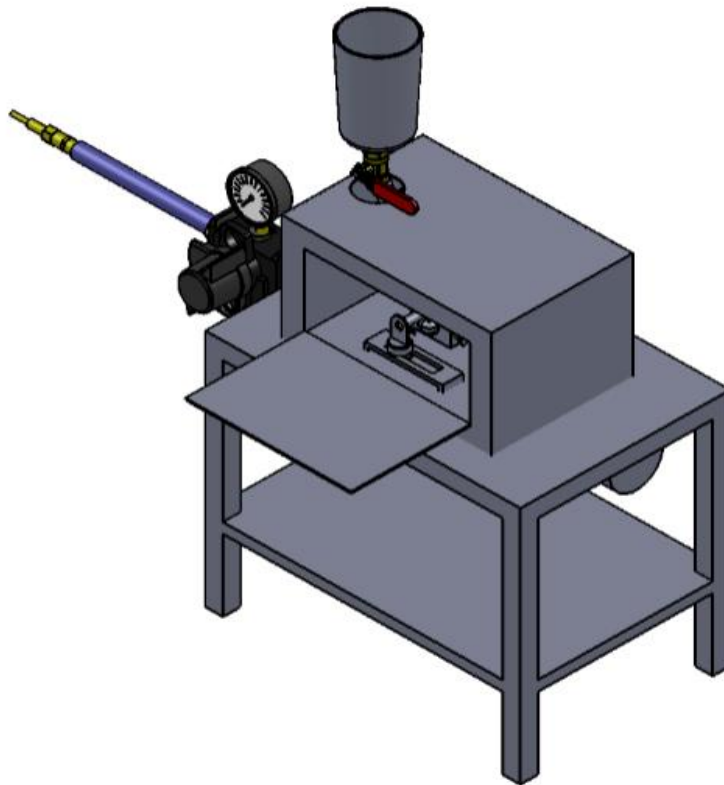


Figura 2.13 Concepto global de la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

2.12 Diseño de detalle.

2.12. 1 Diseño de las resistencias eléctricas del tubo calentador de aire.

Para el diseño del tubo calentador de aire para la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura se tuvieron que considerar diferentes variables para alcanzar la temperatura de 673 K, entre las cuales se pueden mencionar calibre de

alambre Nichrome, longitud del mismo y el voltaje con que se van a conectar las resistencias eléctricas. Para el cálculo de las resistencias se utilizó la Ecuación 2.1.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.1)$$

Donde:

$R =$ Resistencia (Ω)

$\rho =$ Coeficiente de resistencia específica $\left(\frac{\Omega \text{mm}^2}{m} \right)$

$S =$ Area del alambre de Nichrome (mm^2)

Para obtener una temperatura de 673 K tenemos que tener una potencia de 15 KW, por lo que, se consideraron los siguientes valores para obtener esta potencia deseada.

$$S = 1.31 \text{ mm para un calibre 16 de alambre Nichrome}$$

$$l = 5 \text{ m}$$

$$\rho = 1.5 \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$$

$$R = \left(1.5 \frac{\Omega \text{mm}^2}{m} \right) \left(\frac{5 \text{ m}}{1.31 \text{ mm}} \right) = 5.72 \Omega$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220 \text{ volts}}{5.72 \Omega} = 38.42 \text{ amperes}$$

$$P = V\sqrt{3}I = (220\sqrt{3})(38.42) = 14.62 \text{ Kilowatts}$$

Con los valores calculados anteriormente se puede garantizar que el tubo calentador de aire va a tener una temperatura de 673 K.

2.12.2 Diseño de la cámara de erosión.

Para la construcción de la cámara de erosión se realizaron los siguientes cálculos:

a) Dimensiones de la mufla:

- b) Paredes frontal y trasera 50 x 50 cm
- c) Paredes laterales, superior e inferior 21 x 18 cm
- d) Ancho de las paredes.

Las paredes estan formadas de una capa de material ceramico refractario con las siguientes especificaciones mostradas en la Tabla 2.11. Con estos materiales, se obtendra un espesor de 3 pulgadas, ademas de llevar fibra cerámica refractaria tipo colchoneta en las paredes de la cámara de erosión.

Tabla 2.11 Especificaciones de los materiales para las paredes de la cámara de erosión.

	Material	Espesor (L)	Conductividad termica (k)
Primer material	Ladrillo refractario	1 pulgada	0.18 W/mk
Segundo material	Colchoneta de fibra cerámica refractaria	1 pulgada	0.17 W/mk
Tercer material	Colchoneta de fibra cerámica refractaria	1 pulgada	0.17 W/mk

De acuerdo a las dimensiones antes mencionadas, se tiene que el área de la cámara de erosión será de:

$$A = (0.50m \times 0.50m \times 2) + (0.18m \times 0.21m \times 4) = 0.615m^2$$

Mediante la ecuación 2.2 se calculó la resistencia térmica obtenida en las pérdidas de transferencia de calor en las paredes de la cámara de erosión, donde:

$$R_T = L1/k1 + L2/k2 + L3/k3 \quad (2.2)$$

Donde:

$L1 =$ Espesor del ladrillo refractario (m)

$L2 =$ Espesor colchoneta de fibra cerámica refractaria (m)

$L3 =$ Espesor colchoneta de fibra cerámica refractaria (m)

$k1 =$ Conductividad térmica ladrillo refractario (W/mk)

$k2 =$ Conductividad térmica colchoneta de fibra cerámica refractaria (W/mk)

$k3 =$ Conductividad térmica colchoneta de fibra cerámica refractaria (W/mk)

$L1 = 1" = 0.0254m$ $k1 = 0.18 W/mk$

$L2 = 1" = 0.0254m$ $k2 = 0.17 W/mk$

$L3 = 1" = 0.0254m$ $k3 = 0.17 W/mk$

$R_T = 0.0254/0.18 + 0.0254/0.17 + 0.0254/k3$

$R_T = 0.4399 K/W$

Con la ecuación 2.3 se obtendrá la potencia de las resistencias eléctricas para la temperatura de 673 K.

$$q = \Delta T / R_T \quad (2.3)$$

$T_{int} = 400^\circ C$

$T_{ext} = 25^\circ C$

$R_T = 0.4399 K / W$

$q = 400 - 25 / 0.4399 = 852.46 W$

De los valores obtenidos de las ecuaciones anteriores, se determinó, la potencia de la resistencia eléctrica para obtener una temperatura de 673 K en la cámara de erosión, el valor calculado es de 852.46 Watts, tomando en cuenta las pérdidas de transferencia de calor en las paredes y de la puerta de la cámara de erosión. Para efectos de compra para la resistencia eléctrica, se utilizará, una resistencia eléctrica comercial cuyo valor es de 1200 Watts a una alimentación de 127 volts, logrando alcanzar la temperatura de 673 K en la cámara de erosión.

CAPÍTULO III

Procedimiento experimental

El presente Capítulo describe el procedimiento experimental, el cual se divide en tres partes. La primera parte describe el proceso de borurización en polvo de un acero AISI 4140. La segunda parte describe la preparación y caracterización de las muestras, mediante tres técnicas utilizadas ampliamente en el campo de ingeniería de superficies: la microscopía óptica, para la observación y medición de las capas boruradas, la técnica de indentación instrumentada Berkovich para la caracterización mecánica de la capa de boruros en la superficie del acero AISI 4140, y la técnica de análisis de difracción de rayos x (XRD) con el propósito de verificar la presencia de las fases formadas sobre la superficie del acero AISI 4140 borurado. Finalmente, se realizaron los ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a una temperatura de 673 K sobre las probetas del acero AISI 4140 y del acero AISI 4140 borurado para determinar la pérdida de masa y los posibles mecanismos de desgaste generados a los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

3.1 Tratamiento termoquímico de borurización en polvo del acero AISI 4140.

Se prepararon probetas del acero AISI 4140 con dimensiones de: 12.54 x 12.54 x 10 mm y con una composición química (% en peso) de 0.38-0.43 C, 0.75-1 Mn, 0.80-1.10 Cr, 0.05 máx. S. Las probetas se maquinaron por el proceso de electroerosión, para obtener un acabado superficial óptimo antes del tratamiento termoquímico. Para el tratamiento de borurización, se utilizó polvo de carburo de boro que consta principalmente de B₄C, con un contenido de peso en boro del 76% y un activador de carburo de silicio.

Las exigencias que debe cumplir un agente borurante son:

- ✓ Un buen efecto borurante para la formación de la capa y libre de poros

- ✓ La formación de capas monofásicas a altas temperaturas de tratamiento (fase Fe_2B), las cuales, tienen mayor ductilidad que las capas bifásicas $FeB-Fe_2B$

Los parámetros experimentales que se consideraron para el proceso de borurización en polvo son los siguientes:

- Tratamiento de borurización en caja
- Composición química del agente borurante y del acero AISI 4140
- Geometría y preparación de las probetas antes de endurecerlas
- Distribución de las probetas en el medio borurante
- Medio donde se llevara a cabo el tratamiento termoquímico (sin atmósfera inerte)
- Temperatura del proceso de borurización en polvo
- Tiempo del tratamiento por cada temperatura del proceso

Las probetas se colocaron en un contenedor de acero inoxidable con el agente borurante, y se cierra con la tapa del contenedor de acero inoxidable dejando una pequeña holgura, para permitir la extracción de los gases generados dentro del recipiente (durante el tratamiento). Posteriormente, el contenedor se coloca dentro de una mufla convencional (marca Felisa modelo FE-361), a una temperatura de 1223 K con un tiempo de exposición de 6 h. Por último, el contenedor junto con las probetas, es retirado de la mufla y enfriado lentamente a temperatura ambiente. En la Figura 3.1 se muestra los pasos que constituye la caracterización metalográfica.

La morfología de la capa Fe_2B es de tipo aserrada entre la interface de crecimiento capa/substrato, característica de aceros de bajo y medio carbono y de hierro puro que son endurecidos por este proceso termoquímico.

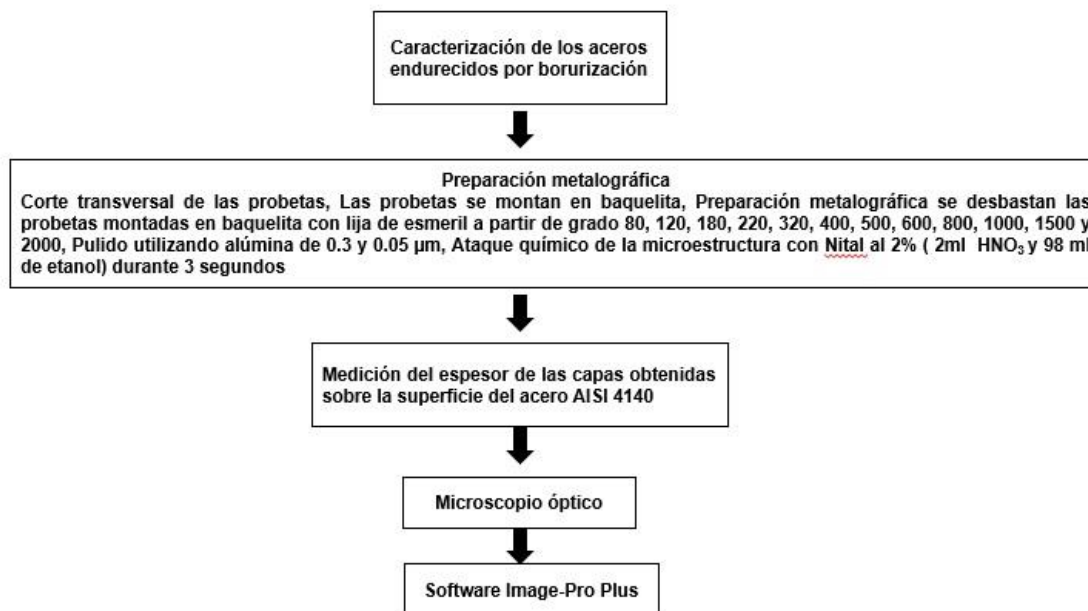


Figura 3.1 Diagrama de flujo que presenta la caracterización metalográfica de los boruros de hierro en un acero AISI 4140.

3.2 Caracterización de las capas boruradas.

La medición experimental del espesor de la capa del boruro de hierro no es fácil debido a la morfología aserrada que presenta en la interfase de crecimiento Fe_2B /substrato. Por ende, se realizaron 50 mediciones en cuatro secciones diferentes de la probeta endurecida con la finalidad de obtener un valor estadísticamente confiable, y reducir el efecto de la rugosidad en la interface. El tamaño de la capa se estimó con el promedio de las longitudes de cada aserración.

3.2.1 Difracción de rayos X.

Con el propósito de verificar la presencia de la fase Fe_2B sobre la superficie del acero AISI 4140 borurado se utilizó la técnica de difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en ingles), haciendo uso de un difractómetro X'PERT PRO PANalytical y aplicando una radiación con lámpara de cobalto (Coka) con una longitud de onda

de 1.54 Å. Los cristales de la fase Fe₂B se alinean preferencialmente a lo largo de la dirección cristalográfica (0,0,1) perpendicular a las superficies de las probetas.

3.2.2 Ensayo de indentación instrumentada Berkovich.

El ensayo de indentación instrumentada Berkovich se realizó a lo largo de la sección transversal de la capa Fe₂B hasta llegar al substrato (Figura 3.2). Se estableció un perfil de durezas con máxima distancia de 150 µm a partir de la superficie; las indentaciones se llevaron a cabo a 10 µm de espaciamiento entre ellas.

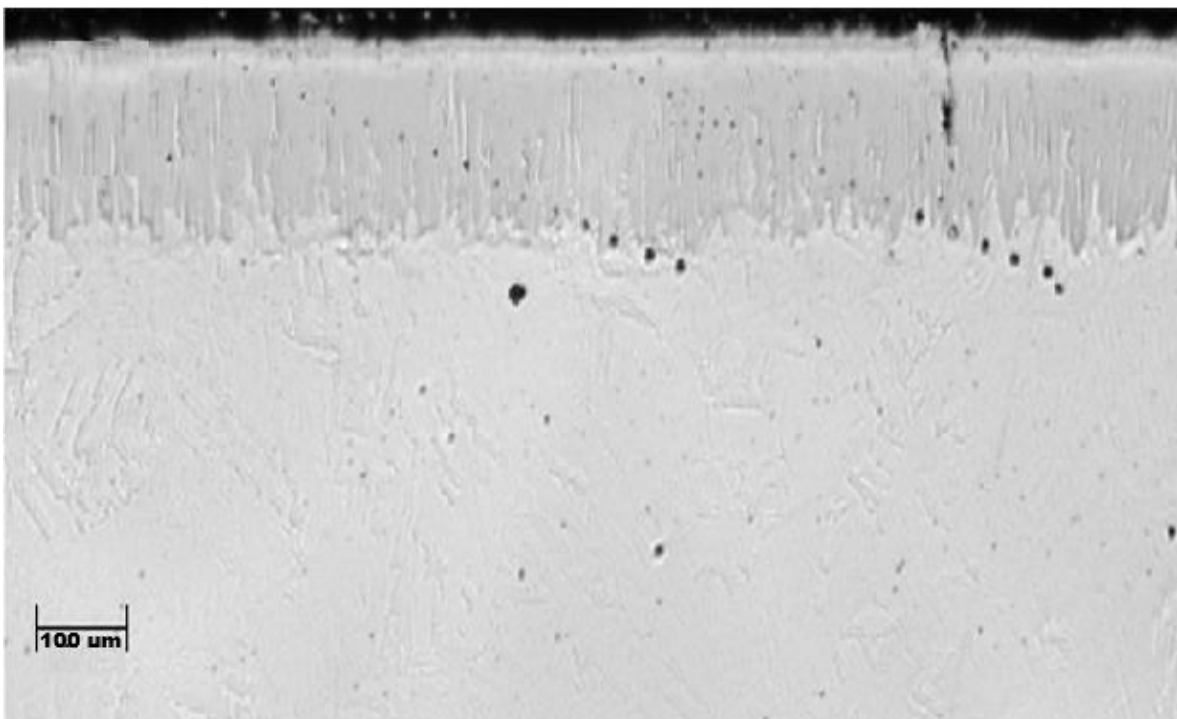


Figura 3.2 Indentaciones Berkovich a lo largo de la capa borurada empleando una carga constante de 100 mN. La temperatura de borurización fue de 1223 K durante 6 h de exposición.

Se estableció una carga constante de indentación de 100 mN. Las probetas pruebas se realizaron con un equipo de indentación instrumentada TTX-NHT, CSM Instruments (Figura 3.3) y un indentador de punta de diamante tipo Berkovich, con la ayuda del software Indentation V 4.16 para analizar las curvas carga-desplazamiento, mediante el método de Oliver y Pharr,(Oliver W C y Pharr G M, 1992, Oliver y Pharr,(Oliver W C y Pharr G M, 2003),que se basa en la estimación

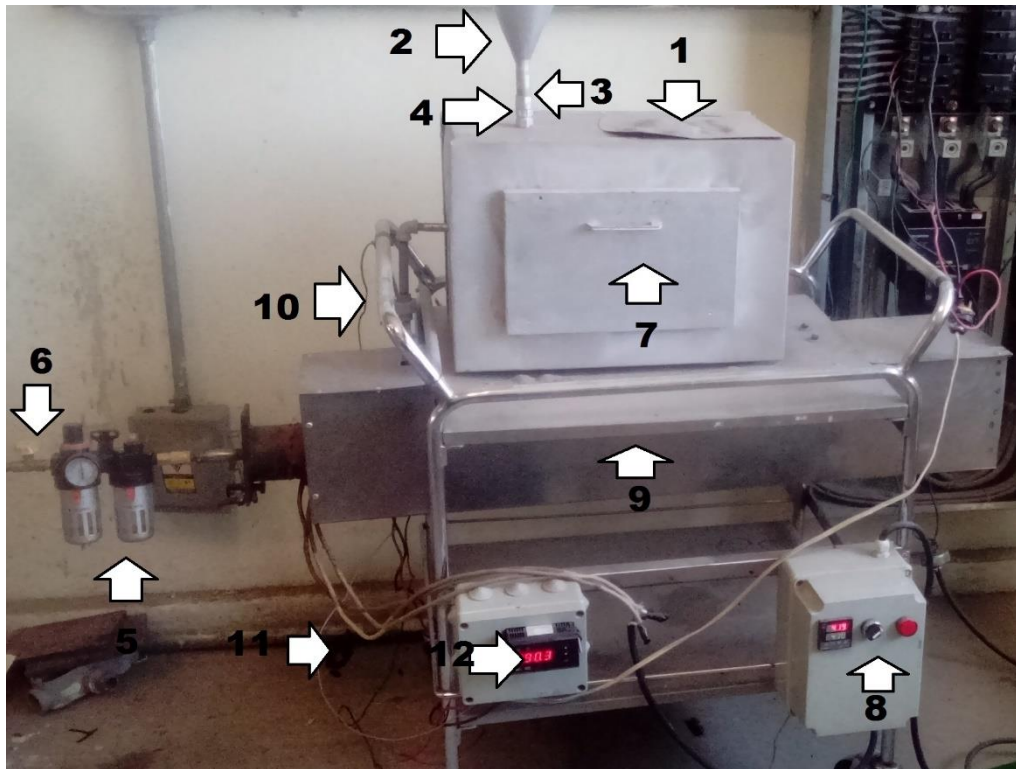
de una profundidad de contacto a través del ajuste de la curva-profundidad registrada por el indentador (Chicot D and Mercier D, 2008).



