



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

UNIDAD ZACATENCO

“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS SUPERFICIALES DE UN
ACERO AISI H13 BORURADO”

T E S I S

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

PRESENTA

ING. JOSÉ ISAI HERNÁNDEZ ONOFRE

DIRECTORES DE TESIS

DR. IVÁN ENRIQUE CAMPOS SILVA

DR. DAVID ISRAEL BRAVO BARCENAS



MÉXICO, D.F.

Diciembre, 2016



Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	XIII
Resumen	XV
Abstract	XVII
Introducción	XVIII
Antecedentes	XX
Justificación	XXIII
Objetivo general	XXV
Objetivos particulares	XXV
Metodología	XXVII

Capítulo I

Borurización en caja para aceros de alta aleación	1
1.1 Tratamiento termoquímico de borurado	1
1.2 Agente borurante	3
1.3 Características de las capas boruradas	4
1.3.1 Dureza	4
1.3.2 Fases	4
1.3.3 Morfología	6



1.4	Influencia de los elementos de aleación	8
1.5	Proceso de borurado en aceros herramientales	9

Capítulo II

Desgaste	13
2.1 Tipos de desgaste	13
2.2 Fricción	14
2.3 Mecanismos de desgaste	14
2.3.1 Desgaste adhesivo	15
2.3.1.1 Desgaste adhesivo en materiales dúctiles	15
2.3.1.2 Desgaste adhesivo en materiales frágiles	16
2.3.2 Desgaste por tribo-oxidación	16
2.3.3 Desgaste abrasivo	17
2.3.3.1 Desgaste abrasivo en materiales dúctiles	18
2.3.3.1 Desgaste abrasivo en materiales frágiles	19
2.3.4 Desgaste por fatiga de contacto	20
2.4 Efecto de la lubricación	21
2.5 Pruebas de desgaste	22

Capítulo III

Desarrollo experimental	24
3.1 Tratamiento termoquímico de borurado en polvo del acero AISI H13	24



3.2 Caracterización de las capas de boruros de hierro	27
3.2.1 Prueba de difracción de rayos X (XRD)	27
3.2.2 Pruebas de microdureza y evaluación de los esfuerzos residuales en las capas de boruros de hierro	29
3.2.3 Pruebas de desgaste recíprocante lineal sobre las superficies de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado	30
3.2.4 Estudios de perfilometría óptica sobre los canales de desgaste	33
3.2.5 Estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS) en los canales de desgaste y la bola de alúmina	35
Capítulo IV	
Resultados y discusiones	37
4.1 Morfología de la capa de boruros de hierro formada en un acero AISI H13	37
4.2 Dureza y esfuerzos residuales de las capas boruradas	38
4.3 Caracterización tribológica de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado en ambiente seco	39
4.3.1 Coeficiente de fricción	39
4.3.2 Volumen removido	42
4.3.2 Tasa de desgaste	45
4.3.3 Mecanismos de desgaste	46
4.4 Caracterización tribológica de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado en ambiente húmedo	51
4.4.1 Coeficiente de fricción	51



4.4.2 Volumen perdido	54
4.4.3 Tasa de desgaste	56
4.4.5 Mecanismos de desgaste	58
Conclusiones generales	64
Perspectivas de trabajo	66
Referencias bibliográficas	67
Apéndice A	70
Apéndice B	76
Apéndice C	80
Apéndice D	82
Apéndice E	88
Apéndice F	92



Índice de figuras

Figura 1.1. Diagrama del empaquetamiento en polvo de una pieza (Modificado de ASM Handbook Vol. 4, 1991).	2
Figura 1.2. Diagrama de equilibrio hierro-boro (Fernández, 1999).	5
Figura 1.3. Tipos de capas boruradas (Carrera, 2014).	7
Figura 1.4. Acero AISI H13 borurado con Ekabor [®] 1 a 1000 °C durante 3h. Se observa una morfología semiaserrada (Genel, 2005).	10
Figura 1.5. Vista en sección transversa de las capas FeB y Fe ₂ B formadas en un acero AISI D2 a a) 900 °C durante 8 horas y b) 1050 °C durante 6 horas (Modificado de Campos y cols., 2011).	11
Figura 1.6. Micrografías de las capas boruradas de un acero AISI H3, borurado a 900 °C durante a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8 horas. (Keddam y cols., 2014)	12
Figura 2.1. Mecanismos de desgaste (Modificado de Tribology Series, 1987).	15
Figura 2.2. a) Dos asperezas en contacto, b) adhesión entre dos asperezas y c) formación de una partícula de desgaste (Kalpakjian, 2008).	16
Figura 2.3. Tribo-oxidación (Modificado de Straffelini, 2015).	17



-
-
- Figura 2.4. Tipos de abrasión (Modificado de Tribology Series, 1987). 18
- Figura 2.5. Abrasión en materiales dúctiles por a) microcorte y b) microarado (Straffelini, 2015). 19
- Figura 2.6. Formación de grietas radiales y laterales por el mecanismo de Lawn y Swain. a) deformación plástica generada a partir del contacto angular, b) propagación de la grieta conforme se aumenta la carga aplicada, c) cierre de la grieta perpendicular y formación de nuevas grietas radiales debido a la remoción de la carga y d) astillamiento cuando las grietas llegan a la superficie (Straffelini, 2015). 20
- Figura 2.7. Nucleación y propagación de grietas en la fatiga de contacto (Modificado de Tribology Series, 1987). 21
- Figura 2.8. Representación esquemática del equipo utilizado para pruebas de desgaste recíprocante (Modificado de la norma G133-05, 2010). 23
- Figura 3.1. Hornos convencionales a) Felisa y b) Lindberg, utilizados para el tratamiento termoquímico de borurado. 25
- Figura 3.2. Identificación de las capas formadas sobre la superficie de un acero AISI H13, borurado a una temperatura de 950 °C, y con un tiempo de exposición de 6 h. 26
- Figura 3.3. a) Microscopio Olympus GX51 utilizado para la observación de las capas boruradas. b) Metodología utilizada para la medición de los espesores de capa. 27
- Figura 3.4. Difractómetro utilizado para la prueba de XRD. 28
-
-



Figura 3.5. Difractograma obtenido de la prueba de XRD sobre el acero AISI H13 borurado. 28

Figura 3.6. Microindentaciones realizadas transversalmente, empleando una carga de 500 mN, en un acero AISI H13, borurado a 950 °C durante 6 horas. 30

Figura 3.7. Equipo de pruebas UMT-2 utilizado en las pruebas de desgaste recíprocante lineal. 31

Figura 3.8. Contenedor de acero inoxidable AISI 316L utilizado para las pruebas de desgaste recíprocante lineal, en ambiente húmedo. 33

Figura 3.9. Perfilómetro óptico Bruker ContourGT-K. 34

Figura 3.10. Reconstrucción de un canal de desgaste, realizado sobre la superficie de un acero AISI H13 en ambiente seco y aplicando una carga de 25 N. 35

Figura 3.11. Microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6360LV, utilizado para los estudios de SEM y EDS sobre los canales de desgaste y la bola de alúmina. 36

Figura 4.1. Comportamiento de los coeficientes de fricción en los aceros a) AISI H13 y b) AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco. 40

Figura 4.2. Profundidades de los canales de desgaste realizados sobre la superficie de los aceros a) AISI H13 y b) AISI H13 borurado, en ambiente seco. 43



Figura 4.3. Tasas de desgaste globales para la condición de desgaste recíprocante lineal, en ambiente seco. 46

Figura 4.4. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 25 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m. 47

Figura 4.5. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13, a 25 N y en condiciones de desgaste seco. 48

Figura 4.6. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 25 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m. 49

Figura 4.7. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13 borurado, a 25 N y en condiciones de desgaste seco. 50

Figura 4.8. Variación del coeficiente de fricción en las muestras de acero a) AISI H13 y b) AISI H13 borurado, durante las pruebas de desgaste en ambiente húmedo. 52

Figura 4.9. Profundidades alcanzadas por la bola de alúmina en cada condición de carga en los aceros a) AISI H13 y b) AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo. 55



Figura 4.10. Tasas de desgaste globales correspondiente a la condición de desgaste en ambiente húmedo. 58

Figura 4.11. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 150 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m. 59

Figura 4.12. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 150 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13. 60

Figura 4.13. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 150 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m. 61

Figura 4.14. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 150 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13 borurado. 62

Figura A1. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 10 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m. 70



Figura A2. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13, a 10 N y en condiciones de desgaste seco.

70

Figura A3. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 15 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

71

Figura A4. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13, a 15 N y en condiciones de desgaste seco.

71

Figura A5. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 20 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

72

Figura A6. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13, a 20 N y en condiciones de desgaste seco.

72

Figura A7. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 10 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

73



Figura A8. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13 borurado, a 10 N y en condiciones de desgaste seco. 73

Figura A9. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 15 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m. 74

Figura A10. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13 borurado, a 15 N y en condiciones de desgaste seco. 74

Figura A11. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 20 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m. 75

Figura A12. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13 borurado, a 20 N y en condiciones de desgaste seco. 75

Figura B1. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 10 N, en un acero AISI H13 y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste seco. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x 76



Figura B2. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 25 N, en un acero AISI H13 y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste seco. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x 77

Figura B3. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 10 N, en un acero AISI H13 borurado y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste seco. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x 78

Figura B4. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 25 N, en un acero AISI H13 borurado y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste seco. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x 79

Figura C1. Estudios de EDS realizados sobre la superficie desgastada de una bola de alúmina que se utilizò para desgastar un acero AISI H13, aplicando una carga de 25 N y una distancia de deslizamiento de 100 m, bajo condiciones de desgaste seco 80

Figura C2. Mecanismos presentes en la bola de alúmina a aumentos de a) 150x y b) 1000x 80

Figura C3. Estudios de EDS realizados sobre la superficie desgastada de una bola de alúmina que se utilizò para desgastar un acero AISI H13 borurado, aplicando una carga de 25 N y una distancia de deslizamiento de 100 m, bajo condiciones de desgaste seco 81

Figura C4. Mecanismos presentes en la bola de alúmina a aumentos de a) 150x y b) 1000x



81

Figura D1. a) Coeficientes de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 75 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m

Figura D2. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizando una carga de 75 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13

Figura D3. a) Coeficientes de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 100 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m

Figura D4. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizando una carga de 100 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13

Figura D5. a) Coeficientes de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 125 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m

Figura D6. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizando una carga de 125 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13



Figura D7. a) Coeficientes de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 75 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m 85

Figura D8. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizando una carga de 75 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13 borurado 85

Figura D9. a) Coeficientes de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 100 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m 86

Figura D10. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizando una carga de 100 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13 borurado 86

Figura D11. a) Coeficientes de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 125 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m 87

Figura D10. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizando una carga de 125 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13 borurado 87



Figura E1. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 75 N, en un acero AISI H13 y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste húmedo. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x 88

Figura E2. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 150 N, en un acero AISI H13 y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste húmedo. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x 89

Figura E3. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 75 N, en un acero AISI H13 borurado y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste húmedo. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x 90

Figura E4. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 150 N, en un acero AISI H13 borurado y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste húmedo. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x 91

Figura F1. Estudios de EDS realizados sobre la superficie desgastada de una bola de alúmina que se utilizó para desgastar un acero AISI H13, aplicando una carga de 150 N y a una distancia de deslizamiento de 100 m, bajo condiciones de desgaste húmedo 92

Figura F2. Mecanismos presentes en la bola de alúmina a aumentos de a) 150x y b) 1000x 92



Figura F3. Estudios de EDS realizados sobre la superficie desgastada de una bola de alúmina que se utilizó para desgastar un acero AISI H13 borurado, aplicando una carga de 150 N y na distancia de deslizamiento de 100 m, bajo condiciones de desgaste húmedo

93

Figura F4. Mecanismos presentes en la bola de alúmina a aumentos de a) 150x y b) 1000x

93



Índice de tablas

Tabla 1.1. Tamaño de grano de los distintos grados Ekabor [®] (Finchtl,1981).	3
Tabla 1.2. Propiedades químicas y mecánicas de los boruros de hierro (Modificado de ASM Handbook Vol. 4, 1991).	6
Tabla 3.1. Composición química del acero AISI H13 de acuerdo al vendedor (Aceros Fortuna).	24
Tabla 3.2. Condiciones experimentales para cada condición de desgaste.	32
Tabla 4.1. Durezas y esfuerzos residuales de la capas boruradas creadas sobre la superficie de un acero AISI H13, borurado a 950 °C durante 6 horas.	38
Tabla 4.2. Coeficientes de fricción proporcionados por el equipo de pruebas UMT-2.	41
Tabla 4.3. Volúmenes perdidos obtenidos mediante estudios de perfilometría óptica.	44
Tabla 4.4. Tasas de desgaste puntuales estimadas de acuerdo a la norma ASTM G133-05.	45
Tabla 4.5. Mecanismos de desgaste predominantes para cada condición de desgaste para una distancia de deslizamiento de 100 m.	51
Tabla 4.6. Comparativa de los coeficientes de fricción obtenidos en condiciones de desgaste húmedo.	53



Tabla 4.7. Volúmenes perdidos para cada condición de carga aplicada.	56
Tabla 4.8. Tasas de desgaste puntuales calculadas de acuerdo a la norma G133-05.	57
Tabla 4.9. Mecanismos de desgaste predominantes para cada condición de desgaste para una distancia de deslizamiento de 100 m.	63



Resumen

En este trabajo de investigación, se evaluaron las propiedades físico-químicas, mecánicas y tribológicas de las capas de boruros de hierro formadas sobre la superficie de un acero AISI H13. Para el tratamiento de borurado se utilizó la técnica de empaquetamiento en polvo. El tratamiento de borurado se realizó a una temperatura de 950 °C, con un tiempo de exposición de 6 horas y Ekabor[®] 2 como mezcla borurante.