Figura 3.3 Nanoindentador TTX-NHT Instruments. Propiedad del Centro de Nano ciencias y Micro y Nanotecnologías del I.P.N.

3.3 Ensayos de erosión por partícula sólida a baja y alta temperatura (673K).

Para realizar el ensayo de erosión por partículas sólida, se utilizó un prototipo funcional (desarrollado en el Capítulo 2 para mayor referencia, véase los dibujos de detalle del anexo A) construido por el grupo de Ingeniería de Superficies ® del Instituto Politécnico Nacional. Este prototipo se construyó considerando parámetros establecidos en la norma ASTM G76-95. En la Figura 3.4, se presenta una foto de la máquina de erosión por partícula sólida.



Partes de la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura			
Parte	Nombre	Parte	Nombre
1	Chasis de la máquina	7	Cámara de erosión
2	Tolva para alimentar abrasivo	8	Tablero de control tubo calentador de aire
3	Regulador de caudal de flujo	9	Tubo Calentador de aire
4	Tubo alimentador de partícula abrasiva	10	Termopar del tubo calentador de aire
5	Regulador de Presión de aire	11	Termopar de la cámara de erosión
6	Alimentación de caudal de flujo	12	Tablero de control de la cámara de erosión

Figura 3.4 Máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura (Con registro de patente de invención con número MX/a/2015/006320).

3.3.1 Procedimiento de la prueba

Para los ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K, las probetas se maquinaron en un taller de máquinas herramientas por el proceso de corte por electroerosión para obtener una forma rectangular con dimensiones de 25.4 mm X 25.4 mm, con un espesor de 10 mm.

Posteriormente, se rectificó la superficie de las muestras para tener una rugosidad de $1 \mu\text{m}$ o menor en la superficie de las mismas conforme a la norma ASTM G76-95.

Una vez concluido el proceso de maquinado para las probetas del acero AISI 4140 y del acero AISI 4140 borurado, se realizaron mediciones de rugosidad a lo largo de la superficie de las probetas en diferentes secciones para obtener valores estadísticamente confiables, empleando un Rugosímetro Mitutoyo SJ-210. La estimación de la rugosidad superficial permite establecer si las muestras endurecidas y sin tratamiento térmico, se encuentran dentro del rango de la norma ASTM G76 (1995), para la aplicación de la prueba de erosión por partícula sólida. Los valores promedio de la rugosidad obtenidos corresponden a $0.36 \pm 0.10 \mu\text{m}$ y $0.96 \pm 0.06 \mu\text{m}$ para la condición superficial sin borurar y borurada, respectivamente.

La máquina de erosión por partícula sólida funciona por medio de aire a presión, por tal motivo está conectado a un compresor que suministra una presión de 55 psi para obtener la velocidad de impacto requerida, que en este estudio fue de 30 m/seg. Por otra parte, se suministró el abrasivo (óxido de aluminio) de forma constante por la tolva de alimentación, y se almacena en el tubo succionador de abrasivo. La succión del abrasivo se debe al efecto que se crea por la diferencia de presiones que están presentes en el tubo Venturi al circular el aire a presión cuando se abre la conexión del aire comprimido. A partir de ello, se genera una mezcla de partículas abrasivas y aire a presión, que impactan en las probetas metálicas por medio de la boquilla que se encuentra colocada a una distancia de $10 \pm 2 \text{ mm}$ separada de la probeta.

El tiempo total de la prueba fue de 3 minutos, en donde se erosionaron las muestras en intervalos de 1 min para así poder determinar la pérdida de masa de las probetas del acero AISI 4140 y del acero AISI 4140 borurado en función del tiempo de exposición. Se analizaron 3 ángulos de incidencia 30° , 60° , y 90° , para determinar los posibles mecanismos de desgaste en la superficie de las muestras.

El flujo de abrasivo del óxido de aluminio fue de 40 ± 2 g/min con una granulometría angular, la cual se puede observar en la Figura 3.5.

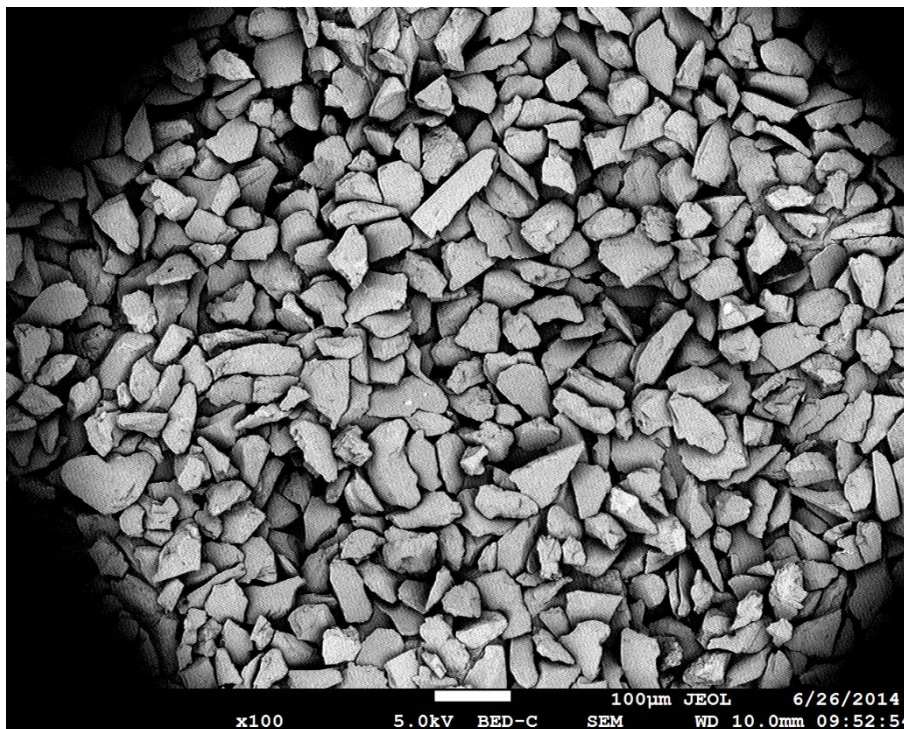


Figura 3.5 Fotomicrografía de SEM de la morfología de las partículas abrasivas del óxido de aluminio.

Los ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente se realizaron a una temperatura aproximada de 293 K. Para los ensayos de erosión por partícula sólida a alta temperatura se realizaron a una temperatura de 673 K. El pesaje de las probetas se realizó antes y después del ensayo de erosión por partícula sólida, utilizando una balanza analítica (con una precisión de ± 0.0001 g), el intervalo de la prueba fue de 3 minutos. Cabe mencionar que para los ensayos de erosión a una temperatura de 673 K se tiene que encender el control de la cámara de erosión y del tablero de control del tubo calentador de aire (Figura 3.4) hasta que alcancen la temperatura de 673 K para realizar los ensayos de erosión.

Después de los ensayos de erosión, se empleó el microscopio electrónico de barrido de alta resolución QUANTA 3D FEG empleando una corriente de 15 KV con alto vacío (Figura 3.6) para obtener las fotomicrografías de las huellas del daño

generado por el desgaste erosivo a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K y de esta forma, determinar los posibles mecanismos de desgaste desarrollados bajo los ángulos antes mencionados.



Figura 3.6. Equipo de Microscopía electrónica de barrido QUANTA 3D FEG, Propiedad del Centro de Nanociencias y Micro Nanotecnologías del I.P.N.

Por último, se empleó un perfilómetro mecánico marca Veeco, modelo DEKTAK 150 (Figura 3.7), para obtener la profundidad y ancho de las huellas generadas por el desgaste erosivo a temperatura ambiente y a alta temperatura en los diferentes ángulos sobre las probetas del acero AISI 4140 y del acero AISI 4140 borurado.



Figura 3.7. Rugosímetro mecánico marca Veeco, modelo DEKTAK 150, equipo que pertenece al Centro de Nanociencias y Micro Nanotecnologías del I.P.N.

CAPÍTULO IV

Resultados y discusiones

Los resultados y discusiones propuestos en este Capítulo comprenden la morfología de la capa Fe_2B formada durante el tratamiento termoquímico de borurización en un acero AISI 4140, la caracterización físico-química de la capa Fe_2B , formada durante el tratamiento termoquímico de borurización en un acero AISI 4140, el ensayo de indentación instrumentada Berkovich, los ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y los ensayos de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K

4.1 Morfología de la capa Fe_2B formada durante el tratamiento termoquímico de borurización en un acero AISI 4140.

La morfología de la capa Fe_2B en el acero AISI 4140 borurado, mostrada en la Figura 4.1, es de característica aserrada en la interfase de crecimiento Fe_2B /substrato. La aserración es producida por la alta anisotropía de crecimiento de las capas, donde el crecimiento preferencial se desarrolla sobre la dirección cristalográfica (0,0,1). En un estudio realizado por Martini *et al*, (2004), explican que el crecimiento aserrado de las capas boruradas, es consecuencia de un campo de esfuerzos muy localizado y elevado en las puntas de los núcleos del boruro, cuyo crecimiento es acicular, provocando, igualmente altas distorsiones de la red cristalina del boruro. Asimismo, conforme el potencial de boro se incrementa sobre la superficie del material sometido a borurización, la aserración es mucho más pronunciada en la interfase de crecimiento Fe_2B /substrato. El aumento de potencial del boro, permite la presencia de compuestos intersticiales ricos en boro, que puede producir la presencia de la capa FeB . Sin embargo, para aplicaciones industriales la presencia de un sistema FeB/Fe_2B no es deseable, por el incremento de esfuerzos residuales en la interfase entre estos dos compuestos, provocando que la capa borurada reduzca su adhesión con el substrato por contacto mecánico. (Martini *et al*, 2004)

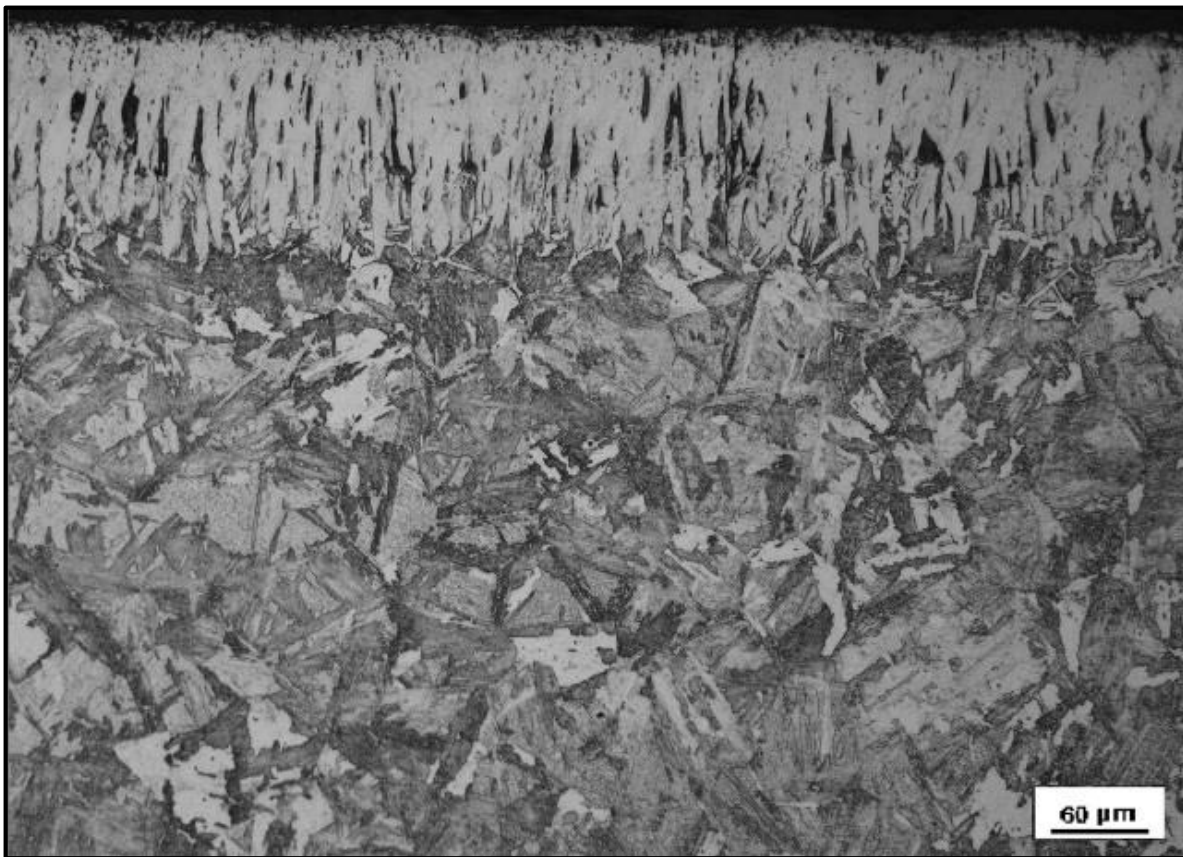


Figura 4.1 Fotomicrografía típica de la sección transversal de un acero AISI 4140 endurecido por difusión de boro a una temperatura de 1223 K con 6 horas de exposición, con la presencia de la fase Fe_2B .

4.2 Caracterización físico-química de la capa Fe_2B , formada durante el tratamiento termoquímico de borurización en un acero AISI 4140.

La caracterización físico-química de la capa Fe_2B sobre la superficie del acero AISI 4140 borurado se llevó a cabo por la técnica de difracción de rayos X, donde se verificó la presencia de la capa Fe_2B mediante el espectro resultante de XRD mostrado en la Figura 4.2. La formación de la capa de boruro de hierro es controlado por la difusión de boro en la superficie del acero en el cual, la velocidad de crecimiento y la composición de la capa borurada es determinada a través de la actividad del boro en la superficie del acero AISI 4140, la temperatura del proceso de borurización y la composición química del substrato (Bravo, 2014).

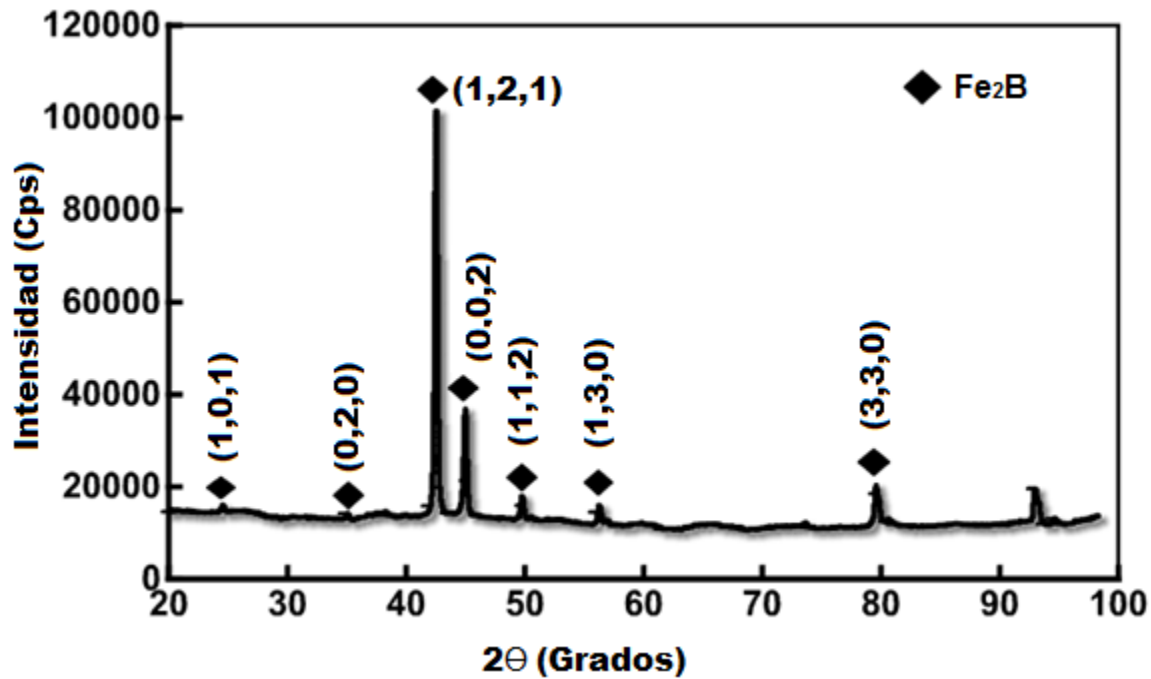


Figura 4.2 Patrón resultante del ensayo de difracción de rayos X del acero AISI 4140 borurado a una temperatura de 1223 K durante 6 h de exposición.

4.3 Ensayo de indentación instrumentada Berkovich.

4.3.1 Determinación de los gradientes de dureza en la capa borurada Fe₂B.

La Figura 4.3 muestra los valores de dureza obtenidos por los ensayos de indentación instrumentada. La dureza característica de los boruros de hierro formados en la superficie del acero AISI 4140 borurado es considerablemente mayor que la dureza del substrato debido a la presencia de la fase Fe₂B (18 GPa). La diferencia en el valor de la dureza se atribuye a la presencia de la fase Fe₂B la cual fue confirmada por la técnica de difracción de rayos X (XRD), mostrada en la Figura 4.2.

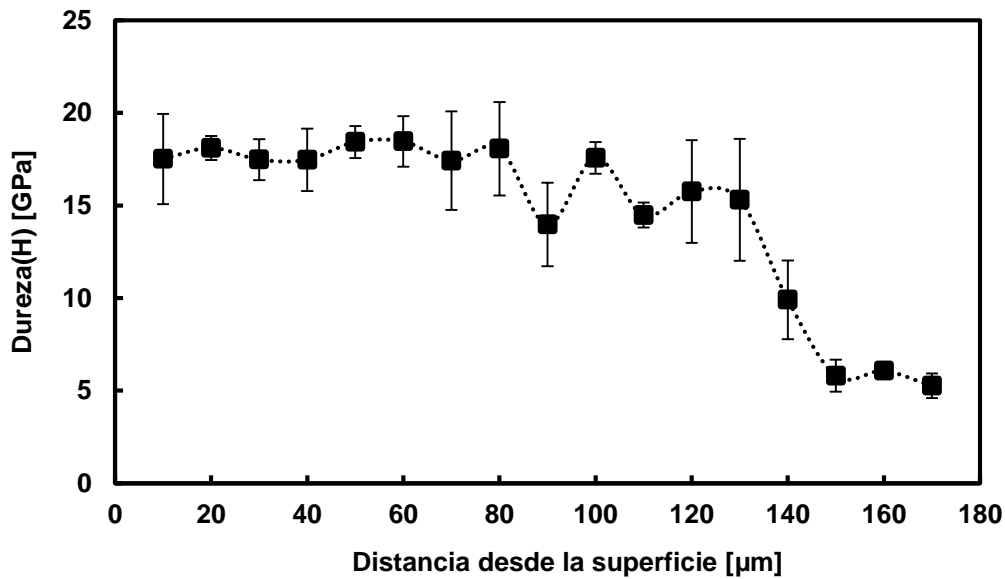


Figura 4.3 Perfil de nanodureza obtenido a una carga constante de 100 mN sobre el acero AISI 4140 boruado a la temperatura de 1223 K con 6 horas de exposición.