Sobre el acero AISI H13 se formó una capa bifásica de boruros de hierro con una morfología semiaserrada. El espesor total de la capa de boruros de hierro obtenida fue de 51.5 ± 5 , aproximadamente.

Para la caracterización físico-química, se hicieron pruebas de microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía de energía dispersiva (EDX) y difracción de rayos X (DRX). La caracterización mecánica se realizó mediante pruebas de microindentación instrumentada Vickers y la caracterización tribológica a través de pruebas de desgaste recíprocante lineal en ambiente seco y húmedo.

Los perfiles de dureza se realizaron transversalmente, con el fin de determinar el comportamiento de la dureza a lo largo de la capa; la carga que se aplicó en los ensayos fue de 500 mN. La dureza que se obtuvo en FeB, Fe₂B y en el substrato fue de 19 ± 1 , 16 ± 1 y 6 ± 0.1 GPa, respectivamente. En las pruebas de desgaste recíprocante lineal, en ambiente seco, se emplearon cargas de 10 a 25 N, mientras que en ambiente húmedo, cargas de 75 a 150 N; en ambas condiciones se utilizó una bola de Al₂O₃ de 6 mm de diámetro y una distancia de deslizamiento de 100 m.

De las pruebas de desgaste recíprocante lineal, en ambiente seco y húmedo, se obtuvieron los coeficientes de fricción; con los estudios de perfilometría óptica, los volúmenes perdidos y, finalmente, la tasa de desgaste se calculó de forma analítica. Los valores del



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SEPI ESIME ZACATENCO**



coeficiente de fricción están en un rango de 0.106 a 0.713, los volúmenes perdidos entre 0.006 y 0.153 mm³ y las tasas de desgaste en un rango de 0.034 x10⁻⁵ a 6.093x10⁻⁵ mm³/N*m.



Abstract

In this work the physicochemical, mechanical and tribological properties of boride layer formed on the surface of the AISI H13 steel was evaluated by development of the powder-pack boriding process. The boriding treatment was carried out at a temperature of 950 °C, with an exposure time of 6 hours and powder thickness of 10 mm; the Ekabor[®] 2 was used like boride mixture.

On AISI H13 steel a biphasic layer was formed, that is, FeB and Fe₂B layers, with smooth morphology. The thickness of both layers formed was about 34 ± 2 and 51.5 ± 5 μm, respectively.

For the physicochemical characterization Optical Microscopy, Scanning Electron Microscopy, Energy Dispersive Spectroscopy and X-Ray Diffraction tests was used. The mechanical characterization of FeB and Fe₂B layers was carried out by depth sensing microindentation tests. Vickers microindentation tests were established at a constant load of 500 mN along the depth of boride layers in order to estimate the hardness of layer/substrate system.

The tribological properties was evaluated using linear reciprocating wear test in dry and lubricated conditions, with a sliding distance of 100 m. For the wear tests in dry conditions it applied loads in range of 10 to 25 N, while tests in lubricated condition it applied loads in range of 75 to 150 N. From wear tests in both conditions the values of the coefficients of friction, the lost volume and the wear rate were obtained.

Finally, the wear rate of the AISI H13 borided steel and AISI H13 steel was compared.



Introducción

El fenómeno de desgaste en los materiales metálicos es objeto de estudio en todo el mundo debido a que es una de las principales causas del retiro prematuro de componentes de máquinas. El desgaste mecánico se puede presentar en cuatro distintas formas: corrosivo, por fatiga, abrasivo y adhesivo, siendo estos dos últimos los más importantes.

Para mejorar la resistencia al desgaste de muchos materiales ferrosos se realizan tratamientos termoquímicos sobre la superficie de éstos. Existen diversos tipos de tratamientos termoquímicos como el borurado, carburizado, cementado, nitrurado, cianurado, entre otros. De todos los tratamientos termoquímicos, el borurado es uno de los más utilizados debido a que proporciona una mayor dureza y una excelente resistencia al desgaste y corrosión.

El tratamiento de borurado consiste en difundir átomos de boro en los intersticios de un material base, con el fin de formar una capa monofásica (FeB) o bifásica (FeB + Fe₂B).

En este trabajo se realiza un tratamiento de borurado en un acero AISI H13, grado herramental con alto contenido de cromo.

Los Capítulos I y II establecen todos los fundamentos y conceptos teóricos del proceso de borurado y del desgaste adhesivo, los cuales se utilizan a lo largo de este trabajo de investigación.

En el capítulo III se explica todo el proceso experimental realizado para la evaluación de las propiedades físico-químicas, mecánicas y tribológicas de la capa de boruros de hierro formada en el acero AISI H13. También, se presentan los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizadas. En la caracterización físico-química, se verifica la formación de boruros y diboruros de hierro formados en la capa, utilizando pruebas de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X. La caracterización mecánica



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SEPI ESIME ZACATENCO**



se realiza mediante pruebas de microdureza, mientras que la caracterización tribológica se lleva a cabo con pruebas de desgaste recíprocante lineal. Éstas últimas en ambiente seco y húmedo.

En el Capítulo IV se realiza a cabo un análisis detallado de todos los resultados presentados en el Capítulo III. Principalmente, se explica la influencia que tiene la morfología de la capa de boruros de hierro, el coeficiente de fricción, el medio de desgaste y las tasas de desgaste, en la resistencia al desgaste, del acero AISI H13 y AISI H13 borurado.

Finalmente, se presentan las conclusiones y perspectivas de trabajo generadas a partir de la realización de este trabajo de investigación.



Antecedentes

En la publicación de Khizhnyak y cols. (2003) se examina el efecto del borurado en la resistencia al desgaste de un acero U8A. El tratamiento de borurado se realizó a una temperatura de 925 °C, con un tiempo de exposición de 4 horas. Se obtuvo un sistema bicapa y un espesor total de 110 µm (40 µm FeB y 70 µm Fe₂B), con una dureza de 21 y 14.5 GPa para la capa FeB y Fe₂B, respectivamente.

Se realizaron pruebas de desgaste por deslizamiento en condiciones secas, empleando una carga de 78.5 N, y utilizando un contracuerpo de acero 65G templado. El tratamiento de borurado incrementó la resistencia al desgaste de este acero en un factor de 2.5 a 20 veces.

Motallebzadeh y cols. (2015) realizaron una evaluación de las características del desgaste por deslizamiento en aceros 31CrMoV9 y X40CrMoV5-1 borurados. El acero 31CrMoV9 se boruró a 900 °C durante 4 horas, mientras que el acero X40CrMoV5-1 a 950 °C, durante 6 horas. En ambos aceros, se utilizaron 5 mm de pasta EKABOR® 2 para formar una capa de 65 µm en cada acero.

Se realizaron pruebas de desgaste por deslizamiento a temperatura ambiente, utilizando una bola de alúmina de 6 mm de diámetro, una carga normal de 3 N, una velocidad de deslizamiento de 5 cm/s y una distancia de deslizamiento de 250 m. El volumen removido en los aceros 31CrMoV9 y X40CrMoV5-1 borurados fue de 2.1×10^{-3} mm³ y 2.4×10^{-3} mm³, respectivamente.

Finalmente, se analiza el efecto de los esfuerzos térmicos durante el desgaste, concluyendo así que los esfuerzos térmicos compresivos son benéficos porque retienen la propagación de las grietas que se generan durante el proceso de desgaste.



Vera Cárdenas y cols. (2015) evaluaron la resistencia al desgaste de las capas boruradas obtenidas sobre aceros AISI H13 y D2. El tratamiento de borurado se realizó a una temperatura de 1000 °C con un tiempo de exposición de 8 horas, obteniendo una capa total de 35 a 40 μm . También se efectuaron pruebas de desgaste por deslizamiento a temperatura ambiente en el material base; es decir, sobre los aceros AISI H13 y AISI D2 sin borurar, en ambiente seco. Las pruebas de desgaste se llevaron a cabo con una carga de 20 N, una frecuencia de 10 Hz, una carrera de 15 mm y una bola de acero AISI 52100 con diámetro de 4.75 mm, como contracuerpo para desgaste las muestras.

Las tasas de desgaste obtenidas para los aceros AISI H13 y AISI D2 fue de 1.91×10^{-6} y 1.50×10^{-6} $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, respectivamente. Para los aceros AISI H13 borurado y AISI D2 borurado las tasas de desgaste fueron de 2.53×10^{-5} y 2.02×10^{-5} $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, respectivamente. De los resultados se concluyó que la resistencia al desgaste, por deslizamiento en los aceros borurados, fue 13 veces mayor que en los no borurados.

En el trabajo de investigación de Carrera y cols. (2016) se caracteriza el comportamiento al desgaste de un acero AISI 1018 y AISI 1018 borurado. El tratamiento termoquímico de borurado se realizó a 1000 °C durante 6 horas. Se obtuvo una capa bifásica con un espesor total de 215 μm .

Las propiedades tribológicas de la capa obtenida se evaluaron con pruebas de desgaste recíprocante lineal en ambiente seco y húmedo. Para esta caracterización superficial se utilizaron bolas de Al_2O_3 con diámetro de 6 mm, una carga constante de 5 N, una velocidad de deslizamiento de 5 mm/s y distancias de deslizamiento de 81, 108 y 135 metros.

Aunque los autores no proporcionan el valor de todas las tasas de desgaste, para cada condición de deslizamiento, se puede apreciar, en la gráfica de barras de tasa de desgaste específica vs distancia de deslizamiento, que las muestras boruradas y no boruradas, bajo



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SEPI ESIME ZACATENCO**



una distancia de deslizamiento de 135 metros, en ambiente seco y húmedo, son las que presentan mayor desgaste. El lubricante redujo las tasas de desgaste en un 89.6%.



Justificación

En la industria existen diversas máquinas y elementos mecánicos sometidos a distintas condiciones de operación, las cuales afectan la vida útil de cada uno de estos elementos. El fenómeno de desgaste es una de las principales causas del retiro prematuro de piezas. Por lo anterior, es de suma importancia mejorar las propiedades mecánicas superficiales de dichos elementos, con el fin de aumentar su rendimiento y prolongar su tiempo de vida útil.

A nivel industrial se estima que el 15% del total de fallas por desgaste, presentes en componentes mecánicos, se debe al desgaste adhesivo.

Actualmente, en el Grupo Ingeniería de Superficies del Instituto Politécnico Nacional, se han realizado estudios sobre el endurecimiento superficial en materiales ferrosos, mediante el proceso de borurado en polvo y pasta.

El proceso de borurado en polvo tiene, entre sus ventajas, ser seguro, económico y fácil de llevar a cabo.