4.3.2 Definición de la razón H/E.

La Figura 4.4 muestra la relación de las propiedades evaluadas de dureza (H) y módulo de elasticidad (E), que define el índice de plasticidad a lo largo de la capa borurada Fe_2B .

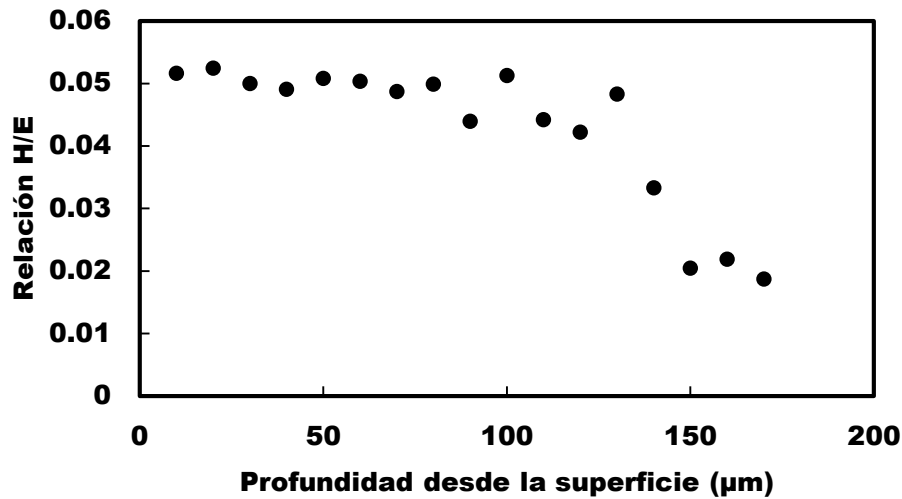


Figura 4.4 Comportamiento del índice de plasticidad (H/E) obtenido a una carga de 100 mN a lo largo de la fase Fe_2B formada en la superficie del acero AISI 4140 borurado a la temperatura de 1223 K con 6 horas de exposición.

El valor de índice de plasticidad (H/E), para la capa borurada Fe_2B se establece en un rango de 0.020-0.051, y decrementa su valor a lo largo del espesor de la capa a 150 μm de distancia desde la superficie del acero borurado. En un estudio realizado por Krella (2011) citado por Bravo (2014), estima el valor de índice de plasticidad (H/E) para recubrimientos tipo TiN y CrN, depositados sobre un acero inoxidable tipo X6CrNiTi18-10; los cuales se muestran en la Tabla 4.1. Así mismo, se comparan los resultados obtenidos del presente trabajo, con los valores obtenidos por Chávez (2012), de un acero AISI D2 borurado; donde se observan valores muy cercanos de la razón (H/E) para boruros de hierro tipo Fe_2B .

Tabla 4.1 Valores del índice de plasticidad (H/E) obtenidos para diferentes recubrimientos aplicados en diversos aceros.

Aleación	X6CrNiTi18-10		X6CrNiTi18-10		AISI D2		AISI 4140
Recubrimiento	TiN	TiN500	CrN200	CrN500	FeB	Fe ₂ B	Fe ₂ B
(H/E)	0.078	0.049	0.080	0.067	0.066- 0.048	0.0470.- 0.022	0.051-0.020

Fox-Rbinovich *et al.* (2004) citado por Bravo (2014), determina que la relación (H/E) es de gran utilidad para caracterizar el desgaste de un material, por ejemplo: para una aleación AlTiN con un recubrimiento formado por la técnica de PVD, una relación mayor de (H/E) representa menor tiempo de servicio durante operaciones de taladrado para desgaste adhesivo. Por lo que, la presencia de una sola fase (Fe₂B), debe garantizar un mayor tiempo de servicio para aplicaciones de desgaste adhesivo.

4.3.3 Estimación de los esfuerzos residuales en la fase Fe₂B.

Teniendo en cuenta los valores del módulo de Young en la capa de boruro obtenido por indentación instrumentada Berkovich, una estimación de los esfuerzos residuales térmicos (σ_{th}) pueden ser obtenidos a partir de la siguiente expresión basada en el estudio de Lyakhovich, (1973) citado por Chávez (2012):

$$\sigma_{th} = \hat{E} \left[\frac{\int_{h_2}^{h_1} \alpha_i \square T E_i dh_i}{\int_0^{h_r} E dh_i} - \alpha_{ii} \square T \right] \quad (4.1)$$

donde $\left(\hat{E}\right)$ es el valor teórico del módulo de Young en la capa Fe_2B a temperatura de 293-573 K, $\left(E_i\right)$ representa el valor teórico del módulo de Young en la capa i-th correspondiente a la temperatura de 293-573 K, $\left(E_i\right)$ es el valor del módulo de Young obtenido por indentación Berkovich a lo largo de la capa borurada y del sustrato, $\left(\alpha_i\right)$ y $\left(\alpha_{ii}\right)$ son los coeficientes de expansión térmicos de la capa borurada y del sustrato, $\left(h_r\right)$ promedio del espesor de capa borurada Fe_2B y $\left(h_i\right)$ es el espesor de capa i-th donde la indentación fue desarrollada. La tendencia general de los esfuerzos residuales se puede obtener mediante la ecuación (4.1) en la fase Fe_2B . Además, la Figura 4.5 muestra el comportamiento de los esfuerzos residuales térmicos en la fase Fe_2B a la temperatura de 1223 K con 6 horas de exposición.

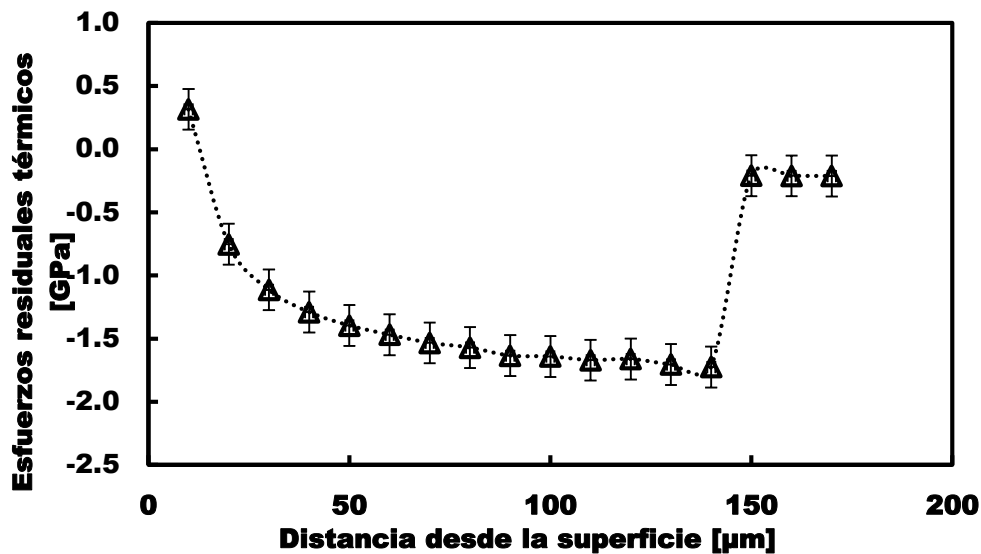


Figura 4.5 Comportamiento de los esfuerzos residuales del acero AISI 4140 borurado a la temperatura de 1223 K con 6 horas de exposición.

Los esfuerzos residuales compresivos en la fase Fe₂B se encuentran en un rango de 0.75 a 1.72 GPa. La presencia de esfuerzos residuales compresivos en la capa borurada Fe₂B es beneficioso, ya que aumenta la capacidad para soportar cargas de tensión estáticas. (Bravo, 2014)

4.4 Ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente.

Las Figuras 4.6 y 4.7 representan la pérdida de masa del acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado contra el tiempo del ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente, a los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90°.

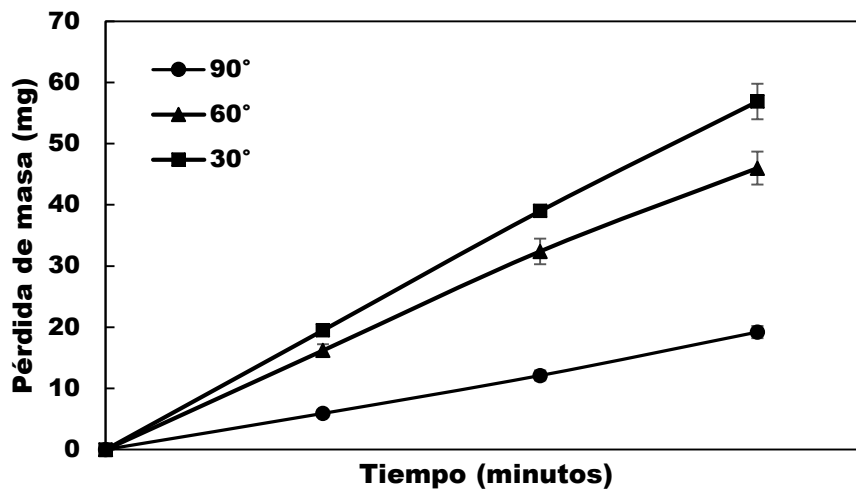


Figura 4.6 Pérdida de masa del acero AISI 4140 sometido al ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente.

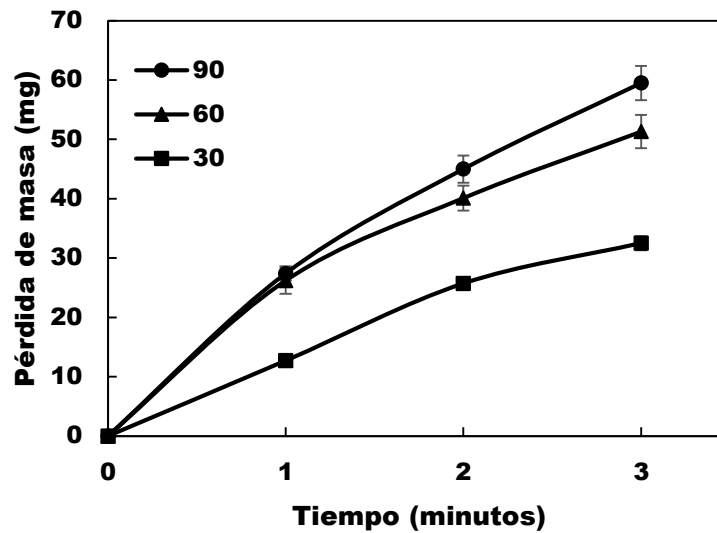


Figura 4.7 Pérdida de masa del acero AISI 4140 borurado sometido al ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente.

Se puede observar de la Figura 4.6 que para el acero AISI 4140, el ángulo de 30° represento la mayor cantidad de pérdida de masa debido a que el material tiene un comportamiento dúctil. Mientras que en la Figura 4.7, para un acero AISI 4140 borurado, el ángulo de 90° representó la mayor cantidad de perdida masa en el acero debido a que el material superficialmente tiene un comportamiento frágil.

En el desgaste de erosión por partícula sólida se distinguen dos tipos de comportamiento: dúctil y frágil. En el primero, el material es removido por un efecto de corte y arado, mientras que en el segundo, es desplazado por la formación de grietas o fracturas. Ambos tienen una marcada dependencia con el ángulo de impacto. Si la deformación plástica domina, entonces la erosión máxima sucede a un ángulo pequeño (erosión dúctil). Por el contrario, si la erosión máxima sucede a un ángulo alto, se considera que es ocasionado por fractura frágil. (Hutchings, 1992). Esta tendencia se observa con frecuencia en los resultados presentados por Hutchings (1992), para clasificar los materiales, como se muestra en la Figura 4.8.

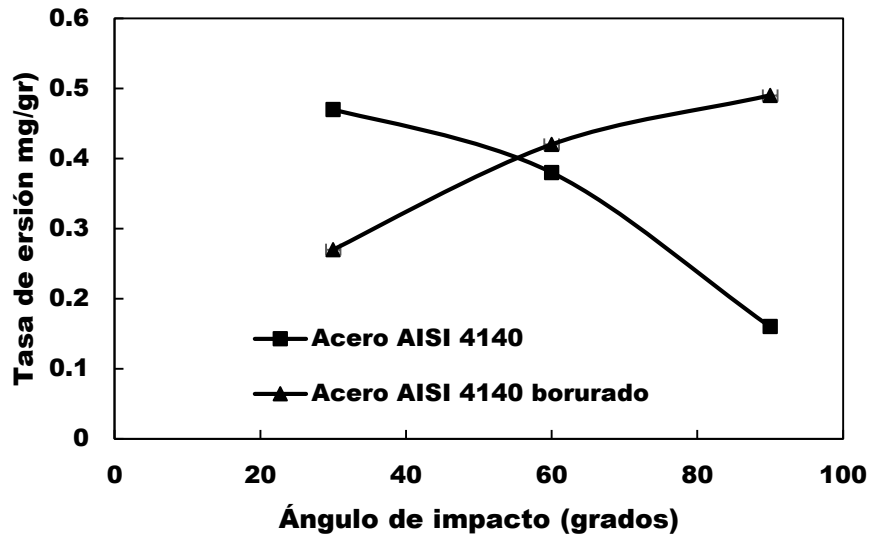


Figura 4.8 Dependencia típica del desgaste erosivo a temperatura ambiente de un acero AISI 4140 y acero AISI 4140 borurado con respecto al ángulo de impacto de la partícula incidente.

De los resultados del ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente obtenidos del presente trabajo en un acero AISI 4140, se observó que para el ángulo de 30°, presenta, un mayor desgaste erosivo comparado con el ángulo de 90°, esto se asume debido a que la ductilidad del material absorbe gran parte de la energía cinética de la partícula sólida, al impactar la superficie. Por otro lado para el acero AISI 4140 borurado, se tiene que para el ángulo de 90°, el desgaste erosivo es mayor comparado con el ángulo de 30°, esto se asume debido a que al tener una mayor dureza se disminuyen los valores de tenacidad a la fractura, por lo que el acero empezara a fragilizarse.

En las Figuras 4.9 y 4.10 se muestran las profundidades de las huellas generadas por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente para un acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado respectivamente. Los resultados muestran que la mayor profundidad de la huella generada por el desgaste erosivo, se observa en el ángulo de 30° para el acero AISI 4140, debido a que tiene un comportamiento dúctil,

a diferencia del acero AISI 4140 borurado donde la máxima profundidad de la huella se presenta al ángulo de 90° dado a que tiene un comportamiento frágil.

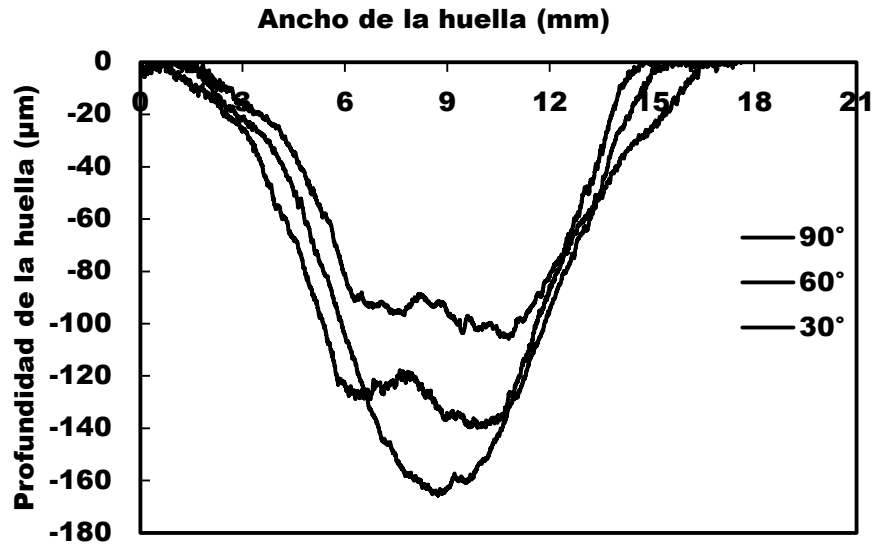


Figura 4.9 Profundidad de las huellas generadas por el desgaste erosivo por partícula sólida a temperatura ambiente para un acero AISI 4140 a ángulos de impacto de 90°, 60° y 30°.

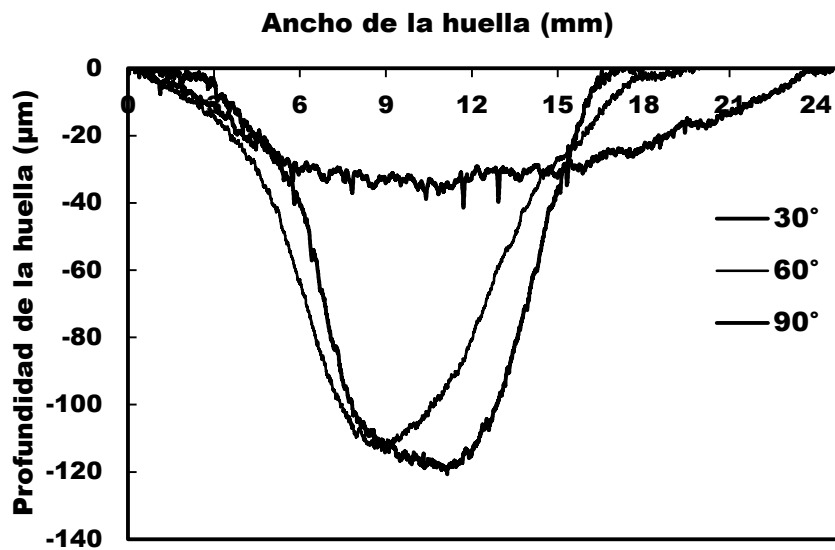


Figura 4.10 Profundidad de las huellas generadas por el desgaste erosivo por partícula sólida a temperatura ambiente para un acero AISI 4140 borurado a ángulos de impacto de 90°, 60° y 30°.

De los resultados obtenidos de las huellas generados por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente en un acero AISI 4140, se observa que el ángulo de 30° presenta una mayor profundidad de desgaste, comparado con el de 90° , debido a que la fuerza cortante en este ángulo es mayor, además de presentarse corte y arado, provocando una mayor pérdida de masa del material. Por otro lado, aunque un material sea dúctil, después de estar sometido a múltiples impactos, puede sufrir cambios estructurales (endurecimiento por deformación), que lo llevan a comportarse como un material frágil. Para el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente en un acero AISI 4140 borurado, en el ángulo de 90° se presenta la mayor profundidad de desgaste, en comparación con el de 30° , debido a que el impacto de partículas sólidas contra el material causan micro-grietas superficiales, las cuales crecen hasta juntarse en pequeños grupos de fallas, provocando el desprendimiento del material en forma de lascas, obteniéndose una mayor pérdida de masa.

4.5 Ensayos de erosión por partícula sólida a una temperatura de 673 K.

Las Figuras 4.6 y 4.7 representan la pérdida de masa del acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado contra el tiempo del ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K., a los ángulos de impacto de 30° , 60° y 90° .

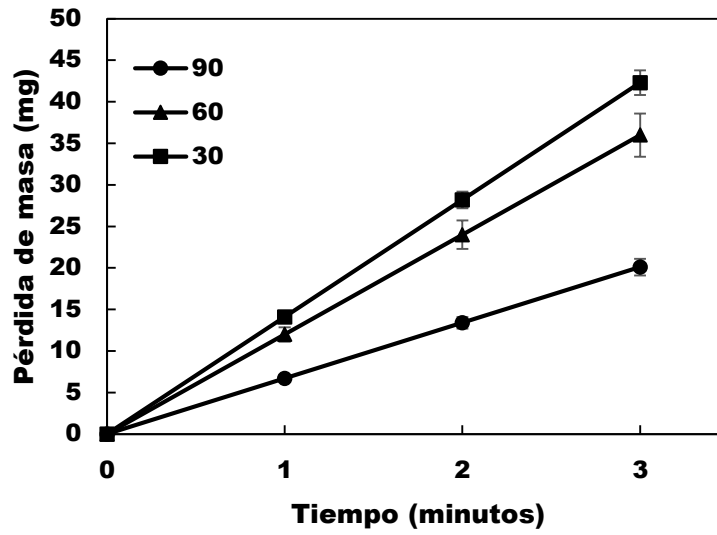


Figura 4.17 Pérdida de masa del acero AISI 4140 sometido al ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K.

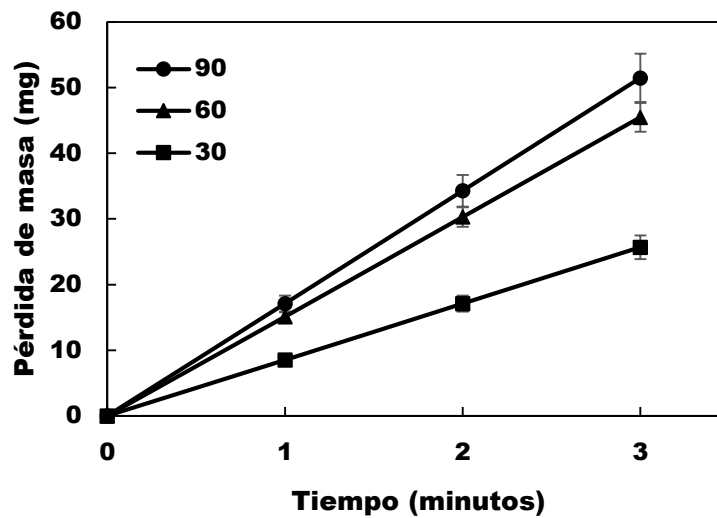


Figura 4.18 Pérdida de masa del acero AISI 4140 borurado sometido al ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K.

En la Figura 4.19 se muestra la dependencia típica del desgaste erosivo por partícula sólida a la temperatura de 673 K con respecto al ángulo de impacto para un acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado.

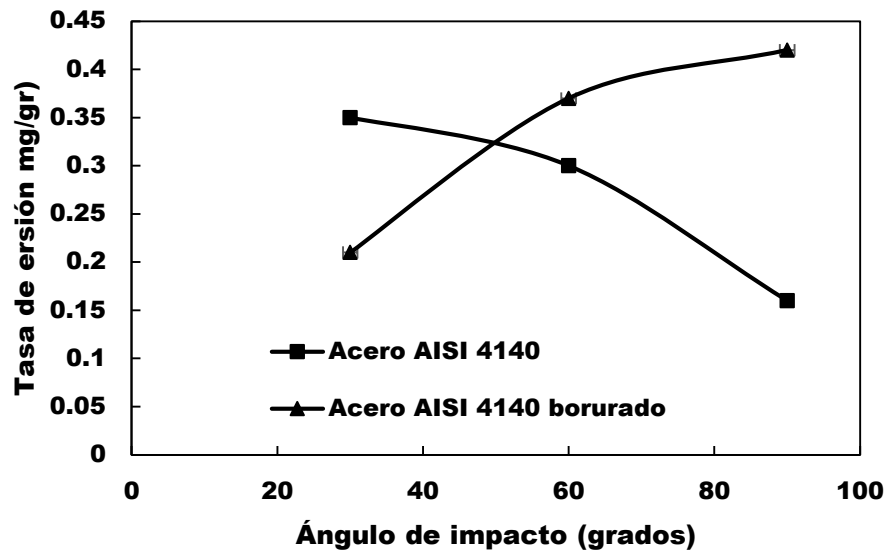


Figura 4.19 Dependencia típica del desgaste erosivo por partícula sólida a la temperatura de 673 K con respecto al ángulo de impacto de la partícula incidente para un acero AISI 4140 y un acero AISI 4140 borurado.

En las Figuras 4.20 y 4.21 se muestran las profundidades de las huellas generadas por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K sobre el acero AISI 4140 y el acero AISI 4140 borurado respectivamente.

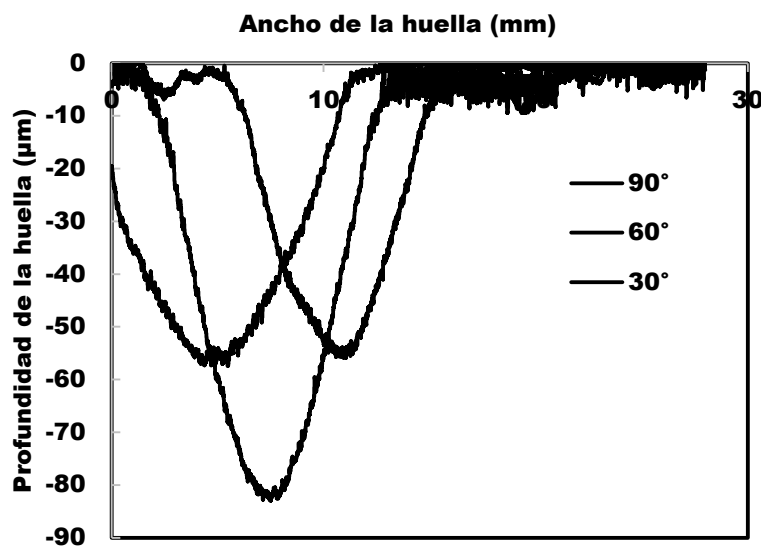


Figura 4.20 Profundidad de las huellas generadas por el desgaste erosivo por partícula sólida a la temperatura de 673 K para un acero AISI 4140 a ángulos de impacto de 90°, 60° y 30°.

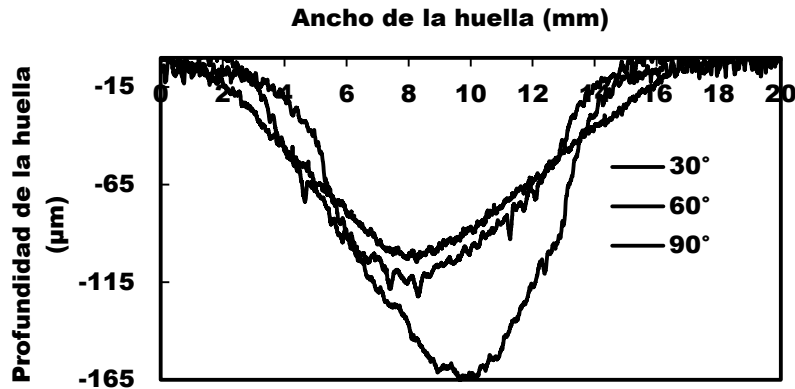


Figura 4.21 Profundidad de las huellas generadas por el desgaste erosivo por partícula sólida a la temperatura de 673 K para un acero AISI 4140 borurado a ángulos de impacto de 90°, 60° y 30°.

Para el caso de las huellas generadas para los ensayos de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K, se presentó un pequeño decremento en la tasa de erosión en el acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado en comparación con los ensayos realizados a temperatura ambiente.

Comparando el ángulo de 60° en el acero AISI 4140 a ambas temperaturas de la prueba de erosión, hubo una disminución de la tasa de erosión del 12% en la temperatura de 673 K y para el ángulo de 30°, se observó un decremento en el valor de la tasa de erosión del 25% en la temperatura de 673 K. De igual forma, para el acero AISI 4140 borurado y considerando las temperaturas empleadas para el ensayo de erosión, para el ángulo de impacto de 90°, la disminución de la tasa de erosión fue del 15% en la temperatura de 673K. Para el caso de los ensayos de erosión realizados a un ángulo de impacto de 60° se tiene un decremento del 11% en la tasa de erosión y en el ángulo de 30° se tienen una disminución del 25% en la tasa de erosión.

4.6 Mecanismos de desgaste generados en los ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K.

En las Figuras 4.22, 4.23, 4.24 y 4.25 se muestran algunos de los mecanismos de desgaste generados por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K para los ángulos de impacto de 30° y 90° donde se presenta la mayor pérdida de masa. Las microfotografías corresponden tanto para el acero AISI 4140 como para el acero AISI 4140 sometido al proceso de borurización. La secuencia completa de fotomicrografías se presenta en el Anexo C.

La Figura 4.22 y 4.23 muestra la huella generada por el desgaste erosivo por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K, respectivamente, para un acero AISI 4140 sometido a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar que hubo remoción de material por un mecanismo de corte y arado, picaduras (pitting) en algunas zonas del material, surcos y cráteres en la superficie de la muestra.

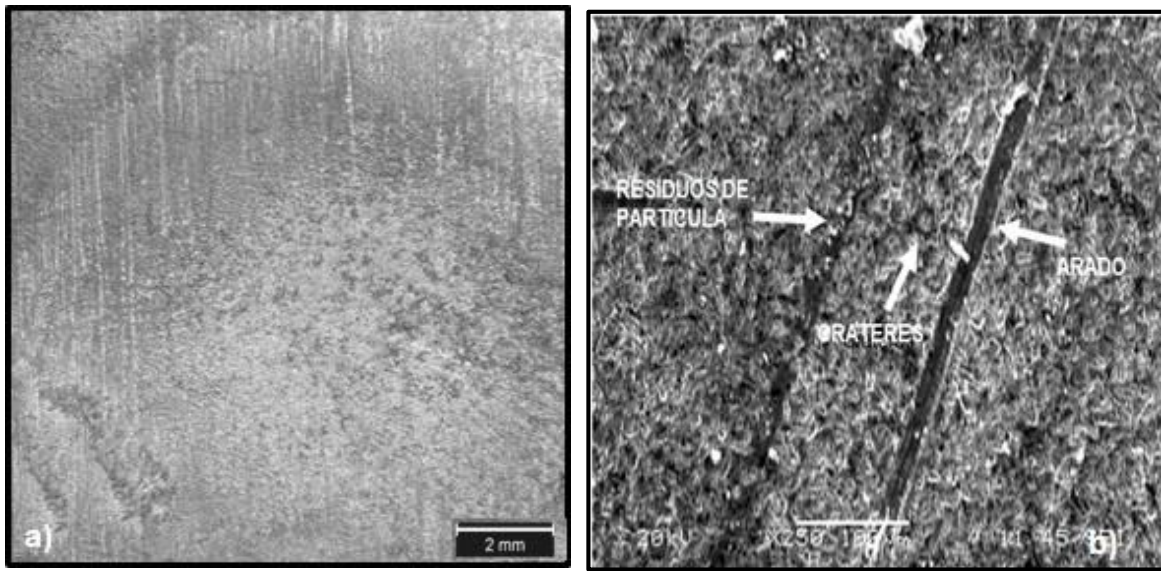


Figura 4.22 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 sometido a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140, expuesto a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar adhesión de partículas y residuos de las mismas, arado, formación de cráteres y remoción de material.

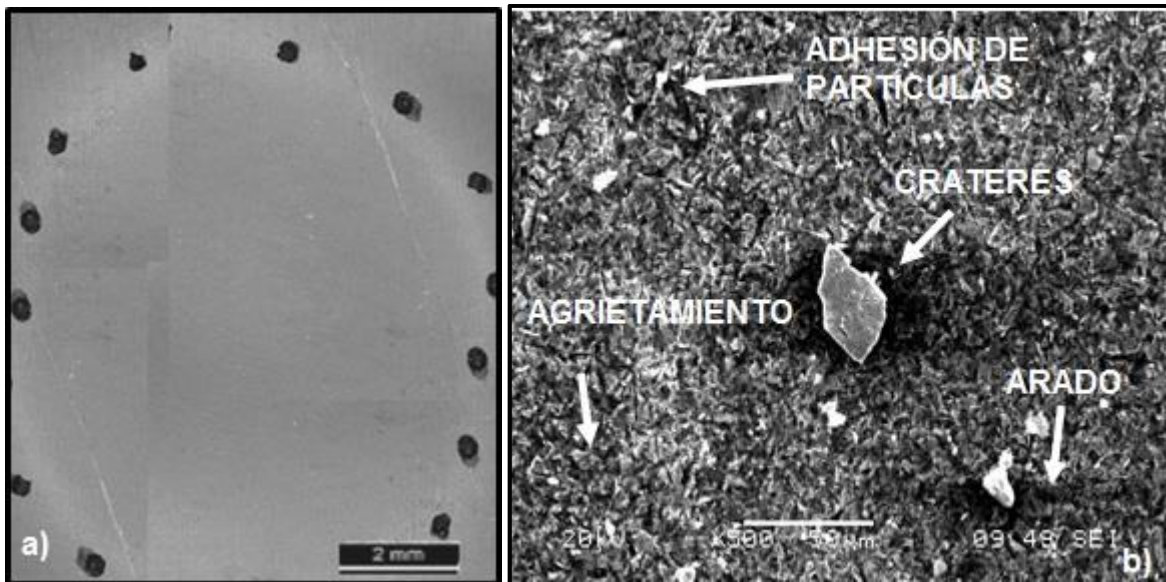


Figura 4.23 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 sometido a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 sometido a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar adhesión de partículas, arado, formación de cráteres y agrietamiento

Las Figuras 4.24 y 4.25 muestra la huella generada por el desgaste erosivo por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K, respectivamente, para un acero AISI 4140 borurado sometido a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar que hubo remoción de la capa borurada por un mecanismo de agrietamiento en algunas zonas del material. También se puede notar una adhesión de partículas y fractura de la capa borurada y agrietamiento.

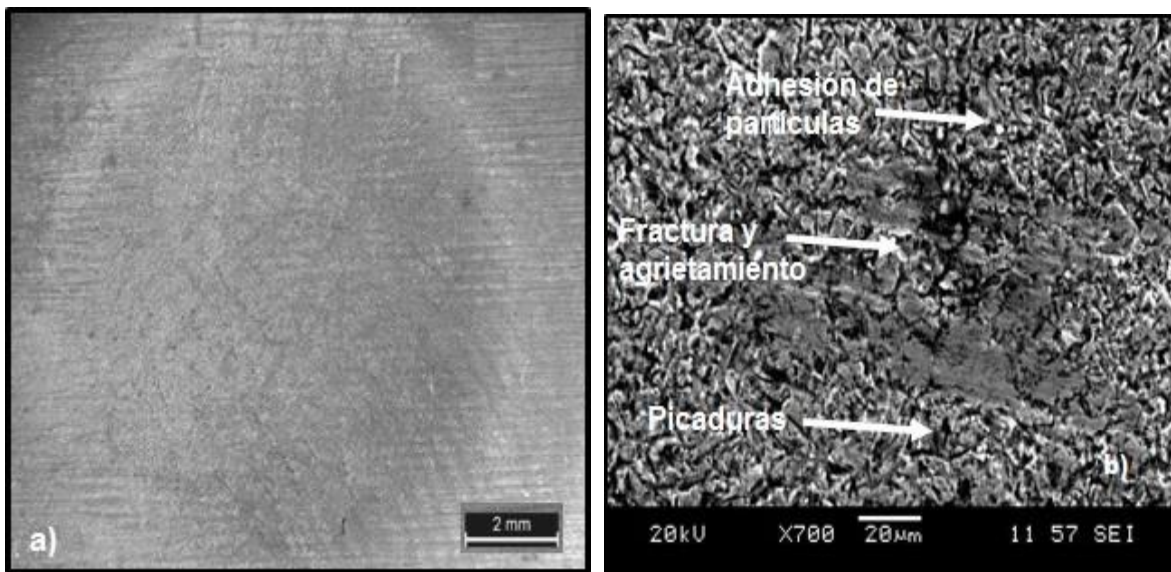


Figura 4.24 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 borurado sometido a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140 borurado, sometido a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar a) remoción de capa borurada, picaduras, c) fractura y agrietamiento de la capa borurada, adhesión de partículas y picaduras.

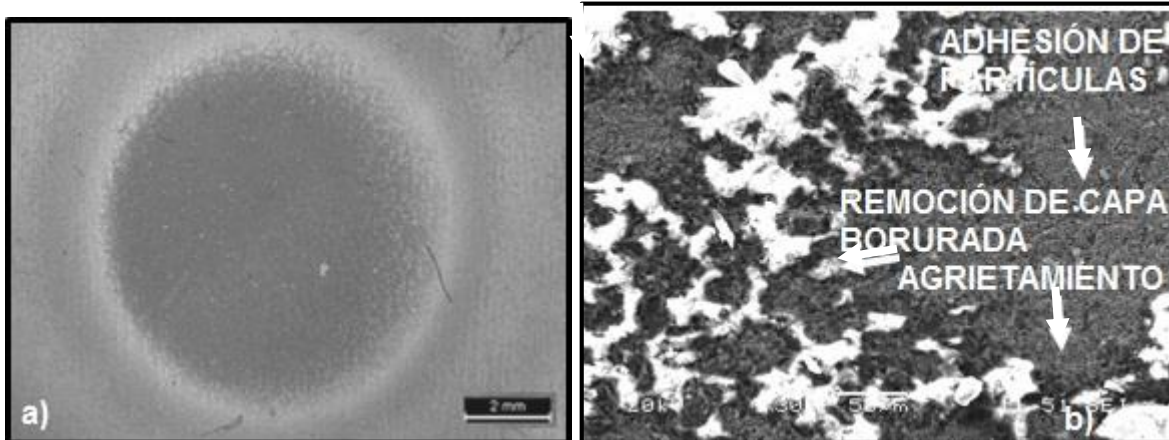


Figura 4.25 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado expuesto a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado, sometido a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar remoción de capa borurada, adhesión de partículas y agrietamiento.