Hoy en día, en la literatura no existen muchos trabajos de investigación en los que se estime la resistencia al desgaste de aceros de alta aleación borurados, aplicando la técnica de desgaste recíprocante lineal bajo condiciones secas y húmedas. El acero AISI H13 al ser un metal muy utilizado, principalmente para la fabricación de elementos que trabajan bajo condiciones severas de remoción de material, es necesario mejorar su resistencia al desgaste mediante un tratamiento termoquímico de borurado y evaluar las propiedades tribológicas de la capa de boruros de hierro formada sobre este acero.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SEPI ESIME ZACATENCO**



Además, en el Grupo de Ingeniería de Superficies solo se ha realizado un trabajo de investigación utilizando pruebas de ensayo recíprocante lineal, por lo que se busca seguir realizando este tipo de investigaciones.

A partir de este proyecto de investigación se realiza una evaluación de las propiedades mecánicas superficiales de un acero AISI H13 borurado.



Objetivo general

Realizar un análisis de la superficie de un acero H13 borurado, mediante la realización de pruebas de desgaste recíprocante lineal, en ambiente húmedo y seco, para evaluar su resistencia al desgaste adhesivo.

Objetivos particulares

- a) Realizar un tratamiento termoquímico de borurado sobre la superficie de un acero AISI H13, empleando la técnica de empaquetamiento en polvo, para la formación de capas boruradas tipo FeB y Fe₂B.
- b) Realizar la caracterización físico-química de la capa borurada mediante la técnica de difracción de rayos X (XRD), para verificar la presencia de compuestos intersticiales base boro en la superficie del acero AISI H13 borurado.
- c) Realizar la caracterización mecánica de la capa borurada a través de pruebas de microindentación instrumentada, para determinar el comportamiento de la dureza del sistema capa/substrato.
- d) Realizar los ensayos de desgaste recíprocante lineal, en un ambiente húmedo y seco, en las muestras de acero AISI H13 y AISI H13 borurado, utilizando cargas variables y una distancia constante de desgaste, para establecer el comportamiento del coeficiente de fricción en ambos materiales.



-
-
- e) Utilizar perfilometría óptica en la superficie de las muestras de acero AISI H13 y AISI H13 borurado, expuestos al ensayo de desgaste recíprocante lineal, para determinar el volumen perdido en los canales de desgaste.
- f) Identificar los mecanismos de desgaste presentes en las huellas de desgaste de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado, en ambas condiciones (seco y húmedo), mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM), para establecer la relación de los parámetros de desgaste en función del mecanismo presente en la superficie de los materiales.



Metodología

La metodología empleada en este trabajo de investigación se muestra a continuación:

- Endurecer la superficie de un acero H13 mediante un borurado, utilizando el método de empaquetamiento en polvo, a una temperatura 950 °C, con un tiempo de exposición de 6 horas, para obtener un espesor de capa promedio de 50 μm . Para la estimación de la capa se utilizó un microscopio óptico marca Olympus GX51 y el software Image Pro-Plus V6.0, para la digitalización de las imágenes obtenidas. En función de los parámetros experimentales y, mediante el uso de la ecuación de crecimiento parabólico, se establecerá la cinética de crecimiento de la capa.
- Realizar la caracterización físico-química utilizando la técnica de Difracción de Rayos X, por medio de un difractorómetro X'PERT PRO PANalytical y una lámpara de cobalto con una longitud de onda de 1.79 Å, para identificar la composición de las fases creadas sobre la superficie del acero AISI H13.
- Determinar las durezas y el estado de esfuerzos residuales en las capas de boruros de hierro FeB y Fe₂B, mediante pruebas de microdureza instrumentada Vickers, utilizando un equipo UMT-2 Bruker. Se realizaron 5 perfiles perpendiculares, desde la superficie de la muestra borurada hasta el sustrato, a una carga constante de 500 mN.
- Realizar pruebas de desgaste recíproco lineal en las muestras de acero AISI H13 y AISI H13 borurado, utilizando una distancia de deslizamiento de 100 metros, una velocidad de 30 mm/s y cargas variables de 10, 15, 20 y 25 N para condiciones



de desgaste en seco, y de 75, 100, 125 y 150 N para la condición de desgaste en vía húmeda. En estas pruebas se utilizó el equipo UMT-2 Bruker, el módulo de desgaste recíprocante lineal y una bola de alúmina de 6 mm de diámetro (contracuerpo).

- Realizar estudios de perfilometría óptica sobre los canales de desgaste de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado (en ambiente seco y húmedo), utilizando un perfilómetro óptico Bruker modelo Contour GT-3D, con el fin de estimar el volumen perdido en las líneas de desgaste. Para la digitalización de las imágenes se utilizó un objetivo de 5x y el software Vision 64.
- Identificar los mecanismos de desgaste presentes en los canales de desgaste, los cuales se generaron sobre las superficies de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado, haciendo uso de un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6360LV. Las micrografías se obtuvieron utilizando el filtro de electrones retrodispersados a aumentos de 55, 150, 1000 y 2500x.



Capítulo I

Borurización en caja para aceros de alta aleación

1.1 Tratamiento termoquímico de borurado

Para el endurecimiento superficial de materiales existen tres principales métodos: los métodos termoquímicos por difusión, los métodos térmicos o de energía aplicada y los métodos de recubrimiento o modificación superficial.

Los métodos termoquímicos por difusión modifican la composición química superficial mediante elementos aleantes como el carbón, nitrógeno y boro. Los métodos de energía aplicada no modifican la composición química superficial, sino que mejoran las propiedades alterando la metalurgia de la superficie; es decir, se crea una superficie dura sin elementos de aleación adicionales. Los métodos de modificación superficial consisten en la implantación de iones para alterar la composición química del sustrato y así crear una capa sobre éste.

El borurado es un proceso termoquímico de endurecimiento superficial por difusión, el cual puede aplicarse a una amplia variedad de materiales ferrosos, no ferrosos y ceraméticos. Al igual que otros procesos, como el carburizado, el borurado se puede realizar en ambiente líquido, sólido o gaseoso; todo depende del estado de agregación en el que se encuentre el agente borurante (Davis, 2002).

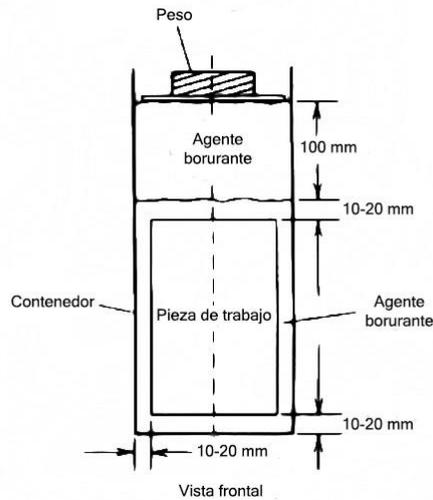


Figura 1.1. Diagrama del empaquetamiento en polvo de una pieza (Modificado de ASM Handbook Vol. 4, 1991).

El proceso de borurado por empaquetamiento en polvo es uno de los métodos más empleados y consiste en cubrir el elemento a borurar con polvo borurante para, posteriormente, ser colocado dentro de un horno, a través de un contenedor de acero. El proceso de borurado se realiza en un rango de temperatura de 700 a 1000 °C, con tiempo de exposición de 1 a 12 horas (ASM Handbook Vol.4, 1991). Si se va a borurar más de un elemento debe existir una separación de al menos 10 mm de polvo borurante entre cada elemento, y deben estar inmersos a una profundidad aproximada de 50 a 100 mm (figura 1.1). Con esto se garantiza que el borurado sea uniforme y que la formación y microestructura de la capa solo serán influenciados por el agente borurante, la temperatura y el material base.

Una vez terminado el tratamiento, el contenedor puede ser enfriado fuera del horno a temperatura ambiente. Algunas compañías especializadas en el proceso de borurado



recomiendan enfriar el contenedor bajo una atmósfera de gas (argón, nitrógeno o hidrógeno puro).

La ventaja de utilizar polvo como agente borurante es que se obtiene una capa de boruros de hierro de excelente calidad; además, se pueden borurar elementos pequeños. Los polvos de grano fino son ideales para tratar elementos con formas complejas. Entre más fino el polvo borurante, mejor es el contacto de éste con la superficie del material base.

El polvo borurante se puede reutilizar varias veces, si se combina con un porcentaje de polvo fresco (de 30 a 40%), en tratamientos que duren de 3 a 5 horas. Para tratamientos de larga duración (20 horas o más) se debe cambiar el polvo en su totalidad (Davis, 2002).

1.2 Agente borurante

El agente borurante en polvo se compone de una fuente activa de boro (B_4C), un diluyente (SiC) y un activador ($NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3 BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 y $Na_2B_4O_7$). Actualmente, existen mezclas comerciales de distintos grados, llamadas Ekabor[®]. A continuación se muestran las distintas granulometrías del polvo Ekabor[®]:

Tabla 1.1. Tamaño de grano de los distintos grados Ekabor[®] (Finchtl,1981).

Polvo	Tamaño de grano (μm)	Densidad de compactación (g/cm^3)
Ekabor [®] 1	≤ 150	1.90
Ekabor [®] 2	≤ 850	1.70
Ekabor [®] 3	≤ 1400	0.95
Ekabor [®] HM	≤ 150	0.95



Comercialmente es posible encontrar mezclas borurantes con las siguientes composiciones (Davis, 2002):

- 5% B_4C , 90% SiC , 5% KBF_4
- 50% B_4C , 45% SiC , 5% KBF_4
- 85% B_4C , 15% Na_2CO_3
- 95% B_4C , 5% $Na_2B_4O_7$
- 84% B_4C , 16% $Na_2B_4O_7$

1.3 Características de las capas boruradas

1.3.1 Dureza

La principal característica de las capas de boruros de hierro, obtenidas a través del proceso de borurado, es su extremada dureza (entre 1450 y 5000 HV). La alta dureza y el bajo coeficiente de fricción de las capas de boruros de hierro contribuyen, en gran medida, a combatir los principales mecanismos de desgaste como la adhesión, tribo-oxidación, abrasión y fatiga superficial (ASM Hndbook Vol.4, 1991).

1.3.2 Fases

De acuerdo con el diagrama de equilibrio hierro-boro se presentan dos tipos de boruros de hierro, FeB y Fe_2B .

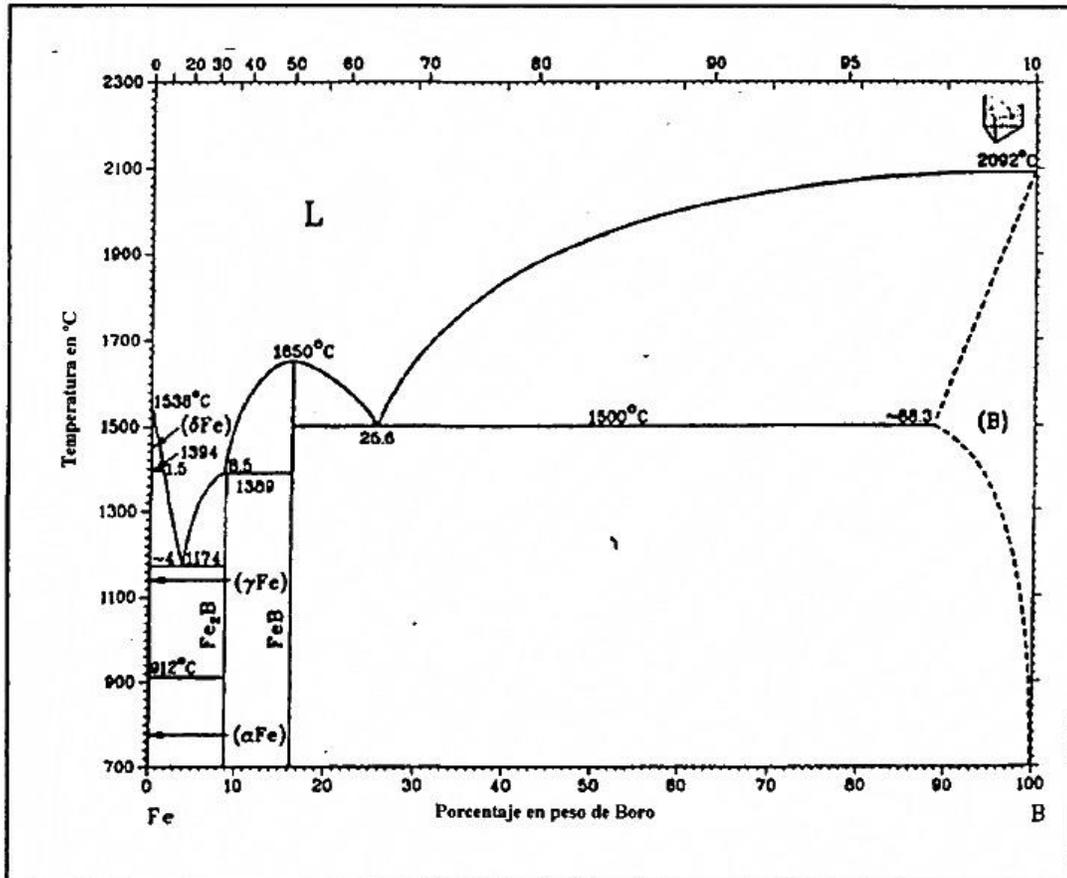


Figura 1.2. Diagrama de equilibrio hierro-boro (Fernández, 1999).