Finalmente, en la Figura 4.26, se muestra la técnica de energía dispersiva por rayos X (EDS, por sus siglas en inglés) la cual presenta la adhesión de partículas de óxido de aluminio encontradas en los mecanismos de desgaste originados por las pruebas de erosión en la superficie de las muestras tanto boruradas como no boruradas.

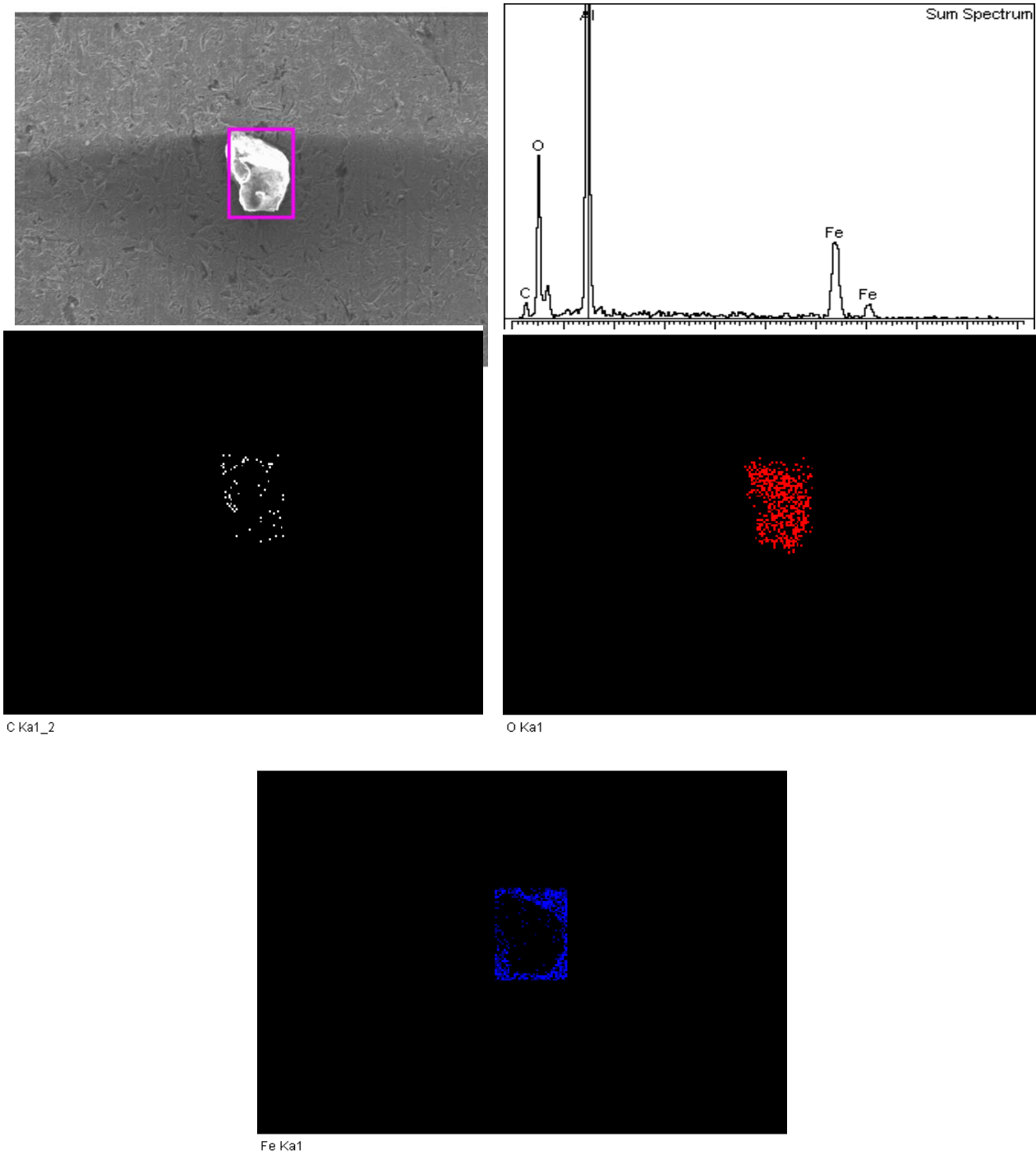


Figura 4.26 Técnica de EDS realizado a una partícula de óxido de aluminio adherida por el ensayo de erosión por partícula en un acero AISI 4140.

4.6 Comparativo de los resultados de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K del acero AISI 4140 borurado con respecto a otros trabajos de investigación.

En la Tabla 4.2 se presenta una recopilación de trabajos realizados por el ensayo de erosión por partícula sólida a alta temperatura y a temperatura ambiente sobre capas boruradas tipo Fe₂B.

Tabla 4.2 Resultados del ensayo de erosión por partícula solida a temperatura ambiente y a alta temperatura sobre la superficie de diferentes aceros borurados.

Material	Espesor de capa(μm)	Abrasivo	Tamaño partícula (μm)	Velocidad de impacto(m/s)	Angulo de impacto(°)	Temperatura del ensayo (K)	Tasa de erosión(mg /gr)	Autor
12%Cr	100	Óxido de hierro	100-150	380	30	773	0.004	Miyazaki and Kazuaki (2002)
12%Cr	65-70	Oxido de aluminio	100	200	30	813	0.005	Urm <i>et al</i> , (2006)
12%Cr	65-70	Oxido de aluminio	100	200	60	813	0.01	Urm <i>et al</i> , (2006)
12%Cr	65-70	Oxido de aluminio	100	200	90	813	0.018	Urm <i>et al</i> , (2006)
AISI 1055	200	Carburo de silicio	105	44	30	ambiente	0.0007	Hutchings <i>et al</i> (1989)
AISI 1055	200	Carburo de silicio	105	44	60	ambiente	0.0125	Hutchings <i>et al</i> (1989)

AISI 1055	200	Carburo de silicio	105	44	90	ambiente	0.02	Hutchings <i>et al</i> (1989)
C	68	Oxido de aluminio	100	210	30	811	0.50	Liu-xi <i>et al</i> (2015)
C	68	Oxido de aluminio	100	210	60	811	0.75	Liu-xi <i>et al</i> (2015)
C	68	Oxido de aluminio	100	210	90	811	0.65	Liu-xi <i>et al</i> (2015)
AISI 403	51	Cromita	75	304	90	811	0.50	Tabakoff <i>et al</i> (1988)
AISI 4140	150	Oxido de aluminio	60	30	30	ambiente	0.27	Presente estudio
AISI 4140	150	Oxido de aluminio	60	30	60	ambiente	0.42	Presente estudio
AISI 4140	150	Oxido de aluminio	60	30	90	ambiente	0.49	Presente estudio
AISI 4140	150	Oxido de aluminio	60	30	30	673	0.21	Presente estudio
AISI 4140	150	Oxido de aluminio	60	30	60	673	0.37	Presente estudio
AISI 4140	150	Oxido de aluminio	60	30	90	673	0.42	Presente estudio

En los trabajos de Miyazaki y Kazuaki, (2002) y de Urm *et al*, (2006), los valores estimados de la tasa de erosión bajan drásticamente comparados con el presente trabajo (los datos se encuentran en un rango de 0.01 a 0.05 mg/gr). Esto podría atribuirse al tipo y tamaño de abrasivo utilizado en los ensayos de erosión por partícula sólida, al tipo de material que ayuda a la resistencia del desgaste erosivo y al incremento de la velocidad y temperatura que se utilizaron en el ensayo de erosión.

Por otro lado, los valores estimados de la tasa de erosión, de los trabajos realizados por de Li-xi *et al*, (2015) y Tabakoff *et al*, (1988), en capas boruradas tipo Fe₂B, se observa que para los ángulos de 30°, 60° y 90°, el valor de la tasa de erosión es mayor, esto es debido al tamaño de la partícula utilizada y a la velocidad de impacto.

Finalmente comparando los valores estimados de la tasa de erosión a temperatura ambiente del trabajo de Hutchings *et al* (1989), se observa que las tasas de erosión son menores en comparación con los obtenidos en el presente trabajo, atribuyendo el efecto al tipo de abrasivo utilizado (SiC), ya que presenta una menor dureza que el boruro Fe₂B provocando menor pérdida de masa en la superficie del material borurado.

Conclusiones generales.

1. Se construyó una máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura, mediante la técnica de despliegue de funciones de calidad (QFD) y empleando la norma ASTM G76, obteniéndose una máquina funcional para estudiar el desgaste erosivo por partícula sólida en diferentes materiales ingenieriles.
2. De los resultados para los ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente, realizados en el acero AISI 4140 y sometido a un ángulo de impacto de 30° se obtiene la mayor tasa de erosión en comparación a los ángulos de 90° y 60° . Esto confirma que para materiales dúctiles y sometidos a erosión con ángulos de impacto pequeños (30°), la deformación plástica predomina y la erosión es máxima en la superficie del material. Los mecanismos de falla presentes posterior a las pruebas de erosión fueron de corte y arado.
3. Asimismo, en el acero AISI 4140 borurado, y sometido a las pruebas de erosión bajo un ángulo de impacto de 90° , se obtuvo la mayor tasa de erosión en comparación a los ángulos de 30° y 60° . La remoción de material se suscitó por la formación de grietas y fractura en forma predominante, característica de fallas de tipo frágil a ángulos de impacto altos (90°).
4. Para los ensayos de erosión por partícula sólida realizados a la temperatura de 673 K y a diferentes ángulos de impacto, los valores estimados de la tasa de erosión decrecieron (entre 12 y 15%) en comparación con los resultados obtenidos en los ensayos realizados a temperatura ambiente (considérese tanto el acero AISI 4140 y AISI 4140 borurado). En ambos materiales, los mecanismos de falla superficiales originados durante la prueba de erosión fueron similares a los obtenidos a temperatura ambiente.

Perspectivas de trabajo.

Realizar ensayos de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K utilizando la metodología propuesta en este trabajo para determinar el desgaste erosivo en sistemas FeB-Fe₂B formados en la superficie de diferentes aceros.

Realizar ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K, utilizando la metodología propuesta en este trabajo para determinar la resistencia al desgaste erosivo de diferentes tipos de recubrimientos tales como nitruros, carburos, boruros de níquel y boruros de cobalto formados en la superficie de diferentes aleaciones.

Realizar ensayos de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente y a la temperatura de 673 K utilizando la metodología propuesta en este trabajo para determinar la influencia del tamaño de partícula y el tipo de abrasivo en la resistencia a la erosión en diferentes sistemas capa-substrato.

Referencias bibliográficas.

ASTM G76 (1995), "Standard practice for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets", Philadelphia, 321–325.

Alwart S and Ulrich C (1998), "Abrasive Resistant Hard Steel Surfaces Produced by boriding", Industrial Heating; Career and Technical Education, 65-47.

Bravo D, 2014, Caracterización mecánica y estructural de una aleación Co-Cr-Mo ASTM F-75 endurecida superficialmente por difusión de boro. Tesis de Doctorado en Ingeniería Mecánica SEPI ESIME Zacatenco, México.

Hutchings I M (1992) "Tribology Friction and Wear of Engineering Material". Zate-Edward Arnold ,U.K.

Campos Silva I (2007), "Tratamientos térmicos de la A a la Z", Ed. Trillas, 204–209.

Campos-Silva I, Ortiz-Domínguez M, López-Perrusquia N, Meneses-Amador A, Escobar-Galindo R y Martínez-Trinidad J (2010), "Characterization of AISI 4140 borided steels", Appl. Surf. Sci., 256, 2372-2379.

Chávez E, 2012, Endurecimiento superficial de difusión de boro en un acero AISI D2: caracterización mecánica y cinética de crecimiento de compuestos FeB y Fe₂B, Tesis Maestría en Ingeniería Mecánica SEPI ESIME Zacatenco, México.

Chicot D and Mercier D, (2008), "Improvement in depth-sensing indentation to calculate the universal hardness on the entire loading curve", Mech. Mater., 40,171-182.

Czichos H (1986), "Introduction to friction and wear", Composite materials series, 1-23.

DIN 50320 (1997), "Analyse von verschleibvor-gangen, gliederung des verchleibgebietes, Berlin.

Huseyin C, Erdem A y Amir M (2014), "High temperature tribological behavior of borided surface based on the phase estructura of boride layer", Wear, 309, 152-158.

Miyazaki M y Ikeda K (2002), "Boronizing and solid particle erosion resistance of 12 % Cr heat treatment resistant steel" J. Soc. Mat. Sci., Japan, 51,412-417.

Urm K w, Lee S H, Lee J W y Lee E Y(2006), "The effects of surface treatment on solid particle erosion of 12 Cr steels for USC power plants",Solid state phenomena 118, 201-208.

Finnie I., Stevik G R, Ridgely S R, (1992), "The influence of Impingement angle on the erosion of Ductile metals by Angular abrasive Particles", Wear 152, 91-98.

Fichtl W (1981),"Boronizing and its practical applications", Matter. Eng.2, 276-286.

Gwidon W S (2005), "Wear: materials, mechanisms and practice, Wiley, 123-166.

Hernández-Sánchez E, Rodríguez-Castro G, Meneses-Amador A, Bravo-Bárceñas D, Arzate-Vazquez I, Martinez-Gutierrez H, Romero-Romo M, Campos-Silva I, (2013)," Effect of the anisotropic growth on the fracture toughness measurements obtained in the Fe₂B layer", Surf. Coat. Tech.237,292-298.

Hutchings I M (1992) "Tribology Friction and Wear of Engineering Material". Zate-Edward Arnold ,U.K.

Liu-Xi C,Jing-ru M,Shung-Sen W, Juan D and Zen-pin F(2014),"Experimental investigation on erosion resistance of iron boride coatings for steam turbines at high temperatures" J. Eng. Tribol., DOI: 10.1177/1350650114557105.

Martini C, Carbucicchio M and Palombarini G (2004), "Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron", J Mater Sci, 39, 933-937.

Matuschka A G V (1980), "Boronizing", Carl Hanser Verlag, Munich, FRG.

Jain Vipin and Sundararajan G (2002), "Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding", Surf Coat Tech, 149, 21-26.

Meng H C and Ludema K C (1995),"Wear models and predictive equations: their form and content, Wear, 181-183.

Miyazaki M y Ikeda K (2002), "Boronizing and solid particle erosion resistance of 12 % Cr heat treatment resistant steel" J. Soc. Mat. Sci., Japan, 51,412-417.

Ninham A J and Hutchings I M (1989), "Solid particle erosion of boronized", New York, 121-126.

Oliver W C and Pharr G M, (1992), "An Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", J. Mater. Res., 7, 1564-1583.

Oliver W C and Pharr G M, (2003), "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation; advances in understanding and refinements to methodology", J. Mater. Res., 19, 3-20.

Tabakoff W and Qureshi J I (1988), "The Influence of coating processes and process parameters on surface erosion resistance and substrate fatigue strength", Surf Coat Tech, 36, 433-444.

Rodríguez-Castro G, Campos-Silva I, Chávez-Gutiérrez E, Martínez-Trinidad J, Hernández-Sánchez E, Torres-Hernández A," Mechanical properties of FeB and Fe₂B layers estimated by Berkovich nanoindentation on tool borided steel", Surf. Coat. Tech.215, 291-299.

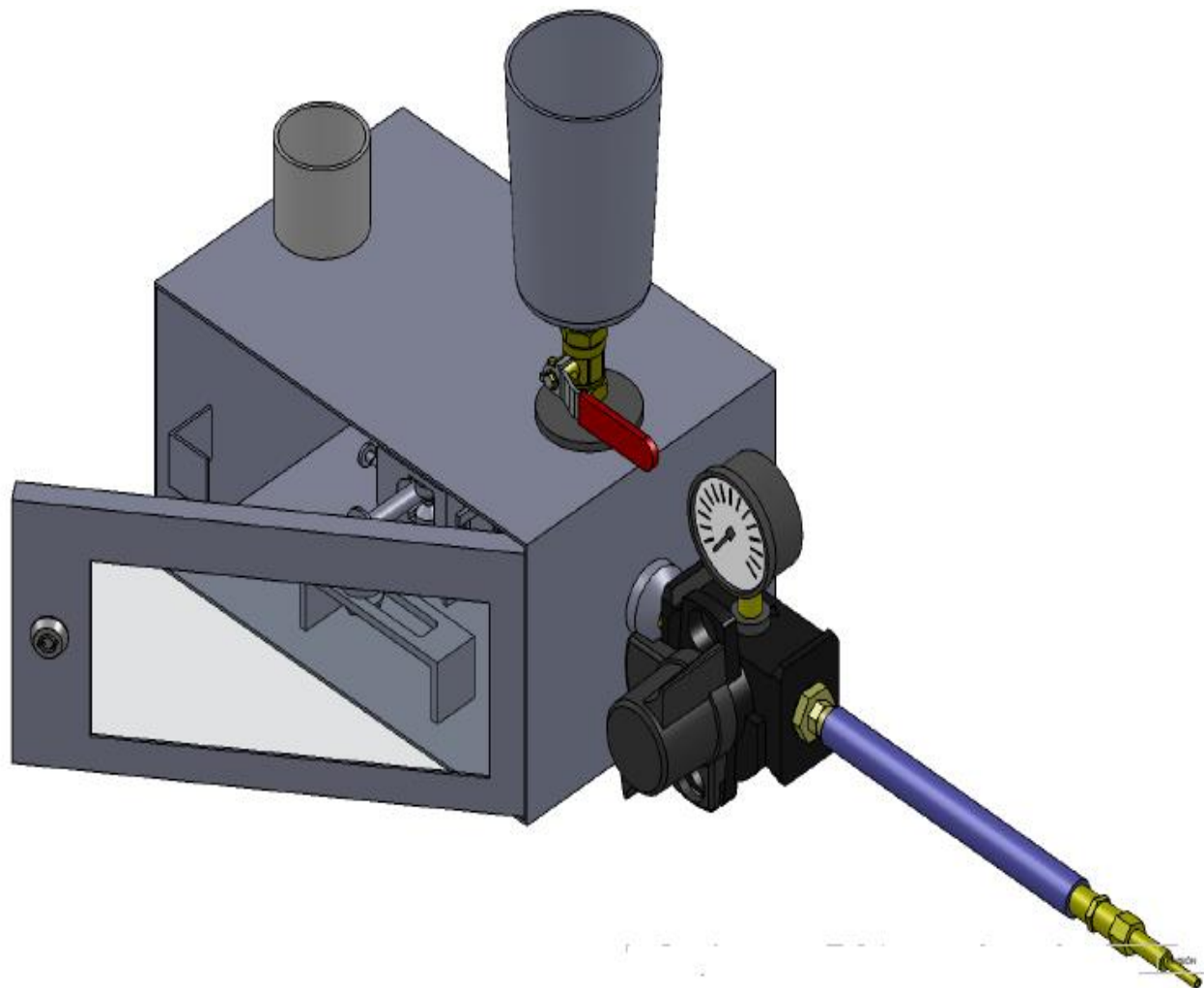
Ullman D G (2003), "The Mechanical Design Process", Ed. McGraw-Hill, 119–120.

Urm K w, Lee S H, Lee J W y Lee E Y(2006), "The effects of surface treatment on solid particle erosion of 12 Cr steels for USC power plants", Solid State Phenom 118, 201-208.

Zum Gahr K H (1987),"Microstructure and wear of materials", Wear 118, 97-108.

Anexo A.

Manual de operación para pruebas de desgaste erosivo por impacto de partícula sólida



PRUEBA DE DESGASTE EROSIVO POR IMPACTO DE PARTÍCULA SÓLIDA.

7. **Norma ASTM G76-95** Esta prueba esta estandarizada por la norma ASTM G76-95 “Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets”, donde se mencionan los parámetros y variables que afectan a este tipo de desgaste. (Véase Anexo 1 Norma ASTM G76-95).
8. **Aire comprimido** la manguera de aire comprimido se debe conectar a la tubería de conexión rápida que se encuentra instalada en el laboratorio de Ingeniería de Superficies. En este tipo de prueba se utilizan velocidades deseadas; para obtener una velocidad deseada se incrementa el flujo del aire comprimido con el regulador de presión y por medio de un anemómetro digital (Ver Anexo 2 Manual de operación del anemómetro digital) se verifica que sea la velocidad requerida.
9. **Regulador de presión** regule la presión de aire que inicialmente se encuentra cerrada, considere que en sentido horario de las manecillas del reloj se incrementa la presión.
10. **Flujo de partícula abrasiva** verifique que la válvula de flujo se encuentre totalmente cerrada. Para cerrar el flujo se baja la palanca de la válvula y para abrir el flujo se sube la palanca de la válvula Véase Figura 1. Para obtener el flujo deseado (gr/m), colocamos cierta cantidad partícula abrasiva (en este caso oxido de aluminio con un tamaño de grano de $50\mu\text{m}$) en la tolva de la máquina de erosión Véase Figura 1, se abre un poco la válvula de flujo y con la ayuda de un cronometro digital en un intervalo de 1 minuto se verifica el flujo de partícula, con la ayuda de una balanza digital se pesa la cantidad de partícula abrasiva que salió de la boquilla de la máquina de erosión hasta obtener el flujo constante deseado de partícula abrasiva.

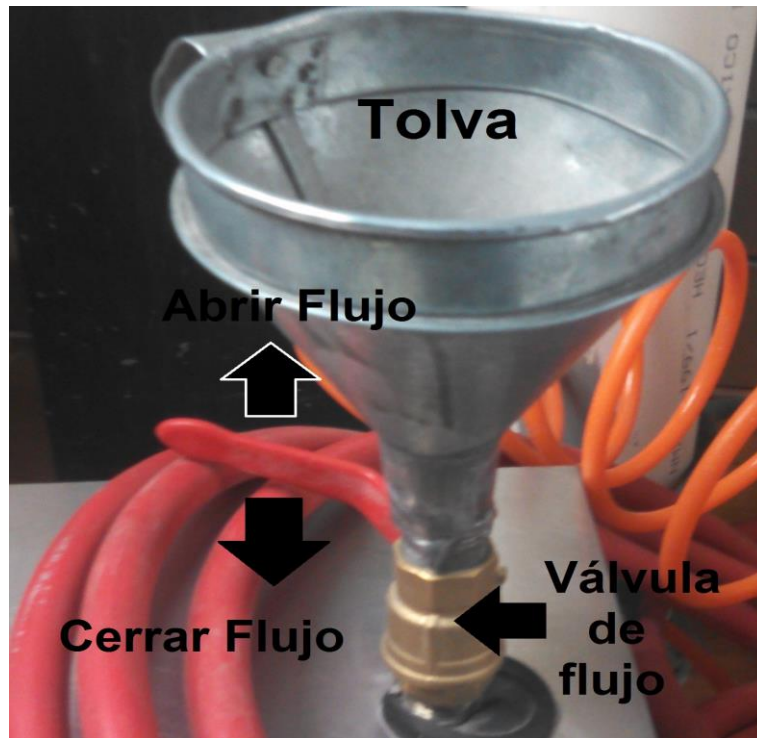


Figura A1. Válvula de flujo para la partícula abrasiva.

11. **Montaje de probeta** se coloca la probeta con dimensiones de 10x30x2 mm puede variar sus dimensiones mientras se reporte. La rugosidad superficial de las probetas no debe exceder a $Ra = 1 \mu\text{m}$. La colocación de la probeta se esquematiza en la Figura 2. El portaprobetas puede manejar ángulos variables de 30°, 60° y 90°, y será seleccionado cada ángulo dependiendo del objetivo de la prueba. La distancia entre la probeta y la boquilla se fija mediante el riel corredizo ubicado debajo del portaprobetas, la distancia establecida es de $10 \pm 1 \text{ mm}$ Véase Figura 3.

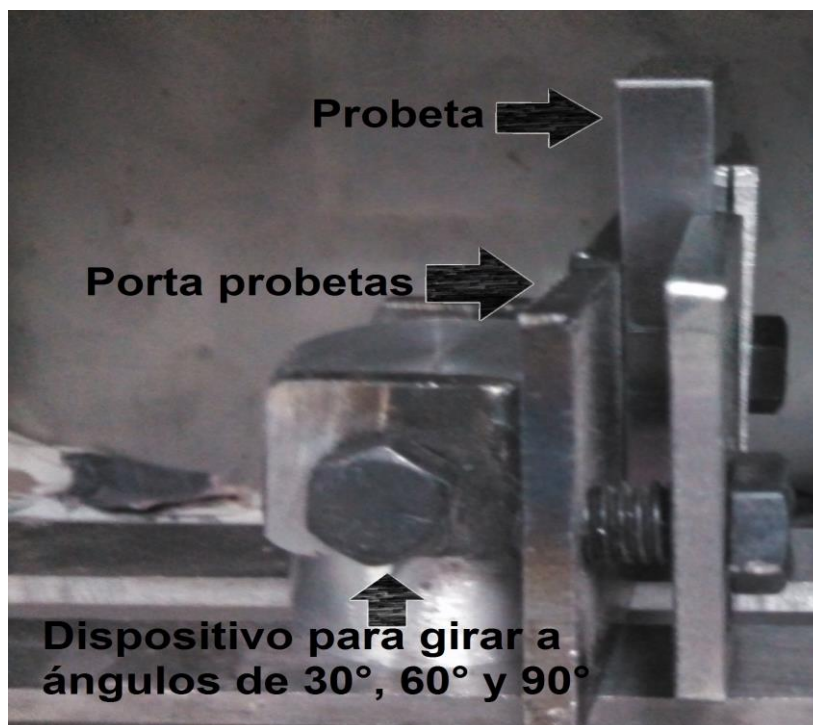


Figura A2. Dispositivo para sujeción de probetas y para girar a ángulos de 30°, 60° y 90°.

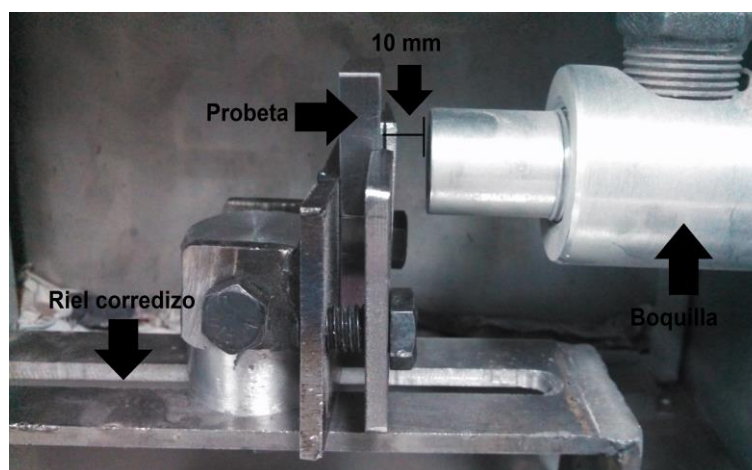


Figura A3. Distancia entre la boquilla y la probeta.

12. **Inicio de prueba** ya que se han calibrado los parámetros deseados se inicia la prueba, se abre el aire comprimido que genera una mezcla de partículas abrasivas y aire a presión que proyectan las probetas. Para el reporte de la prueba se llena el formato presentado en la Figura 4. El tiempo total del ensayo

de erosión es 10 minutos, erosionando las probetas en intervalos de 2 minutos. De esta forma se determina la pérdida de masa contra el tiempo de exposición. Las probetas se tienen que limpiar con acetona cada vez que se determine la pérdida de masa.

13. Por último, se emplea el microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido para obtener las micrografías del daño producido en la prueba y se determinan los posibles mecanismos de desgaste.

REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES PARA PRUEBAS DE DESGASTE EROSIVO POR PARTÍCULA SÓLIDA.

Tipo de ensayo: _____

Descripción del material: _____

Tratamiento térmico: _____

Dureza del material: _____

Comentarios:

Tiempo (m)	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Sumatoria	Promedio	Desv. Est.
	Masa Inicial (g)	Pérdida de masa (g)	Masa Inicial (g)	Pérdida de masa (g)	Masa Inicial (g)	Pérdida de masa (g)	Pérdida de masa(g)	Pérdida de masa(g)	Pérdida de masa(g)

Prueba realizada por: _____

Firma: _____

Fecha: _____

Figura A4. Formato para el reporte del ensayo de erosión por partícula sólida.

Anexo B

Manual de operación del anemómetro digital.




Funciones.

1. Medición de temperatura y velocidad
2. Selección de unidades de temperatura en °C/°F
3. Cinco unidades para medir la velocidad de aire en m/s. Km/h, ft/min, nudos y mph
4. Escala de Beaufort
5. Iluminación de la pantalla
6. Apagado del instrumento manual y automático
7. Indicador de viento frío
8. Indicador de batería baja

Pantalla

Operación

1. Para encender la unidad presione el botón “MODE” por dos segundos. En la pantalla aparecerá la velocidad del aire, temperatura y el icono de la batería.
2. Para ajustar la velocidad del aire y el modo de medición: presione el botón “MODE” durante tres segundos hasta que “m/s” empiece a parpadear. Presione el botón de “SET” para seleccionar las unidades de velocidad en que desea medir. Para confirmar las unidades deseadas presione el botón “MODE”.
3. Para configurar la unidad de temperatura: presionar el interruptor que se encuentra en la parte trasera de la unidad para la conversión de (°C/°F).
4. Iluminación de la pantalla: se activa por 12 segundos al presionar cualquier botón.
5. Para apagar la unidad: presione los botones “MODE”+“SET” al mismo tiempo.
6. Auto energía de apagado: la unidad se apagará automáticamente si no está realizando ninguna operación en 14 minutos.

7. Cambio de batería cuando el símbolo “  ” se muestra en la pantalla, por favor cambia la batería.

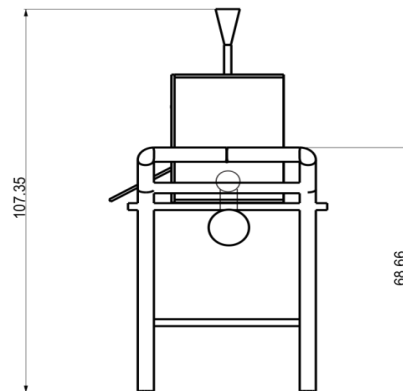
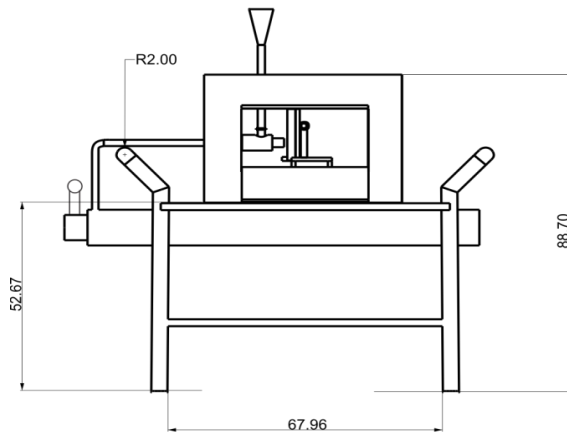
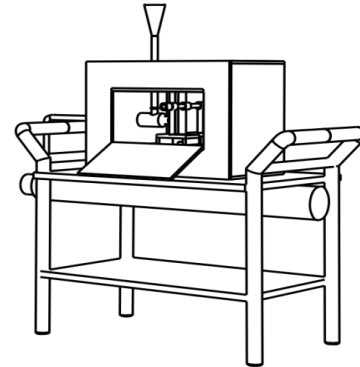
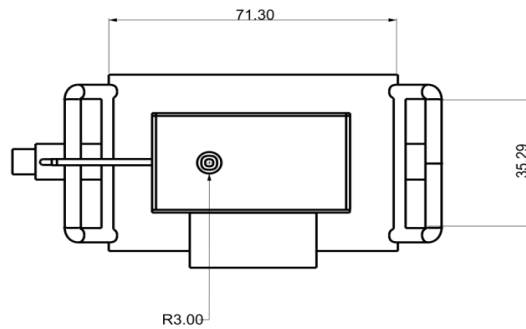
Especificaciones



Velocidad del aire				
Unidad	Rango	Resolución	Umbral	Precisión
m/s	0-30	0.1	0.1	±5%
Ft/min	0-5860	19	39	
nudos	0-55	0.2	0.1	
Km/hr	0-90	0.3	0.3	
Mph	0-65	0.2	0.2	
Temperatura				
Unidad	Rango	Resolución	Umbral	Precisión
°C	-10°C - +45°C	0.2	-	±2 °C
°F	14 °F-113 °F	0.36	-	±3.6 °F
Batería			CR2032 3.0 V	
Termómetro			NTC Termómetro	
Operación de temperatura			-10°C - +45°C(14 °F-113°F)	
Operación de humedad			Menos del 90%	
Consumo de corriente			Aproximadamente 3 mA	
Peso			52 g	
Dimensiones			40x18x105 mm	

Anexo C

Planos de la máquina de erosión por partícula sólida a alta temperatura.

N° DE ELEMENTO	NOMBRE DE LA PIEZA	MATERIAL
1	EMBUDO	ACERO AISI 304
2	MESA	ACERO AISI 304
3	TUBERIA	ACERO AISI 304



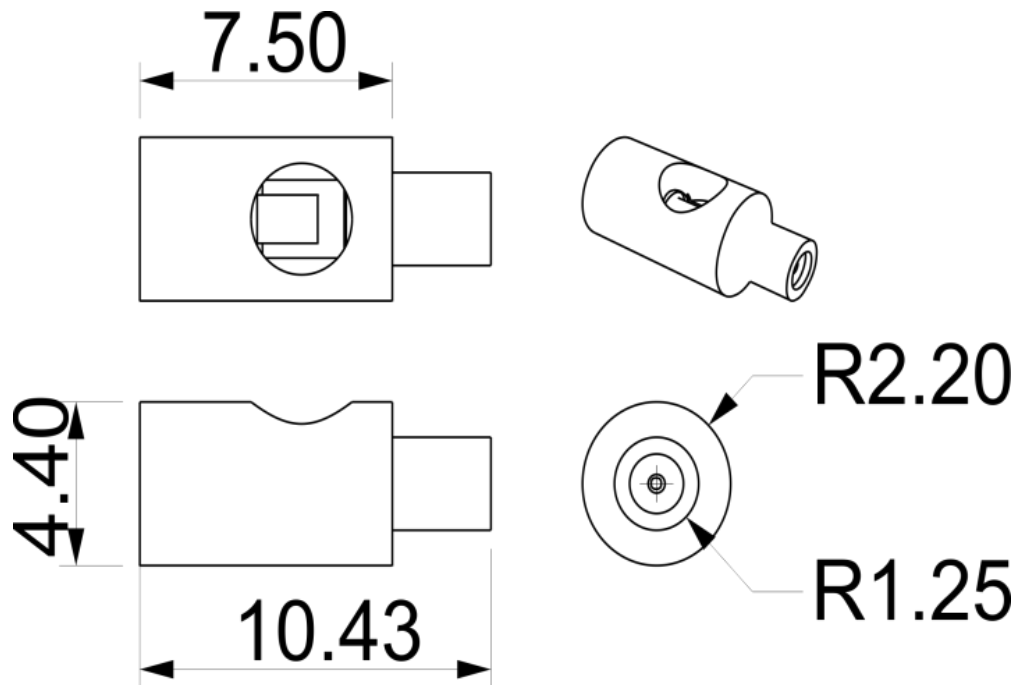
	<p>"DISEÑO PARA LA MANUFACTURA DE UNA MAQUINA DE ENSAYOS DE EROSION POR PARTICULAS SOLIDAS A UNA TEMPERATURA DE 673 K"</p>					
	ACOT. : mm		NOMBRE			TITULO :
	MATERIAL :		DIBUJO JOSE LUIS NAVA SANCHEZ			
			REVISOR DR.GERMAN A.RODRIGUEZ C.			ESCALA: 1:10
		COMENTARIOS:		REVISIÓN	HOJA	
				No. 3	01 de 01	