Ambas fases, en cuestión de propiedades tribológicas, son muy similares, siempre y cuando las porosidades de la superficie sean retiradas. Una capa delgada es mejor debido a que se desarrolla menos fragilidad, menos poros y menor desprendimiento de capa.



Tabla 1.2. Propiedades químicas y mecánicas de los boruros de hierro (Modificado de ASM Handbook Vol. 4, 1991).

Propiedades	Fase Fe ₂ B	Fase FeB
Microdureza (GPa)	18 - 20	19 - 21
Módulo de elasticidad (GPa)	285 - 295	590
Densidad (g/cm ³)	7.43	6.75
Coefficiente de expansión térmica (ppm/°C)	7.65 a temperaturas de entre 200 y 600 °C 9.2 a temperaturas de entre 200 y 600 °C	23 a temperaturas de entre 200 y 600 °C
Composición (% en peso de boro)	8.83	16.23
Estructura unitaria	Ortorrónica	Tetragonal centrada en el cuerpo
Parámetros de red (Å)	a = 5.079 c = 4.249	a = 4.053 b = 5.495 c = 2.946

1.3.3 Morfología

A continuación se presenta la clasificación de los distintos tipos de capas boruradas que se pueden obtener (Matushka, 1980):

- ✓ A: capa con una sola fase, FeB
- ✓ B: capa con dos fases, FeB y Fe₂B
- ✓ C: capa con dos fases, la fase FeB es más delgada que en la capa tipo B
- ✓ D: capa con dos fases, pero solo la fase FeB está aislada y aserrada



- ✓ E: capa con una sola fase, Fe_2B , con aserración marcada
- ✓ F: capa con una sola fase, Fe_2B , con aserración no tan marcada
- ✓ G: exclusivamente capa Fe_2B aserrada
- ✓ H: capa Fe_2B más aislada y aserrada
- ✓ I: zona de difusión
- ✓ K: capa degenerada
- ✓ L: capa con dos fases, FeB y Fe_2B , uniforme y sin aserraciones
- ✓ M: capa con una sola fase, Fe_2B , uniforme y sin aserraciones

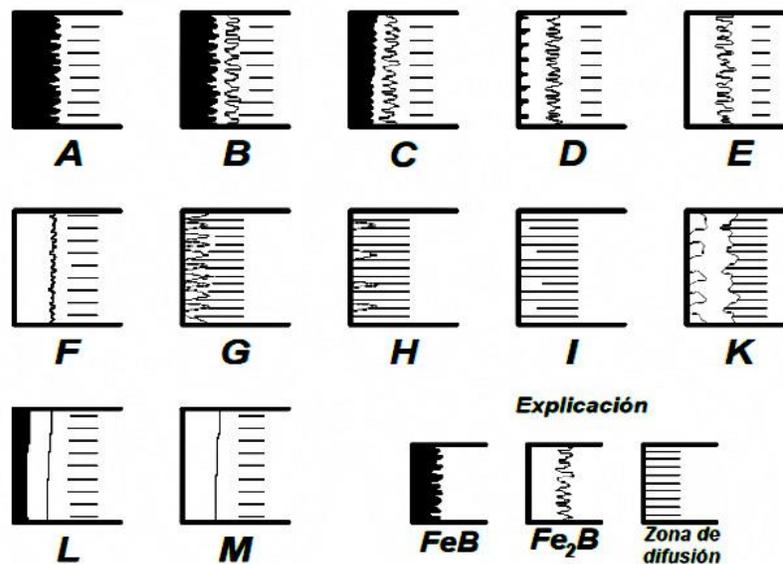


Figura 1.3. Tipos de capas boruradas (Carrera, 2014).

Los espesores de capa, comúnmente producidos, van de 50 a 250 μm para los aceros de bajo carbono y baja aleación, y de 25 a 76 μm para los aceros de alta aleación; espesores



de capa mayores a $89 \mu\text{m}$ en aceros inoxidables y altamente aleados no son recomendables, ya que no son económicamente redituables.

1.4 Influencia de los elementos de aleación

Los elementos aleantes juegan un papel importante en el proceso de borurado ya que de ellos dependen la morfología, el crecimiento y la composición de la capa de boruros de hierro.

La morfología de capa característica para el hierro puro, para los aceros no aleados de bajo contenido de carbono y para los aceros de baja aleación es la de tipo aserrada, mientras que para los aceros de alta aleación es la de tipo suave.

Los elementos aleantes, principalmente, retardan el crecimiento de la capa debido a que restringen la difusión de boro hacia el material. A continuación se presenta el efecto de los elementos aleantes en la capa de boruros de hierro (Davis, 2002):

- Carbono: no se disuelve significativamente en la capa y tampoco se difunde a través de ella. Durante el borurado, el carbono es llevado de la capa al sustrato (difunde lejos); el carbono y el boro forman borocementita.
- Silicón y aluminio: al igual que el carbono, estos elementos no son solubles en la capa y también son desplazados desde la capa hasta el sustrato, formando silicoboruros de hierro. Los aceros que tienen un alto contenido de estos elementos formadores de ferrita no deben ser utilizados para borurar, porque estos elementos aleantes reducen la resistencia al desgaste de la capa, debido a que forman una zona de ferrita muy suave debajo de la misma porque se da el efecto de cáscara de huevo en la capa.



-
-
- Níquel: ocasiona que se reduzca la adhesión de la capa en el sustrato y el espesor de la capa. Este elemento aleante se concentra debajo de la capa de boruros de hierro.
 - Cromo: modifica, considerablemente, la estructura y propiedades de la capa de boruros de hierro. Conforme más contenido de cromo haya en el material base, mayor producción de compuestos de reacción ricos en boro, disminución del espesor de la capa y una mayor tendencia a formar una capa con morfología plana o suave en la interfaz de la capa y el sustrato. También, se ha observado, en ciertos aceros, una reducción del espesor de la capa.
 - Tungsteno, molibdeno y vanadio: reducen el espesor de la capa y, en aceros al carbono, aplanan la morfología aserrada.

1.5 Proceso de borurado en aceros herramientales

El tratamiento termoquímico de borurado es mayormente utilizado en aceros herramientales y otros sustratos que, previamente, fueron endurecidos mediante un tratamiento térmico.

En los aceros herramientales, el proceso de borurado normalmente se realiza a una temperatura de 540 °C. A temperaturas mayores, de hasta 1090 °C, la velocidad de difusión aumenta, reduciendo así el tiempo del tratamiento. Una vez terminado el tratamiento no es necesario enfriar bruscamente la pieza para que ésta alcance su dureza máxima; pero, en el caso de los aceros herramientales tratados en el rango de su temperatura de austenización, sí es necesario un enfriamiento rápido para endurecer, también, el sustrato.

Del proceso de borurado en aceros aleados resulta la formación de una capa de boruros de hierro de una fase (Fe_2B) o dos fases ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$), con composiciones definidas. La fase



FeB es frágil y en ella predominan esfuerzos tensiles, mientras que la fase Fe₂B es menos frágil y hay altos esfuerzos compresivos. La microdureza de la capa también depende, en gran medida, de su composición y estructura, al igual que de la composición del substrato (Davis, 2002).

Genel K. (2006) boruró un acero AISI H13 utilizando Ekabor[®] 1 como medio borurante. El proceso de borurado se realizó a una temperatura de 1000 °C, con un tiempo de exposición de 3 horas. Con las condiciones experimentales anteriores se obtuvo una capa de boruros de hierro bifásica (Fe₂B + FeB), con un espesor aproximado de 64 μm y con una morfología semiaserrada. En este acero borurado se alcanzó una dureza promedio de 2000 HV, 3.5 veces más que en el substrato (570 HV).

Genel atribuye la morfología semiaserrada de la capa al alto contenido de cromo en el acero AISI H13.

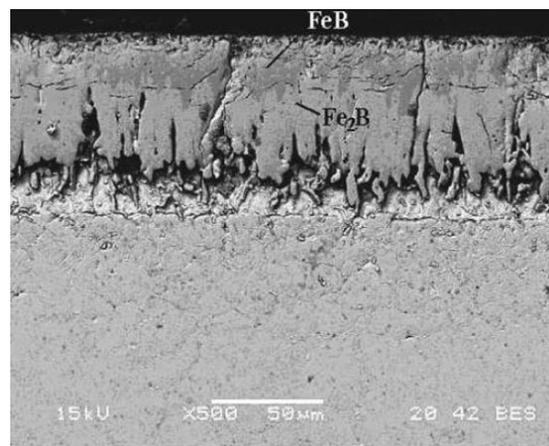


Figura 1.4. Acero AISI H13 borurado con Ekabor[®] 1 a 1000 °C durante 3h. Se observa una morfología semiaserrada (Genel, 2005).



En la investigación de Campos-Silva y cols. (2011), se evaluó la cinética de crecimiento y la difusión de boro en un acero de alta aleación. Fue borurado un acero AISI M2 a 900 y 1050 °C durante 8 y 6 horas, respectivamente; se obtuvo una capa de dos fases, con morfología plana. Para este caso, los elementos aleantes del material actuaron como una barrera de difusión, reduciendo el índice de crecimiento de la capa de boruros de hierro.

De los resultados de las pruebas de XRD se observó que el cromo y el vanadio tienden a disolverse en la capa, formando boruros independientes, con una estructura similar a la de los boruros de hierro.

Otros estudios sugieren que el cromo se acumula en la región más externa de la capa; mientras que el molibdeno es menos propenso a disolverse, concentrándose en la parte baja de la capa superficial.

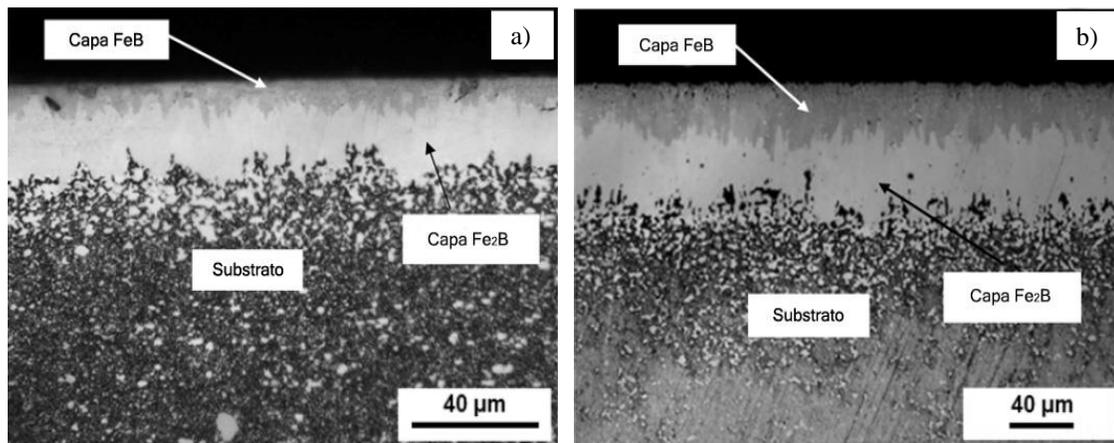


Figura 1.5. Vista en sección transversa de las capas FeB y Fe₂B formadas en un acero AISI D2 a a) 900 °C durante 8 horas y b) 1050 °C durante 6 horas (Modificado de Campos y cols., 2011).