N° DE ELEMENTO

NOMBRE DE LA PIEZA

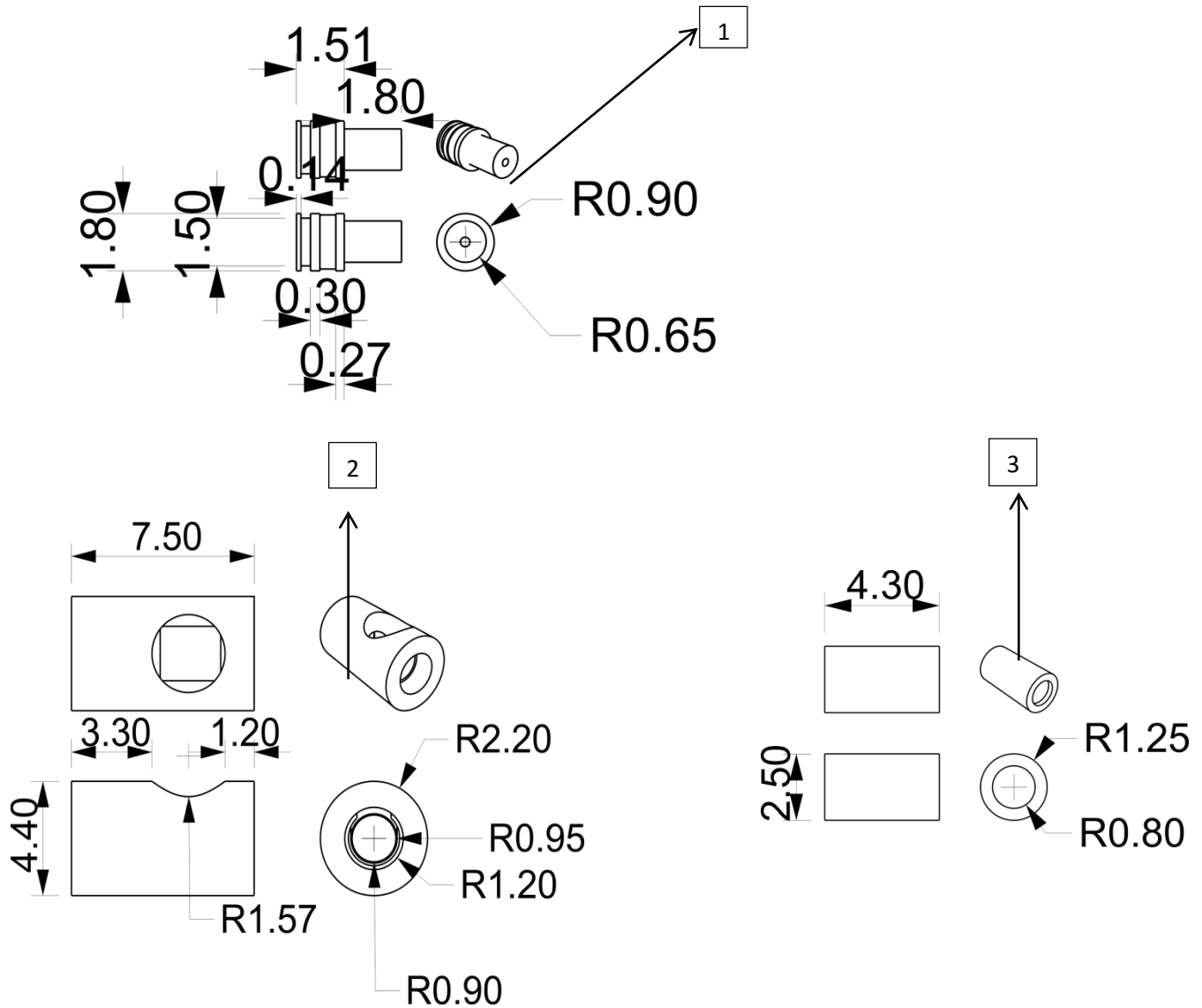
MATERIAL



1	VENTURI	ACERO AISI 304
2	CUERPO	ACERO AISI 304
3	BOQUILLA	ACERO AISI 304



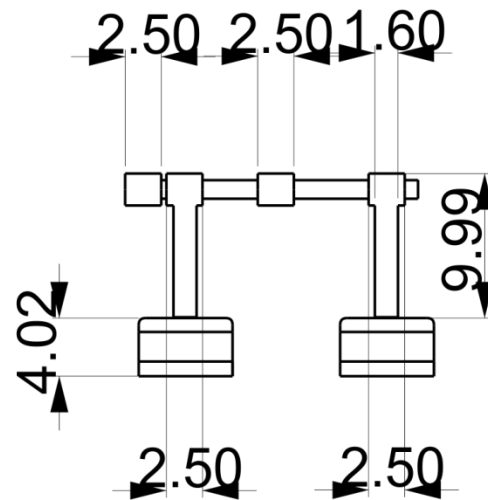
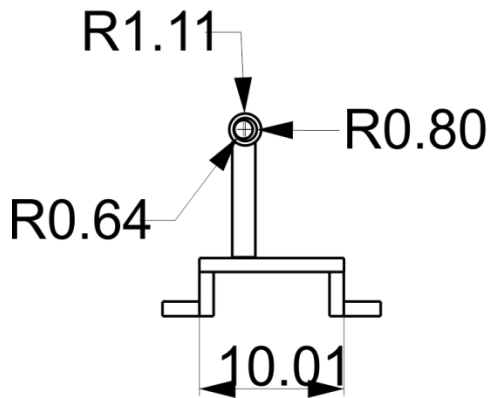
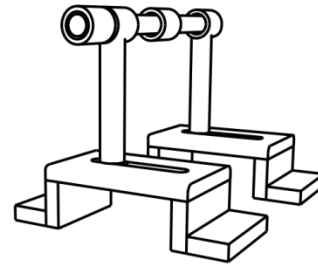
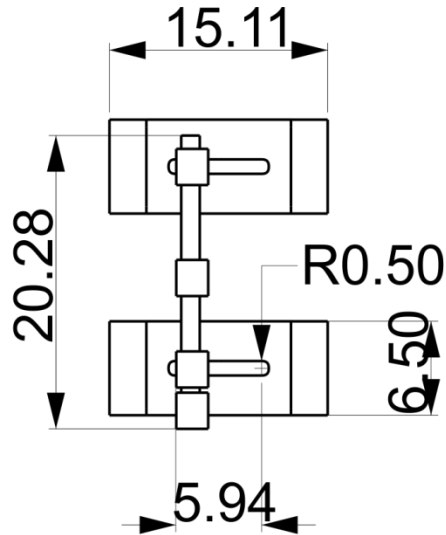
	“DISEÑO PARA LA MANUFACTURA DE UNA MAQUINA DE ENSAYOS DE EROSIÓN POR PARTÍCULAS SOLIDAS A UNA TEMPERATURA DE 673 K”				
	NOMBRE				TITULO :
	DIBUJO	JOSE LUIS NAVA SANCHEZ	“ PISTOLA DE SUCCIÓN “		
	ACOT. : mm	REVISOR			DR.GERMAN A.RODRIGUEZ C.
MATERIAL : ACERO AISI 304	COMENTARIOS:		ESCALA: 1:10	REVISIÓN	
				No. 3	HOJA
					01 de 01



N° DE ELEMENTO	NOMBRE DE LA PIEZA	MATERIAL
1	VENTURI	ACERO AISI 304
2	CUERPO	ACERO AISI 304
3	BOQUILLA	ACERO AISI 304

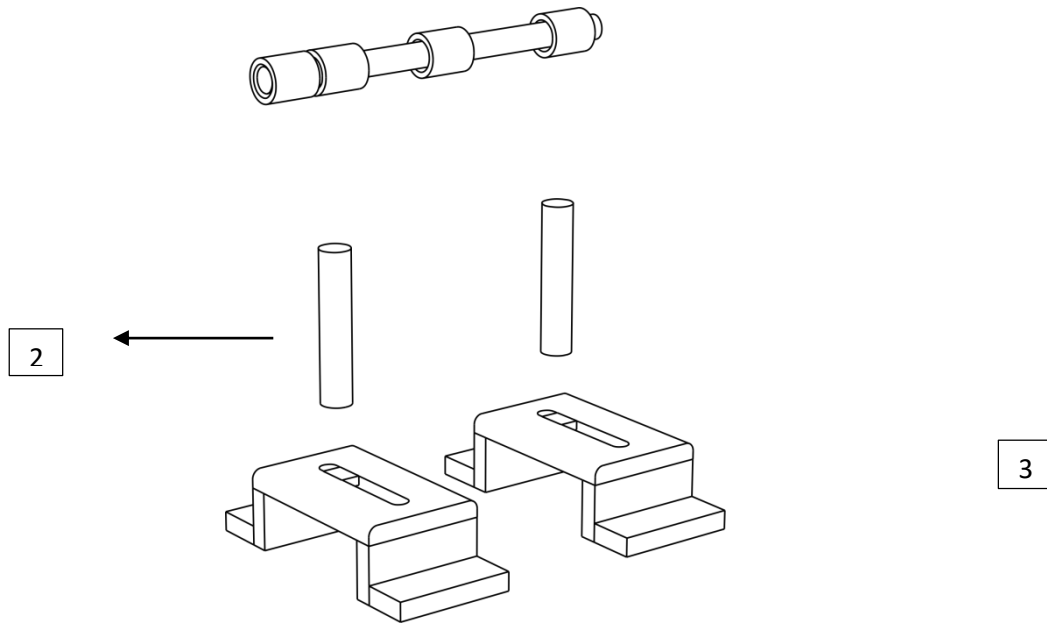


	<p>“DISEÑO PARA LA MANUFACTURA DE UNA MAQUINA DE ENSAYOS DE EROSIÓN POR PARTÍCULAS SOLIDAS A UNA TEMPERATURA DE 673 K”</p>					
	ACOT. : mm		NOMBRE DIBUJO JOSE LUIS NAVA SANCHEZ REVISOR DR.GERMAN A.RODRIGUEZ C.			TITULO : “EXPLOSIÓN DE PISTOLA DE SUCCIÓN “
	MATERIAL : ACERO AISI 304		COMENTARIOS:			
			ESCALA: 1:10			REVISIÓN No. 3

N° DE ELEMENTO	NOMBRE DE LA PIEZA	MATERIAL
1	EJE	ACERO AISI 304
2	POSTES	ACERO AISI 304
3	RIELES	ACERO AISI 304



	“DISEÑO PARA LA MANUFACTURA DE UNA MAQUINA DE ENSAYOS DE EROSION POR PARTICULAS SOLIDAS A UNA TEMPERATURA DE 673 K”			
	NOMBRE		TITULO :	
	ACOT. : mm	DIBUJO JOSE LUIS NAVA SANCHEZ	“DISPOSITIVO PARA CAMBIAR ANGULOS “	
	MATERIAL : AISI 304	REVISOR DR.GERMAN A.RODRIGUEZ C.	ESCALA: 1:10	
COMENTARIOS:		REVISIÓN	HOJA	
		No. 3	01 de 01	



“DISEÑO PARA LA MANUFACTURA DE UNA MAQUINA DE ENSAYOS DE EROSION POR PARTICULAS SOLIDAS A UNA TEMPERATURA DE 673 K”



		NOMBRE		TITULO : “EXPLOSIVO DE DISPOSITIVO PARA CAMBIAR ÁNGULOS “						
ACOT. : mm		DIBUJO	JOSE LUIS NAVA SANCHEZ							
MATERIAL : AISI 304		REVISOR	DR.GERMAN A.RODRIGUEZ C.	ESCALA: 1:10			REVISIÓN		HOJA	
COMENTARIOS:							No. 3		01	de

Anexo D.

Mecanismos de desgaste en las huellas de erosión por partícula sólida.

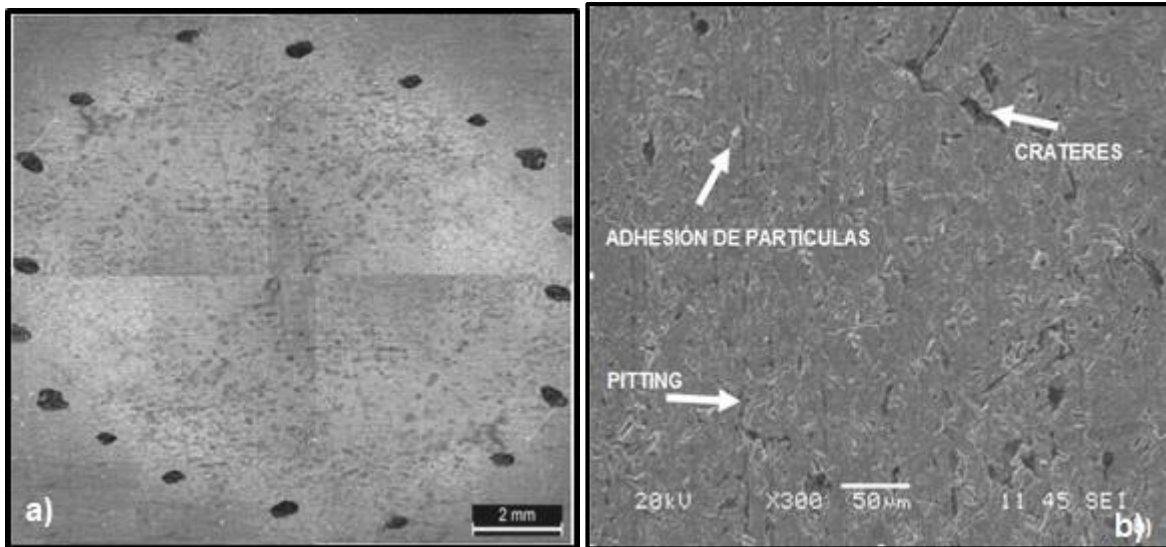


Figura D1 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar a) adhesión de partículas y b) agrietamiento, formación de cráteres, remoción de material y picaduras (pitting).

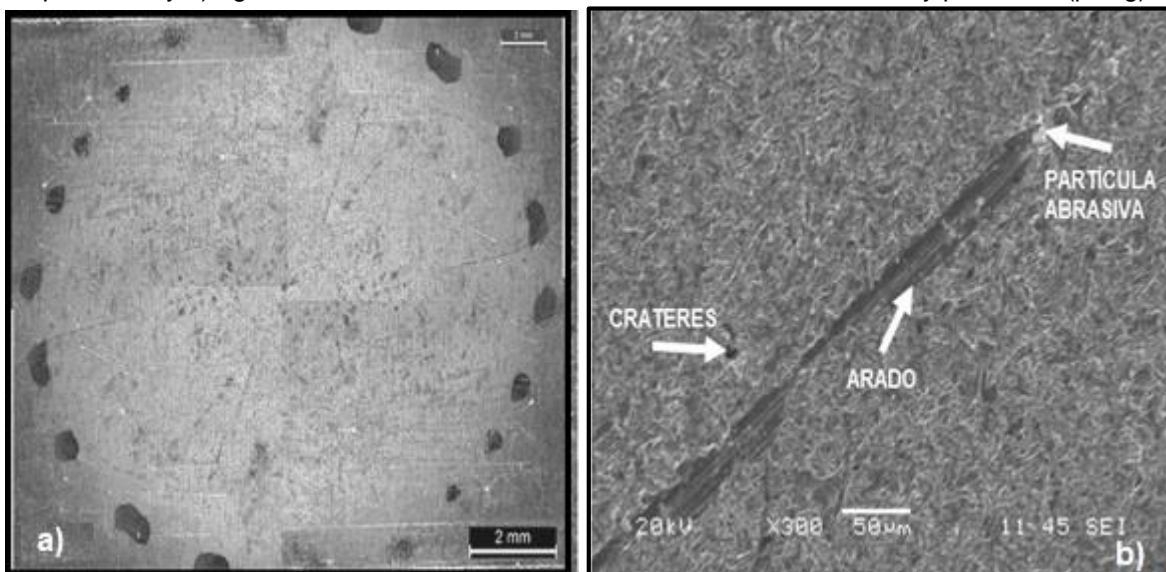


Figura D2 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 60°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 60°, donde se puede observar cráteres, arado y adhesión de partículas.

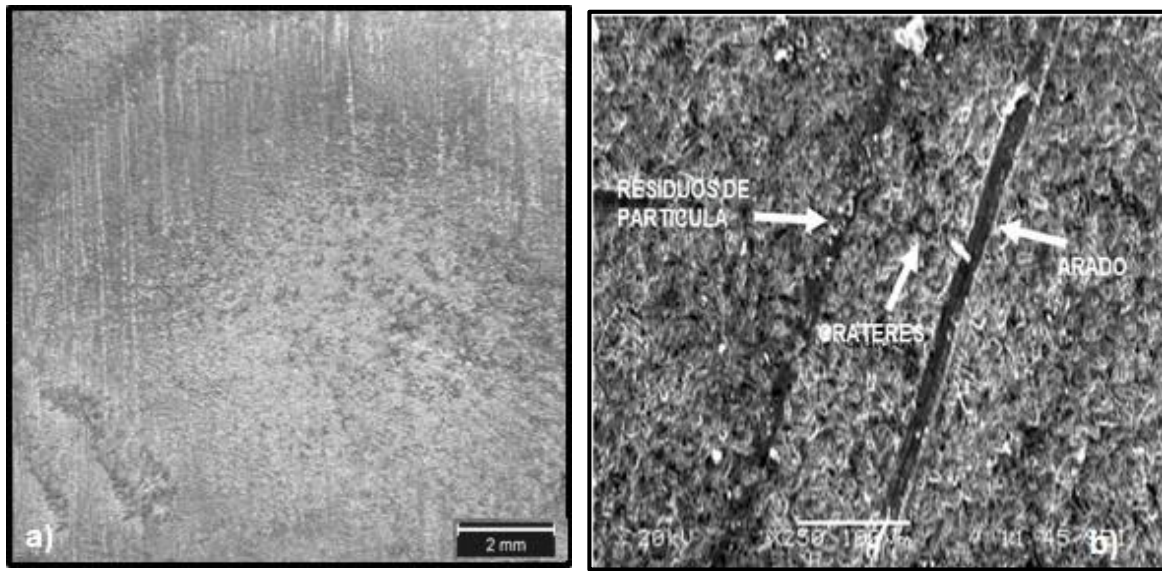


Figura D3 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste del [acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar adhesión de partículas y residuos de las mismas, arado, formación de cráteres y remoción de material.](#)

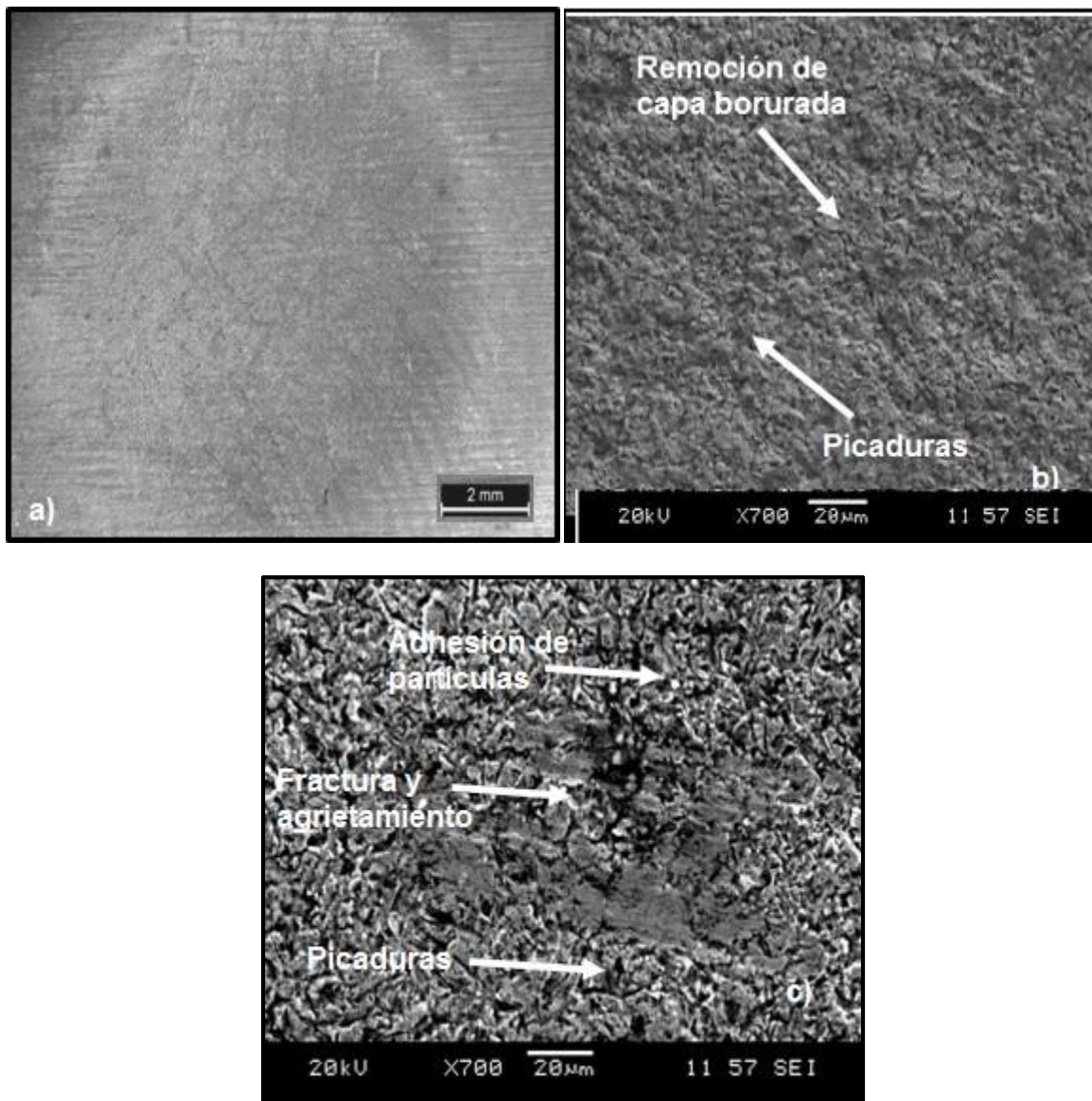


Figura D4 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente del acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar a) remoción de capa borurada, picaduras, c) fractura y agrietamiento de la capa borurada, adhesión de partículas y picaduras.

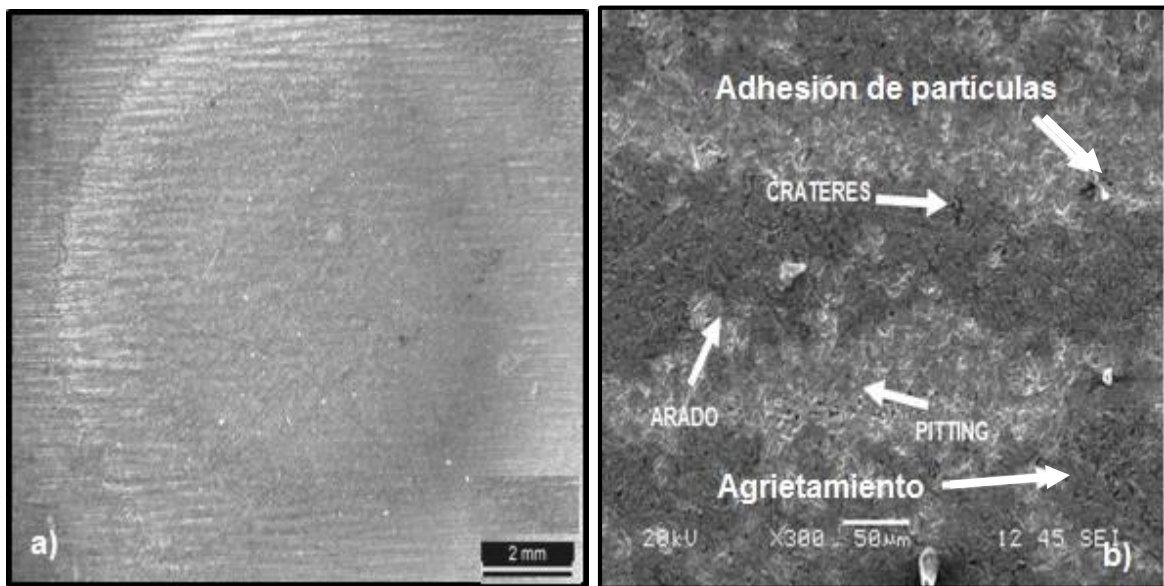


Figura D5 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 60°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 60°, donde se puede observar arado, adhesión de partículas, picaduras, y agrietamiento de la capa borurada.

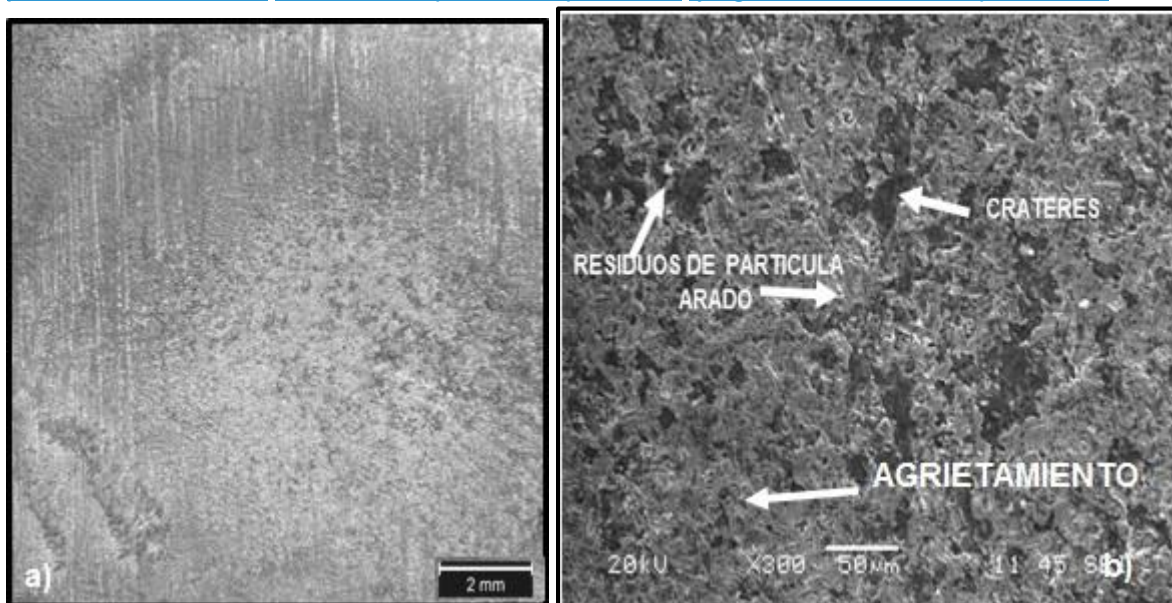


Figura D6 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a temperatura ambiente en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste del acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar arado, residuos de partículas, cráteres y agrietamiento.

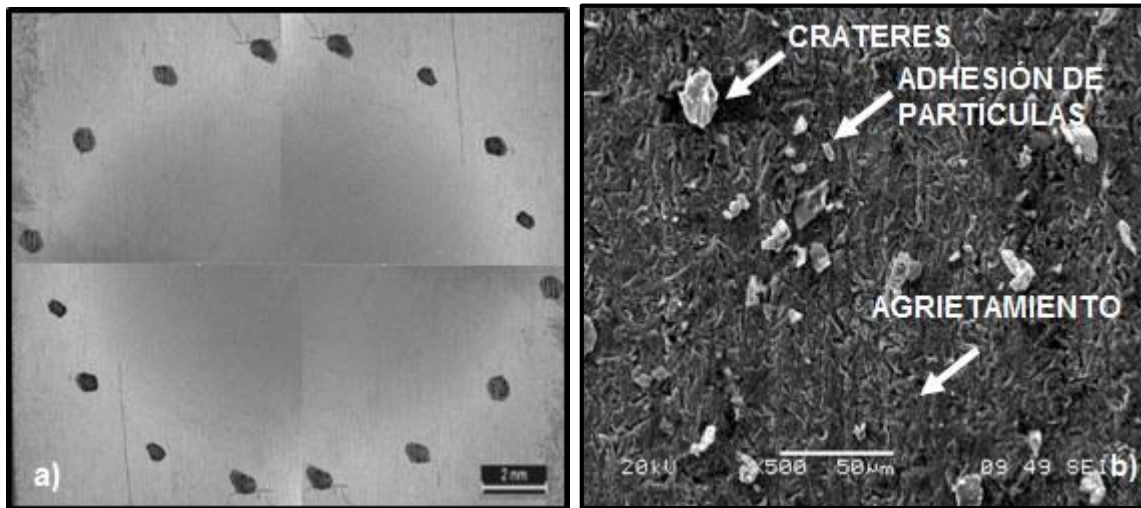


Figura D7 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar adhesión de partículas, formación de cráteres y agrietamiento.

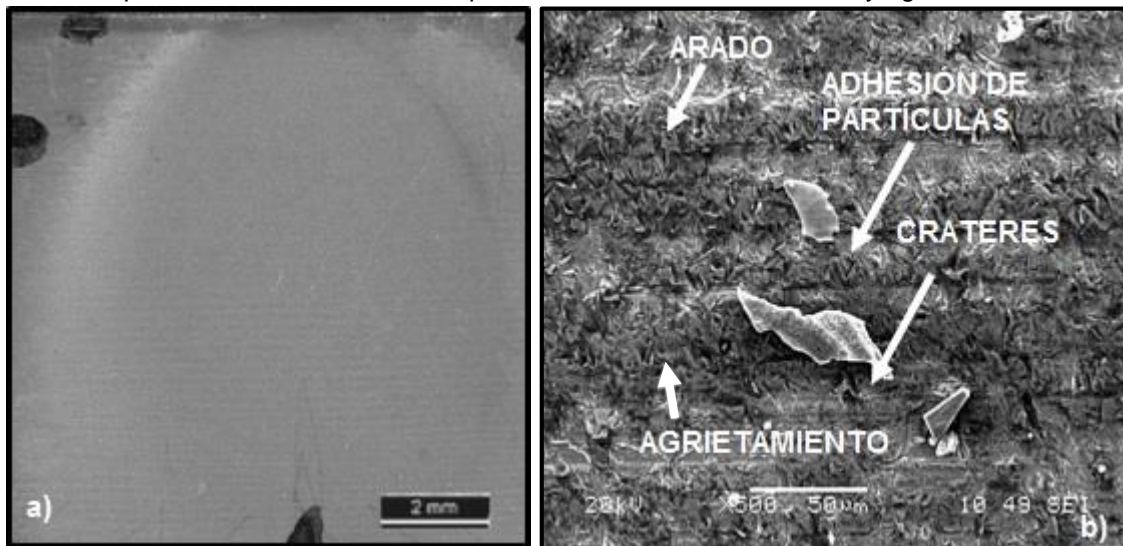


Figura D8 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 60°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 60°, donde se puede observar adhesión de partículas, arado, formación de cráteres, remoción de material y agrietamiento.

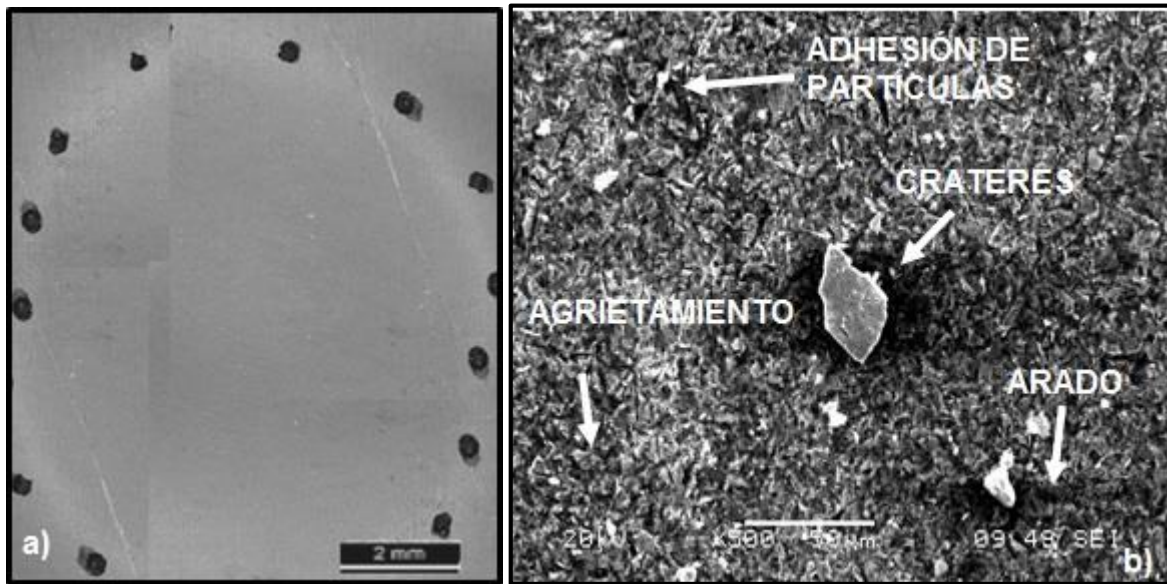


Figura D9 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140, a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar adhesión de partículas, arado, formación de cráteres y agrietamiento

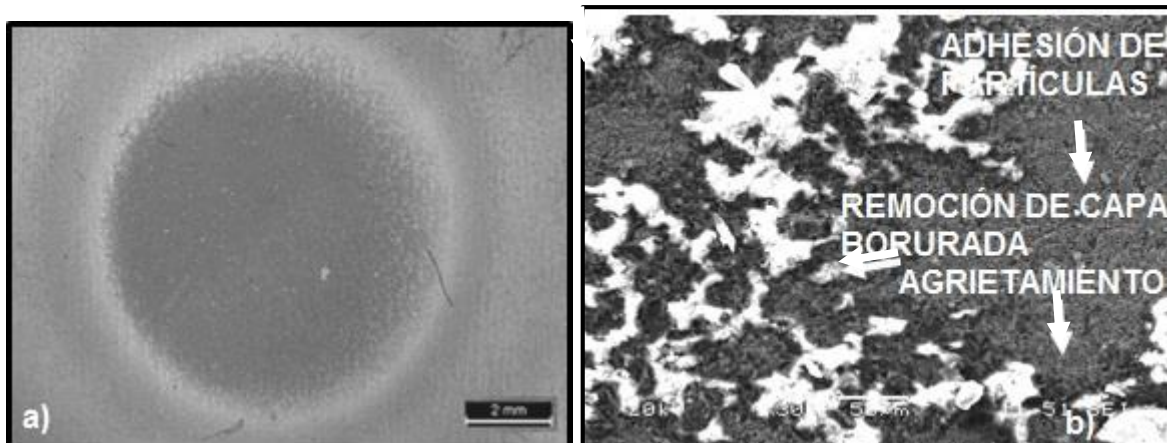


Figura D10 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 90°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 90°, donde se puede observar remoción de capa borurada, adhesión de partículas y agrietamiento.

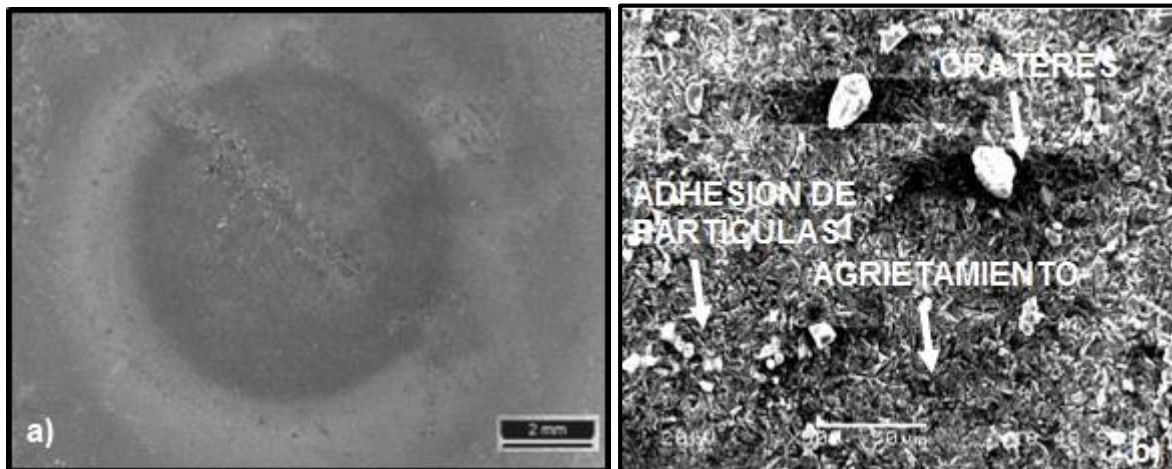


Figura D11 a) 4.26 Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 60°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 60°, donde se puede observar adhesión de partículas, formación de cráteres y agrietamiento.

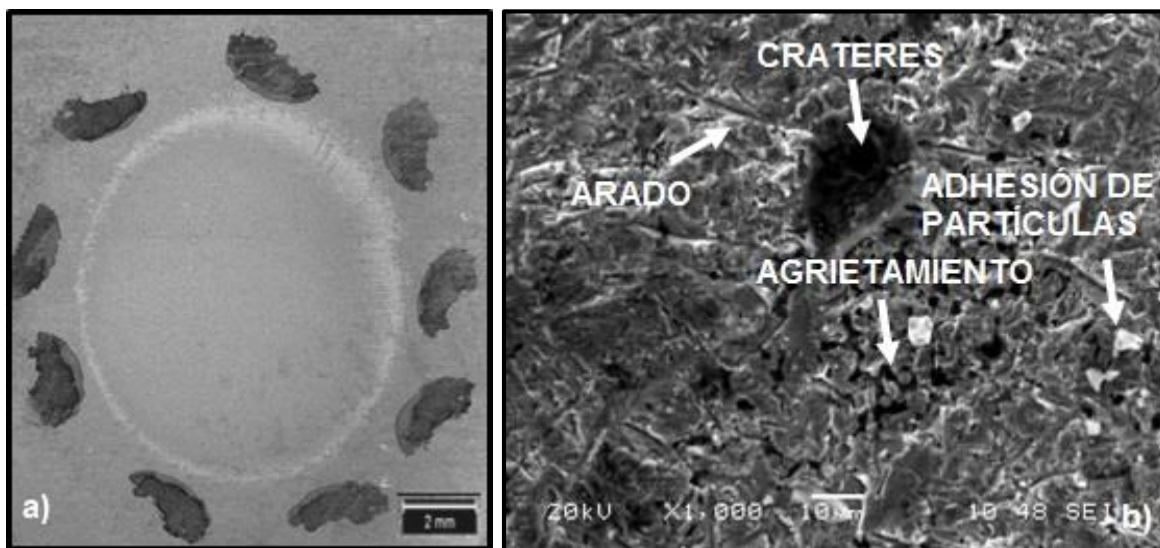


Figura D12 a) Fotomicrografía de la huella generada por el ensayo de erosión por partícula sólida a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado a un ángulo de impacto de 30°, b) Mecanismos de desgaste erosivo a la temperatura de 673 K en un acero AISI 4140 borurado, a un ángulo de impacto de 30°, donde se puede observar arado, adhesión de partículas, agrietamientos y formación de cráteres.