Por otra parte, Keddam y cols., (2014) también boruraron un acero AISI H13, pero a 900 °C durante 2, 4, 6 y 8 horas, formándose una capa monofásica (solo Fe₂B). Para todas las condiciones se utilizó polvo DURBORID® fresco y se obtuvo una morfología con tendencia plana. El autor atribuye este tipo de morfología a los elementos aleantes del material, debido a que los elementos de aleación modifican la morfología de la interfaz (capa/substrato), y se concentran en la parte más baja de la capa generando una morfología de capa plana. La concentración de los elementos de aleación disminuye la difusión de boro activo a través de la reducción del espesor de capa.

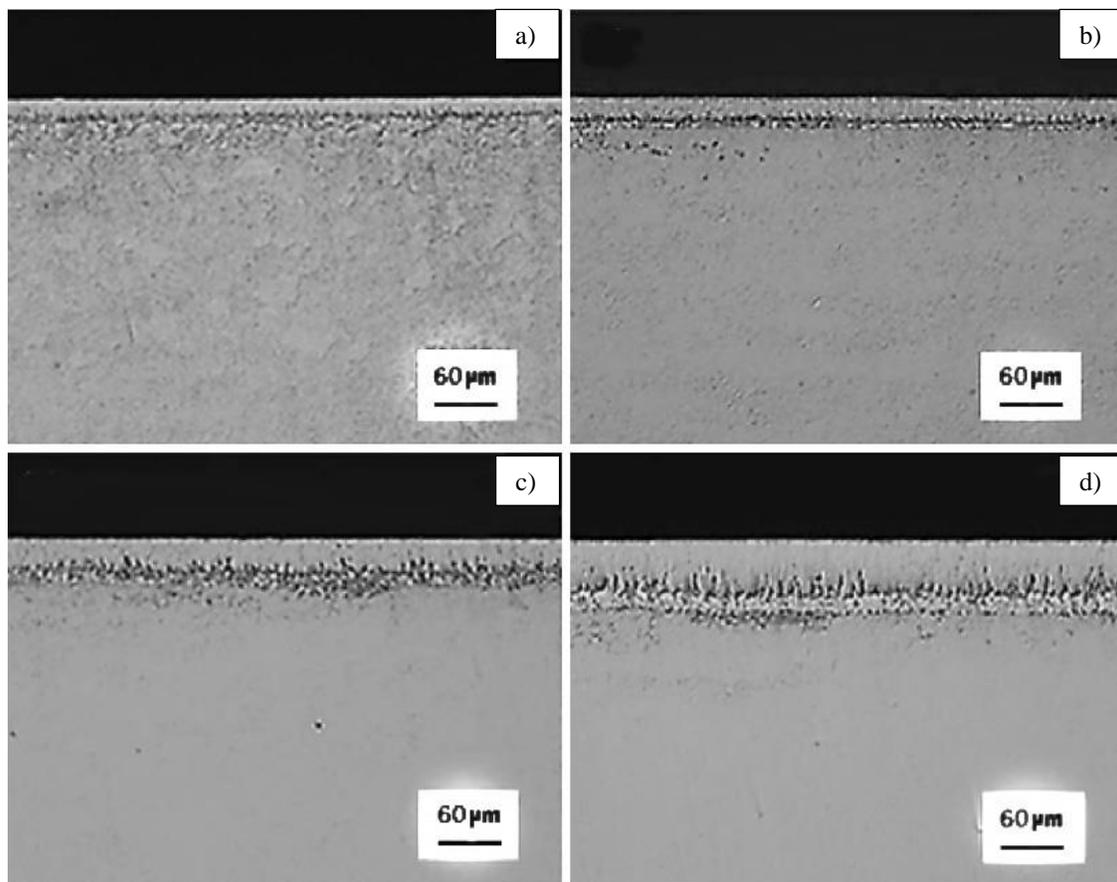


Figura 1.6. Micrografías de las capas boruradas de un acero AISI H3, borurado a 900 °C durante a) 2, b) 4, c) 6 y d) 8 horas (Keddam y cols., 2014).



Capítulo II

Desgaste

2.1 Tipos de desgaste

El desgaste es un fenómeno superficial y se define como deterioro gradual de un material o componente mecánico sometido a un contacto deslizante o rodante. Existen diversos tipos de desgaste, pero los tres principales son: el desgaste abrasivo, el desgaste adhesivo y el desgaste por rozamiento (fretting). Todo proceso de desgaste se define a partir de las características del movimiento relativo entre dos superficies.

El desgaste abrasivo es el desgaste más común a nivel industrial y se presenta cuando partículas suspendidas o diminutas asperezas se deslizan bajo presión contra otra superficie, ocasionando desplazamiento de material y produciendo pequeñas virutas o astillas. La superficie resultante se caracteriza por la existencia de rayaduras. El desgaste adhesivo se presenta cuando diminutas asperezas, de dos superficies distintas que están en contacto, se funden y adhieren (microsoldaduras) entre sí, dicho contacto crea una unión adhesiva. Durante este proceso se crean grandes esfuerzos normales, lo que causa deformación plástica en las uniones. El desgaste adhesivo es un fenómeno que inicia a pequeña escala, pero se intensifica rápidamente a medida que transcurre el tiempo. Finalmente, el desgaste por rozamiento es muy similar al desgaste adhesivo, en ambos se producen microsoldaduras; la diferencia radica en que las superficies de contacto se someten a movimientos cíclicos pequeños. En todo proceso de desgaste existe fricción (Hernández, 2002, Kalpakjian, 2008 y Wulpi, 1999).

La fricción y el desgaste son fenómenos difíciles de explicar debido a que dependen de las características de las superficies de contacto. Las características de las superficies están determinadas por la estructura cristalina del material, los óxidos que se forman como



resultado de la interacción con la atmósfera, irregularidades geométricas, vapor de agua y otras impurezas que se encuentran en el medio ambiente.

2.2 Fricción

La fuerza de fricción es la fuerza tangencial necesaria para generar un movimiento relativo entre los cuerpos, bajo una fuerza normal. La fuerza de fricción es necesaria para superar la fuerza de fricción estática que se opone al movimiento. Para mantener el movimiento entre dos cuerpos que están en contacto es necesario aplicar una fuerza tangencial que supere el coeficiente de fricción cinética (Straffelini, 2015).

2.3 Mecanismos de desgaste

El proceso de desgaste se define a partir de las características del movimiento relativo entre dos superficies. Si dos cuerpos se deslizan entre sí, el proceso de desgaste resultante será desgaste **por deslizamiento**. Si ruedan entre sí, el proceso de desgaste es **por rodamiento**. Y si se presenta un tipo de desgaste en el que se combinen los dos tipos de movimiento anteriores, el proceso de desgaste será del tipo **deslizamiento-rodamiento**. Cuando existe deslizamiento recíprocante a pequeños desplazamientos, el proceso de desgaste resultante será **por fricción**. Cuando un cuerpo que consta de una o más partículas duras desgasta a una superficie suave, el desgaste se llamará **abrasión** por dureza. Si un fluido transporta esas partículas abrasivas, el desgaste será **erosivo**.

En todo proceso de desgaste predominan uno o más mecanismos de desgaste, y existen principalmente cuatro:



- 1) Desgaste adhesivo
- 2) Desgaste por tribo-oxidación
- 3) Desgaste abrasivo
- 4) Desgaste por fatiga de contacto

La deformación plástica no se considera como un mecanismo de desgaste, pero sí tiene mucha importancia en el proceso.

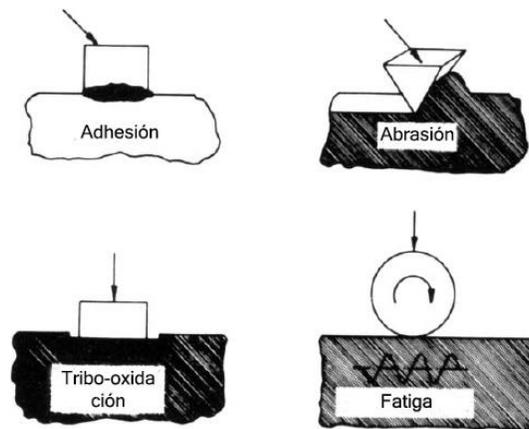


Figura 2.1. Mecanismos de desgaste (Modificado de Tribology Series, 1987).

2.3.1 Desgaste adhesivo

2.3.1.1 Desgaste adhesivo en materiales dúctiles

En los materiales dúctiles se crean uniones durante el deslizamiento, debido al contacto entre las asperezas y valles existentes en el material. La adhesión se presenta en las uniones formadas que, incluso, llegan a ser más resistentes que las mismas asperezas.



Experimentalmente se ha observado que, durante el deslizamiento entre dos superficies, ocurren diferentes fenómenos. Primero, las repetidas deformaciones plásticas en las asperezas pueden inducir daño por fatiga de bajo ciclo o una acumulación de deformación plástica por trinquete. Otro fenómeno muy común es que algunos fragmentos de desgaste queden atrapados entre las superficies.

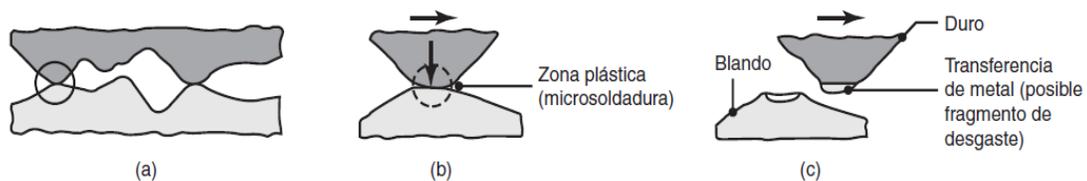


Figura 2.2. a) Dos asperezas en contacto, b) adhesión entre dos asperezas y c) formación de una partícula de desgaste (Kalpakjian, 2008).

2.3.1.2 Desgaste adhesivo en materiales frágiles

La adhesión en las asperezas de las superficies induce esfuerzos tensiles superficiales durante el deslizamiento; estos esfuerzos, en conjunto con la fragilidad de las superficies, forman fragmentos de desgaste. En el desgaste adhesivo de materiales frágiles, la tenacidad a la fractura juega un papel fundamental. Este mecanismo de desgaste es característico en los materiales cerámicos.

2.3.2 Desgaste por tribo-oxidación

Este mecanismo de desgaste se debe a la interacción de las superficies con el oxígeno presente en el medio ambiente. La tribo-oxidación es el resultado de la combinación de la acción oxidativa y la acción mecánica sobre el contacto en las asperezas, se caracteriza



por la formación de una superficie de óxido lo cual evita el contacto entre metal y metal; actúa como una película sólida lubricante. Con esto se reducen la fricción y el desgaste.

Durante el contacto entre las asperezas se generan fragmentos de desgaste por adhesión (algunos salen del sistema tribológico y otros permanecen atrapados entre las superficies). Dichos fragmentos son endurecidos por deformación, fracturados, oxidados y aglomerados. Si las condiciones de deslizamiento y la carga son intensos, se forma una capa tribológica compacta. Si la temperatura es lo suficientemente alta se forma un esmalte protector en la superficie de la capa (por sinterizado). Mediante la posible fractura frágil de las fases se vuelven a formar fragmentos (se repite el ciclo).

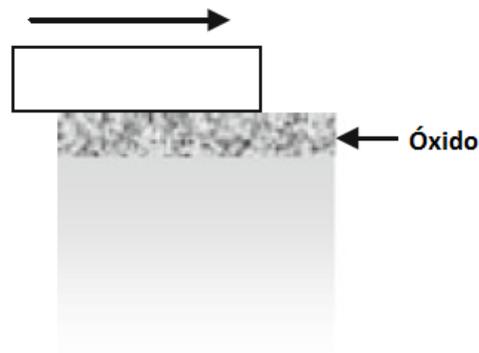


Figura 2.3. Tribo-oxidación (Modificado de Straffelini, 2015).

2.3.3 Desgaste abrasivo

Existen dos tipos de interacción abrasiva: la abrasión de dos cuerpos y la abrasión de tres cuerpos. En el primer caso una partícula dura penetra plásticamente a otra menos dura haciendo ranuras en él. En la abrasión de tres cuerpos las partículas duras atrapadas entre las superficies de contacto rotan libremente.

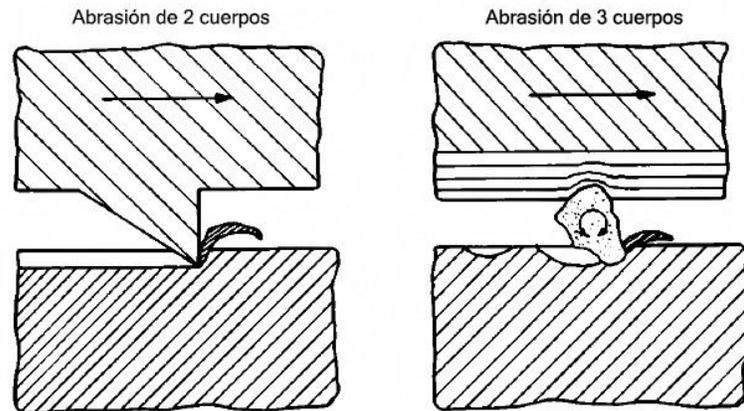


Figura 2.4. Tipos de abrasión (Modificado de Tribology Series, 1987).

2.3.3.1 Desgaste abrasivo en materiales dúctiles

Si el material deformado plásticamente es removido, el desgaste es por microcorte y es máximo. Si el material deformado plásticamente es confinado a los lados del canal, el desgaste es por microarado y será cero, aun y cuando la superficie esté demasiado dañada.

En presencia de lubricación, el lubricante puede remover los fragmentos de desgaste evitando su acumulación y evitando la acción abrasiva de las partículas. En resumen, un lubricante reduce la fricción, lo que favorece el desgaste por microcorte.

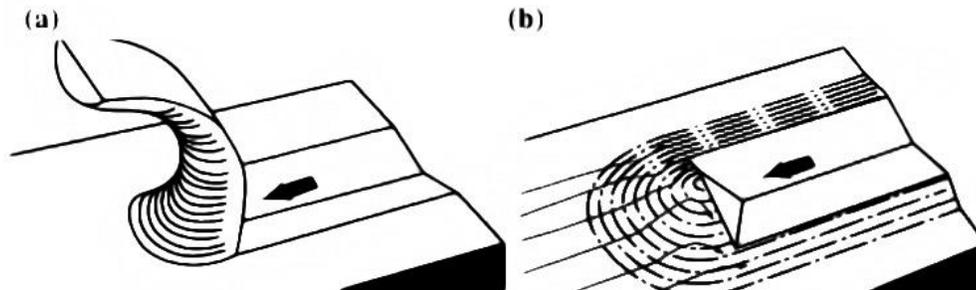


Figura 2.5. Abrasión en materiales dúctiles por a) microcorte y b) microarado (Straffelini, 2015).

2.3.3.1 Desgaste abrasivo en materiales frágiles

En este tipo de desgaste abrasivo se presenta un mecanismo propuesto por Lawn y Swain, el cual consiste en la generación y propagación de grietas radiales y laterales a partir de una deformación plástica local en el material.

A – Nucleación de una grieta

B – Apertura de la grieta (perpendicular a la superficie de desgaste)

C – Efecto de los esfuerzos residuales locales

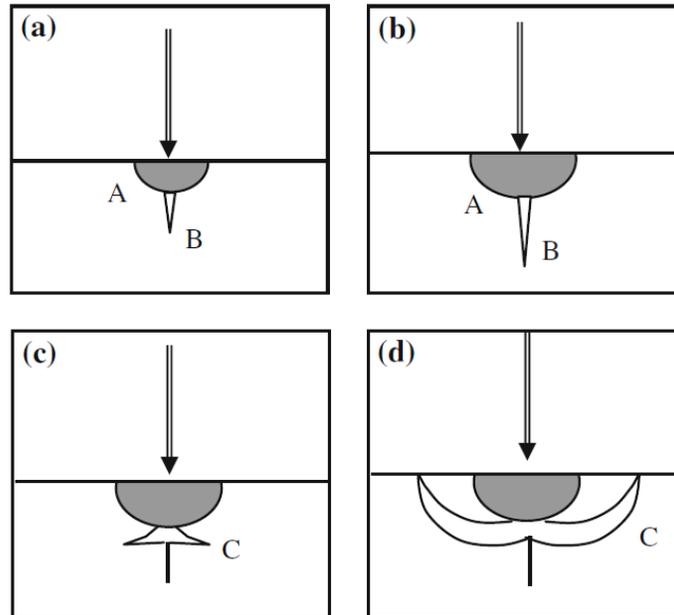


Figura 2.6. Formación de grietas radiales y laterales por el mecanismo de Lawn y Swain. a) deformación plástica generada a partir del contacto angular, b) propagación de la grieta conforme se aumenta la carga aplicada, c) cierre de la grieta perpendicular y formación de nuevas grietas radiales debido a la remoción de la carga y d) astillamiento cuando las grietas llegan a la superficie (Straffelini, 2015).

2.3.4 Desgaste por fatiga de contacto

El fenómeno de contacto siempre está caracterizado por grandes deformaciones plásticas y por la remoción de material, desde el inicio. En este mecanismo de desgaste la falla por fatiga está presente. Primero, se aplica una carga cíclica y se da la nucleación y propagación de grietas hasta la fractura total. Aquí, los fragmentos de desgaste se crean después de unos ciclos. Por lo general, el proceso de desgaste se lleva a cabo bajo deformaciones plásticas a pequeña escala, por lo que la región desgastada está libre de grandes deformaciones plásticas a nivel macroscópico (Straffelini, 2015).

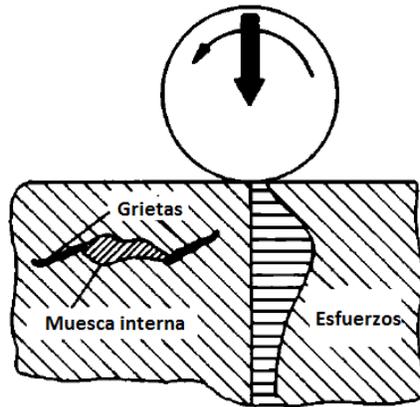


Figura 2.7. Nucleación y propagación de grietas en la fatiga de contacto (Modificado de Tribology Series, 1987).

2.4 Efecto de la lubricación

La presencia de una película lubricante entre dos superficies de contacto reduce la fricción y desgaste entre éstas; además, evita el contacto directo entre las asperezas de las superficies reduciendo así el esfuerzo cortante promedio en las uniones. También, los valores de desgaste que se registran son muy bajos debido a la ausencia de contacto entre superficies.

En condiciones de desgaste lubricado es muy difícil que se presente el mecanismo de desgaste por tribo-oxidación, debido a que el lubricante reduce la disponibilidad de oxígeno en las regiones de contacto.

Además del empleo de lubricantes, también se pueden realizar tratamientos termoquímicos sobre la superficie de un material, con el fin de mejorar su resistencia al desgaste (Tribology Series, 1987).



2.5 Pruebas de desgaste

Para la evaluación de la fricción y el desgaste de un sistema tribológico específico, se deben seleccionar, cuidadosamente, el tipo de prueba y equipo a utilizar, ya que parámetros como el material de las superficies de contacto, el tipo de contacto y las características de las superficies juegan un rol importante. Existen distintas configuraciones para ensayos de desgaste, entre las que se encuentran: reciprocante lineal, perno sobre disco, bloque sobre anillo, disco sobre disco, cuatro esferas, perno de abrasión, entre otras.

Comúnmente, las pruebas de desgaste reciprocante lineal se realizan en tribómetros, los cuales cuentan con sensores que registran la temperatura, el comportamiento del coeficiente de fricción y la variación de la carga aplicada, con respecto al tiempo, principalmente. Este tipo de prueba consiste en hacer deslizar una esfera sobre una superficie plana a través de un movimiento de vaivén, durante un tiempo y una distancia de deslizamiento específicos. La prueba de desgaste reciprocante lineal se rige por la norma ASTM G133-05.

Si el equipo con el que se está trabajando no proporciona resultados de desgaste es necesario realizar, también, estudios de perfilometría para poder determinar el volumen perdido y la profundidad máxima alcanzada durante la prueba para, posteriormente, poder evaluar la tasa de desgaste.

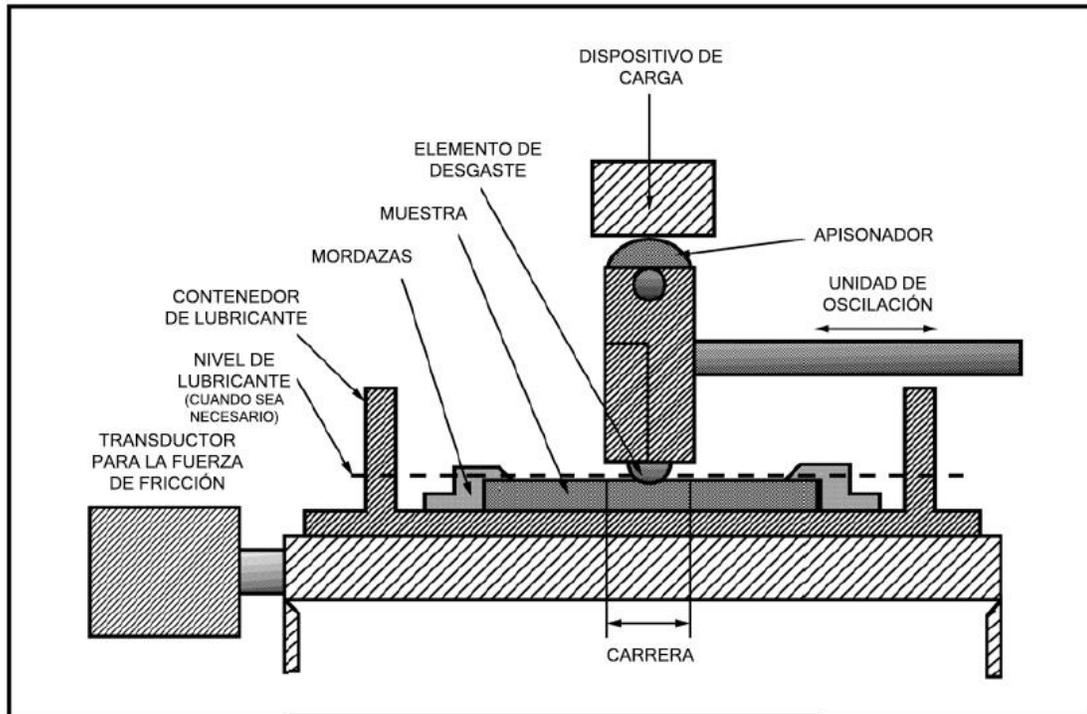


Figura 2.8. Representación esquemática del equipo utilizado para pruebas de desgaste recíprocante (Modificado de la norma G133-05, 2010).



Capítulo III

Desarrollo experimental

3.1 Tratamiento termoquímico de borurado en polvo del acero AISI H13

Para el tratamiento termoquímico de borurado se cortaron muestras de acero AISI H13 con diámetro de 19.4 mm y 5 mm de ancho. La composición química de este acero se muestra en la Tabla 3.1. Una vez cortadas las muestras, se procedió a prepararlas para el proceso de borurización. El proceso de preparación consistió en desbastar las muestras (ambos lados) con lijas de los números 80, 120, 180, 220, 320, 400, 600, 1000, 1500 y 2000, posteriormente, se realizó un pulido con alúmina y sílica coloidal, con tamaño de partícula de 0.3 y 0.015 μm , respectivamente.

Tabla 3.1. Composición química del acero AISI H13 de acuerdo al vendedor (Aceros Fortuna).

C	Si	Cr	Mo	V
0.35%	1.00%	5.10%	1.50%	1.00%

Las muestras se empaquetaron en un contenedor de acero AISI 304L junto con el agente borurante (Ekabor[®] 2). Se procuró que entre cada muestra existiera por lo menos 10 mm de separación. Ya colocadas las muestra y el agente borurante, se cerró el contenedor y se introdujo en un horno Felisa para un precalentamiento a 600 °C. Después del precalentamiento, el contenedor se introdujo en un horno Lindberg, a una temperatura de 950 °C, con un tiempo de exposición de 6 h. El contenedor fue enfriado a temperatura ambiente.



Figura 3.1. Hornos convencionales a) Felisa y b) Lindberg, utilizados para el tratamiento termoquímico de borurado.

Una de las muestras boruradas fue seccionada y montada en polvo fenólico para realizar un proceso metalográfico sobre ella. El proceso metalográfico consistió en realizar el mismo proceso de desbaste y pulido que se mencionó anteriormente; para el revelado de las capas FeB y Fe₂B, se realizó un ataque químico con nital al 2% durante 8 seg.

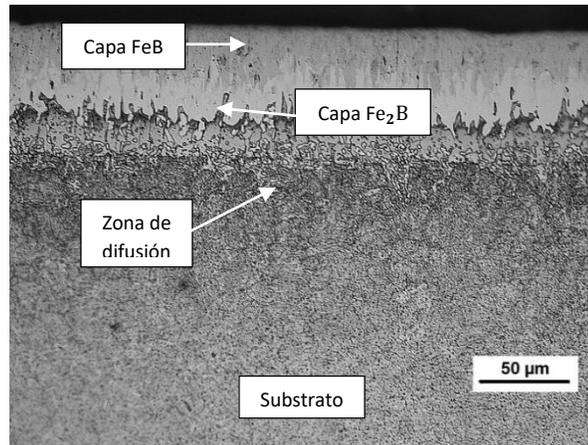


Figura 3.2. Identificación de las capas formadas sobre la superficie de un acero AISI H13, borurado a una temperatura de 950 °C, y con un tiempo de exposición de 6 h.

La observación y determinación de los espesores de las fases creadas sobre el acero AISI H13, se realizó mediante un microscopio Olympus GX51 y el software Image Pro Plus v6.0.

Para la medición de los espesores de capa, y debido a la morfología de las capas de boruros de hierro presente en este acero, se consideraron crestas y valles; además, se realizaron un total de 300 mediciones en cada fase.

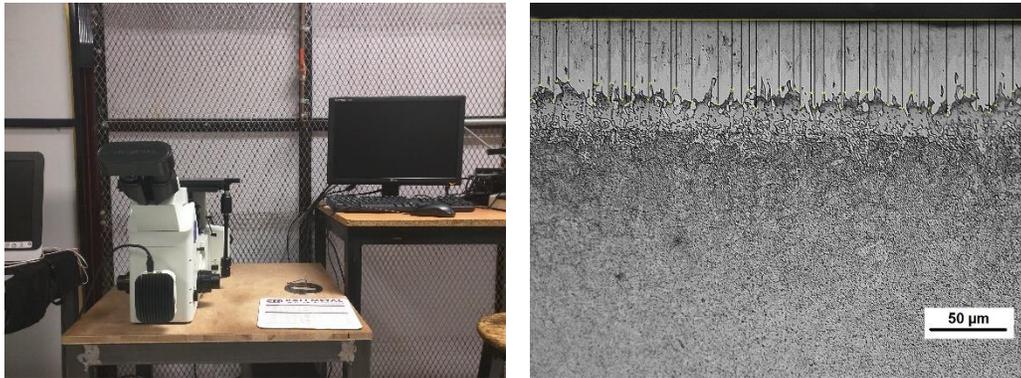


Figura 3.3. a) Microscopio Olympus GX51 utilizado para la observación de las capas boruradas. b) Metodología utilizada para la medición de los espesores de capa.

Para las fases FeB y Fe₂B + FeB se obtuvieron espesores promedio de 34 ± 2 y 51 ± 5 µm, respectivamente.

3.2 Caracterización de las capas de boruros de hierro

3.2.1 Prueba de difracción de rayos X (XRD)

Con el fin de verificar la presencia de compuestos intersticiales base boro en la superficie del acero AISI H13, se realizó una prueba de difracción de rayos X, a ángulo normal, sobre la superficie de una muestra borurada, utilizando una lámpara de cobalto y una longitud de onda de 1.79 Å; esta prueba se realizó con un difractómetro X'PERT PRO PANalytical (Figura 3.4).

Para la prueba de XRD fue necesario desbastar la muestra borurada con lijas del número 1000, 1500 y 2000.



Figura 3.4. Difractómetro utilizado para la prueba de XRD.

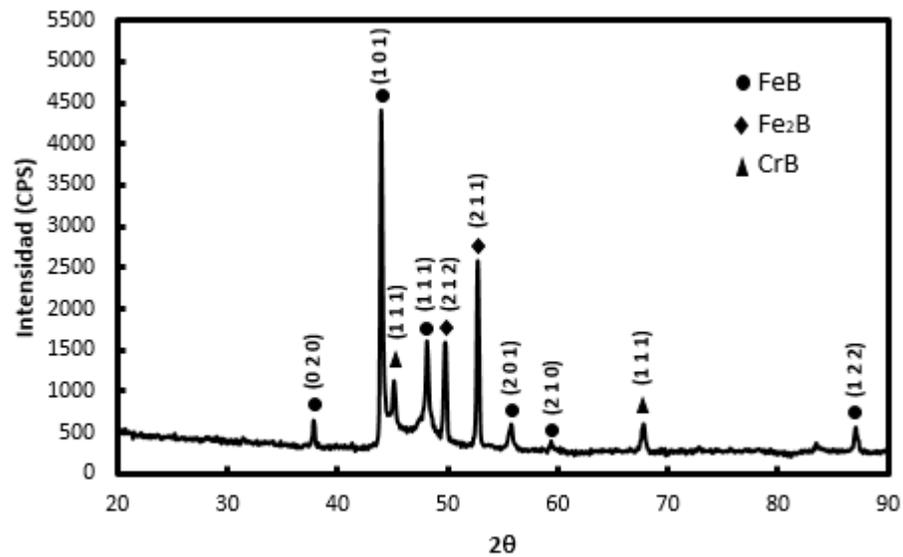


Figura 3.5. Difractograma obtenido de la prueba de XRD sobre el acero AISI H13 borurado.



Los picos con mayor intensidad se registran a 44° y 52° , aproximadamente. Con el espectro resultante (Figura 3.5) se comprueba la presencia de las capas FeB y Fe₂B, además del compuesto intersticial CrB, el cual se encuentra disuelto en la capa de boruros de hierro del acero AISI H13 borurado.

3.2.2 Pruebas de microdureza y evaluación de los esfuerzos residuales en las capas de boruros de hierro

Con el fin de determinar la dureza de las capas FeB y Fe₂B, se realizaron microindentaciones en la sección transversal (desde la superficie hasta el sustrato) de una muestra de acero AISI H13 borurado, utilizando un indentador Tipo Vickers y siguiendo el procedimiento experimental establecido por la norma ASTM E2546-07. Las microindentaciones se realizaron a una distancia de 15 μm desde la superficie, empleando a una carga constante de 500 mN. Se utilizaron 3 microindentaciones para determinar la dureza de cada capa borurada.

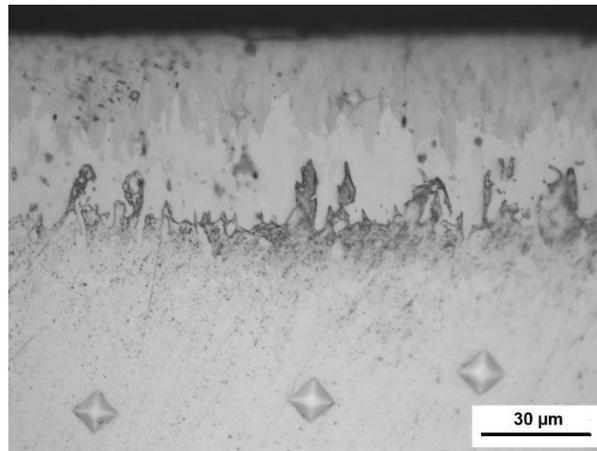


Figura 3.6. Microindentaciones realizadas transversalmente, empleando una carga de 500 mN, en un acero AISI H13, borurado a 950 °C durante 6 horas.

Con los datos obtenidos experimentalmente con el equipo de pruebas, como la dureza, módulo de elasticidad, profundidad máxima y la carga aplicada, y aplicando el modelo de Chen y cols. (2008), se estimaron los esfuerzos residuales de las capas FeB y Fe₂B.

3.2.3 Pruebas de desgaste recíprocante lineal sobre las superficies de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado

Se realizaron pruebas de desgaste recíprocante lineal en muestras de aceros AISI H13 y AISI H13 borurado, en ambiente seco y húmedo. Las superficies de las muestras de ambos aceros se desbastaron y pulieron hasta alcanzar un acabado superficial tipo espejo. Para las muestras de acero AISI H13 se utilizaron lijas de los números 80, 120, 180, 220, 320, 400, 600, 1000, 1500 y 2000, mientras que para las de acero AISI H13 borurado se ocuparon de los números 1000, 1500 y 2000; el pulido se realizó con alúmina y sílica coloidal.



Figura 3.7. Equipo de pruebas UMT-2 utilizado en las pruebas de desgaste recíprocante lineal.

La prueba de desgaste recíprocante lineal se rige por la norma ASTM G133-05, por lo que se tomaron en consideración las recomendaciones propuestas en dicho documento.

Parámetros como la carga aplicada, distancia y velocidad de deslizamiento, y la carrera, se seleccionaron a partir del equipo de pruebas con el que se dispone en el Grupo Ingeniería de Superficies® (Figura 3.7). Las condiciones experimentales utilizadas para las pruebas de desgaste recíprocante lineal, en ambiente seco y húmedo se presentan en la siguiente tabla:



Tabla 3.2. Condiciones experimentales para cada condición de desgaste.

Condiciones experimentales	Ambiente seco	Ambiente húmedo*
Muestras	AISI H13/AISI H13 borurado	AISI H13/AISI H13 borurado
Rugosidad superficial	0.02 μm aprox.	0.06 μm aprox.
Contracuerpo	Bola de alúmina (\varnothing 6 mm)	Bola de alúmina (\varnothing 6 mm)
Cargas aplicadas	10, 15, 20 y 25 N	75, 100, 125 y 150 N
Carrera	10 mm	10 mm
Distancia de deslizamiento	100 m	100 m
Velocidad de deslizamiento	30 mm/s	30 mm/s
Frecuencia de oscilación	3.0 Hz	3.0 Hz

*En la condición de desgaste húmedo, se utilizó un aceite automotriz monogrado SAE W-40 y un contenedor.



Figura 3.8. Contenedor de acero inoxidable AISI 316L utilizado para las pruebas de desgaste recíprocante lineal, en ambiente húmedo.

Para generar repetitividad en las pruebas de desgaste recíprocante lineal, por lo menos se realizaron 5 repeticiones para cada condición de carga. Cada prueba tuvo una duración de 1 hora con 15 minutos, aproximadamente.

Con estas pruebas se obtuvieron los coeficientes de fricción promedios para cada condición de carga y desgaste.

3.2.4 Estudios de perfilometría óptica sobre los canales de desgaste

Una vez concluidas las pruebas de desgaste recíprocante, en ambiente seco y húmedo, se estimó el volumen perdido y las profundidades de los canales de desgaste, por medio de un perfilómetro óptico (Figura 3.9) y el software Vision 64.

Lo primero que se realizó fue la reconstrucción de todos los canales de desgaste, ésto se logró digitalizando y uniendo las imágenes que se obtenían, de los barridos que se hacían a lo largo de dichos canales, con un objetivo de 5x.



Figura 3.9. Perfilómetro óptico Bruker ContourGT-K.

Durante la digitalización de las imágenes se variaron los parámetros de Backscan y Length. El Backscan se varió entre 10 y 70 μm , y el Length entre 25 y 60 μm . Además, se utilizó el filtro Data Restore.

Para la estimación de los volúmenes perdidos, se utilizó el filtro Mask Data y la herramienta Volume. En la parte superior de la siguiente imagen (Figura 3.10) se aprecia un canal de desgaste, reconstruido por perfilometría óptica, y en la parte inferior las profundidades en los ejes x (derecha) y y (izquierda).

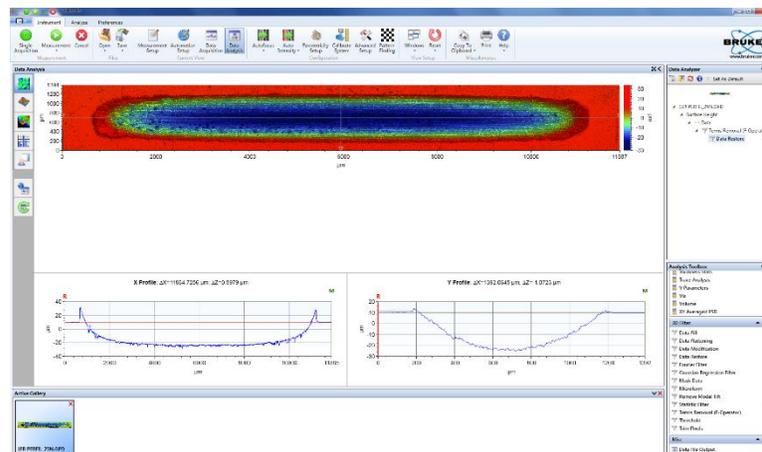


Figura 3.10. Reconstrucción de un canal de desgaste, realizado sobre la superficie de un acero AISI H13 en ambiente seco y aplicando una carga de 25 N.

De las condiciones experimentales utilizadas para las pruebas de desgaste y con los volúmenes perdidos obtenidos por perfilometría, se determinaron las tasas de desgaste, de acuerdo a la norma G133-05.

3.2.5 Estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS) en los canales de desgaste y la bola de alúmina

Los estudios de SEM y EDS se emplearon para identificar los mecanismos de desgaste presentes en los canales de desgaste y la bola de alúmina. Se tomaron microfotografías a aumentos de 55, 150, 1000 y 2500x, además se utilizó el filtro de electrones retrodispersados.

El aumento de 55x se utilizó para hacer un barrido completo de todos y cada uno de los canales de desgaste de cada condición de desgaste. Los aumentos de 150, 1000 y 2500x, se utilizaron para identificar los mecanismos de desgaste predominantes en cada perfil de



desgaste; dichos aumentos solamente se aplicaron en el centro y los extremos de cada canal de desgaste.



Figura 3.11. Microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6360LV, utilizado para los estudios de SEM y EDS sobre los canales de desgaste y la bola de alúmina.

Las micrografías de los canales de desgaste se realizaron a alto vacío (Hv) y las de la bola de alúmina a bajo vacío (Lv), esto se debió al tipo de material.



Capítulo IV

Resultados y discusiones

4.1 Morfología de la capa de boruros de hierro formada en un acero AISI H13

La morfología de capa obtenida sobre la superficie de acero AISI H13 borurado y presentada en la sección 3.1, es de característica semiaserrada. Además, de acuerdo a la clasificación de Matushka (1980) la capa es de tipo F.

El tipo de morfología semiaserrada es característica de los aceros altamente aleados, debido a la gran cantidad de elementos de aleación en éstos. Elementos como el cromo y vanadio, aunque son capaces de disolverse en la capa borurada, tienden a modificar la morfología de la capa borurada, mientras que el molibdeno y el silicio al ser elementos menos propensos a disolverse, se concentran en la parte más baja de la capa de boruros de hierro, generando así una morfología de capa más plana.

Los elementos de aleación también afectan el proceso de crecimiento de capa, debido a que reducen la difusión de átomos de boro sobre los intersticios de la estructura cristalina del hierro, ocasionando una reducción en el espesor de capa total obtenido.

De acuerdo a las micrografías presentadas por Keddani y cols., (2014) para un acero AISI H13, borurado a 950 °C, a un tiempo de exposición de 6 horas (Figura 1.6c), se puede observar que la morfología de la capa obtenida es muy similar a la que se presenta en este trabajo de investigación (Figura 3.2). De lo anterior se concluye que la morfología de capa semiaserrada es característica del acero AISI H13 borurado.



4.2 Dureza y esfuerzos residuales de las capas boruradas

Los valores de las durezas y de los esfuerzos residuales de las capas FeB y Fe₂B, obtenidas sobre un acero AISI H13, borurado a 950 °C y con un tiempo de exposición de 6 horas, se presentan a continuación:

Tabla 4.1. Durezas y esfuerzos residuales de la capas boruradas creadas sobre la superficie de un acero AISI H13, borurado a 950 °C durante 6 horas.

Zona	Dureza (GPa)	Esfuerzos residuales (GPa)
FeB	18.73 ± 0.65	+5.55 ± 0.01
Fe ₂ B	15.56 ± 0.80	-2.77 ± 0.14
Substrato	5.66 ± 0.14	+0.32 ± 0.03

De la Tabla 4.1 se observa que el valor de la dureza va disminuyendo conforme se adentra en el material y de acuerdo a Genel, (2006) el decremento en la dureza puede ser adscrito a la concentración de átomos de silicio en la parte inferior de la capa borurada. También, influye la presencia de elementos de aleación formadores de ferrita (cromo y silicio), en la interfaz entre la capa borurada y el substrato, ya que estos elementos tienden a formar una zona de transición suave; la cantidad de silicio migrado a la parte inferior de la capa determina la proporción de ferrita en la zona de transición. Los valores de dureza para FeB y Fe₂B están acorde con los presentados por este autor (entre 16.5 y 20 GPa).

En general, se puede concluir que las durezas de las capas FeB y Fe₂B se ven afectadas debido al alto contenido de silicio del acero AISI H13 y a la baja solubilidad de éste elemento de aleación en la capa borurada.



La naturaleza de los esfuerzos residuales tiende a afectar el proceso de desgaste. Los esfuerzos tensiles propician la nucleación y propagación de grietas en el material. Por otra parte, los esfuerzos residuales de tipo compresivo evitan la propagación de todas aquellas grietas que se formen en la región de contacto, durante el desgaste por deslizamiento.

4.3 Caracterización tribológica de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado en ambiente seco

4.3.1 Coeficiente de fricción

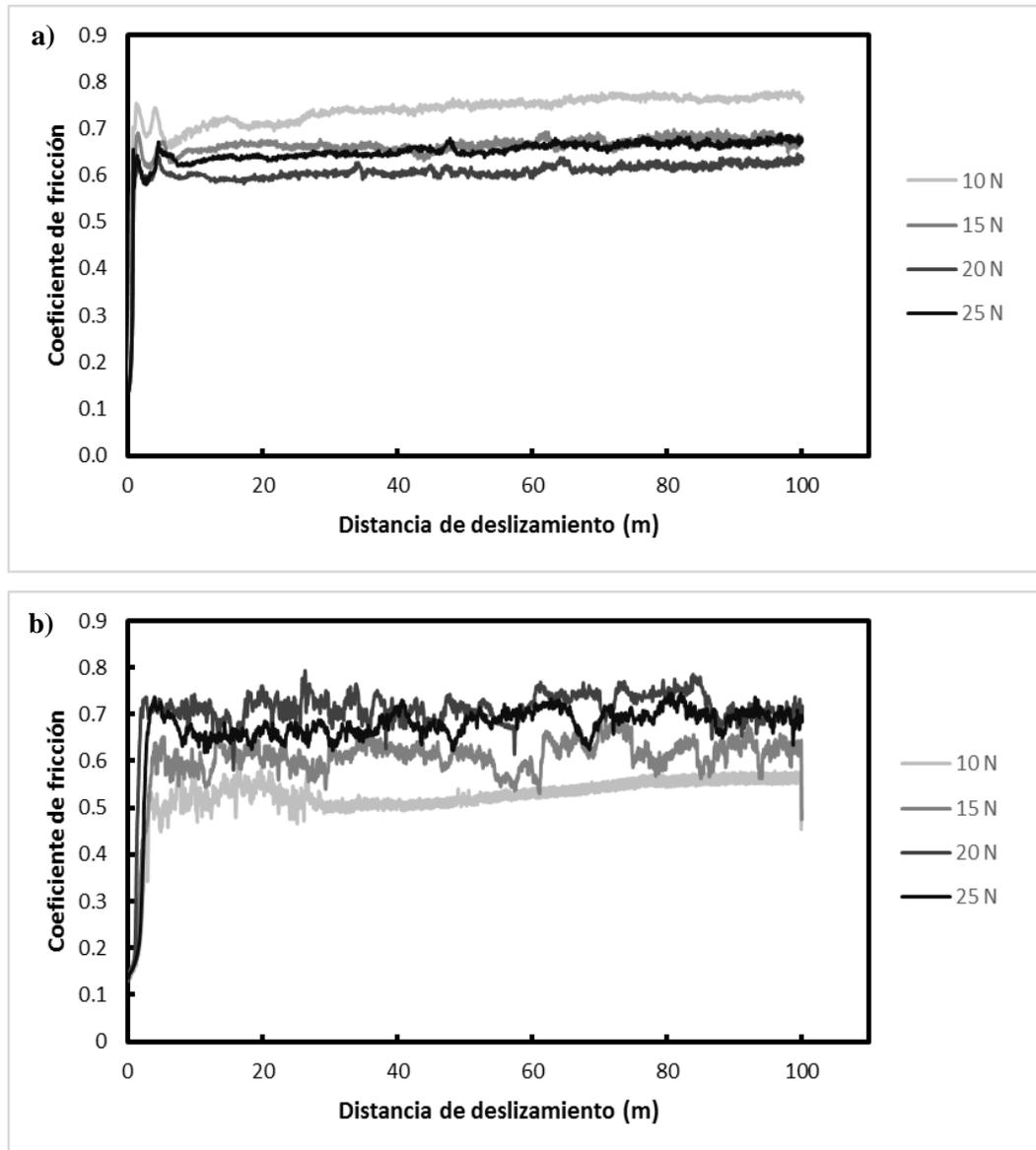


Figura 4.1. Comportamiento de los coeficientes de fricción en los aceros a) AISI H13 y b) AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco.



En la figura 4.1 se puede apreciar el comportamiento de los coeficientes de fricción (COF) en las muestras de acero AISI H13 y AISI H13 borurado. En ambas condiciones el comportamiento del COF es normal, es decir, al inicio es máximo, después decrece un poco y finalmente se estabiliza. La principal diferencia en el comportamiento del COF en ambos aceros es que en el acero AISI H13 es menos turbulento que en el acero AISI H13 borurado, esto se puede deber a que las rugosidades superficiales de los aceros es distinta, además la formación de partículas de desgaste (debris) también afectan el comportamiento del COF.

Tabla 4.2. Coeficientes de fricción proporcionados por el equipo de pruebas UMT-2.

Carga aplicada (N)	Coeficiente de fricción $\times 10^{-1}$ (Ad)	
	AISI H13	AISI H13 borurado
10	7.134 ± 0.460	6.011 ± 0.359
15	6.469 ± 0.425	6.074 ± 0.601
20	6.426 ± 0.408	6.873 ± 0.581
25	6.510 ± 0.652	6.565 ± 0.652

En el acero AISI H13 se obtiene un COF en el rango de 6.426 y 7.134×10^{-1} , mientras que en el acero AISI H13 borurado entre 6.011 y 6.873×10^{-1} . De acuerdo a la literatura, conforme mayor sea la carga aplicada, mayor será el COF (no siempre se cumple), sin embargo, se observa que para algunas condiciones de carga el COF es más grande o chico, haciendo que su valor no corresponda con el valor de la carga aplicada. Durante el registro y monitoreo del COF, también influyen otros factores propios del proceso de desgaste, como la cantidad de partículas de desgaste generadas y atrapadas durante la prueba y el cambio de rugosidad de la región desgastada. En el caso de la carga de 10 N, se observa



que el valor del COF es más grande que el obtenido a 25 N, por lo que se puede concluir que la carga de 10 N es más sensible a cualquier cambio que se presente durante la prueba de desgaste recíprocante lineal.

4.3.2 Volumen removido

En la siguiente figura se muestran las profundidades alcanzadas en los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado. En ambos materiales la profundidad máxima se da a 25 N y la menor profundidad a 10 N. Las profundidades de los canales de desgaste bajo una carga de 25 N, en los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado, son de 36 μm y 11 μm , respectivamente; en el acero AISI H13 borurado no se llega a la capa Fe_2B . Comparativamente, se observa una considerable reducción en el valor de la profundidad, esto se debe a la diferencia de dureza en ambos materiales (Tabla 4.2).

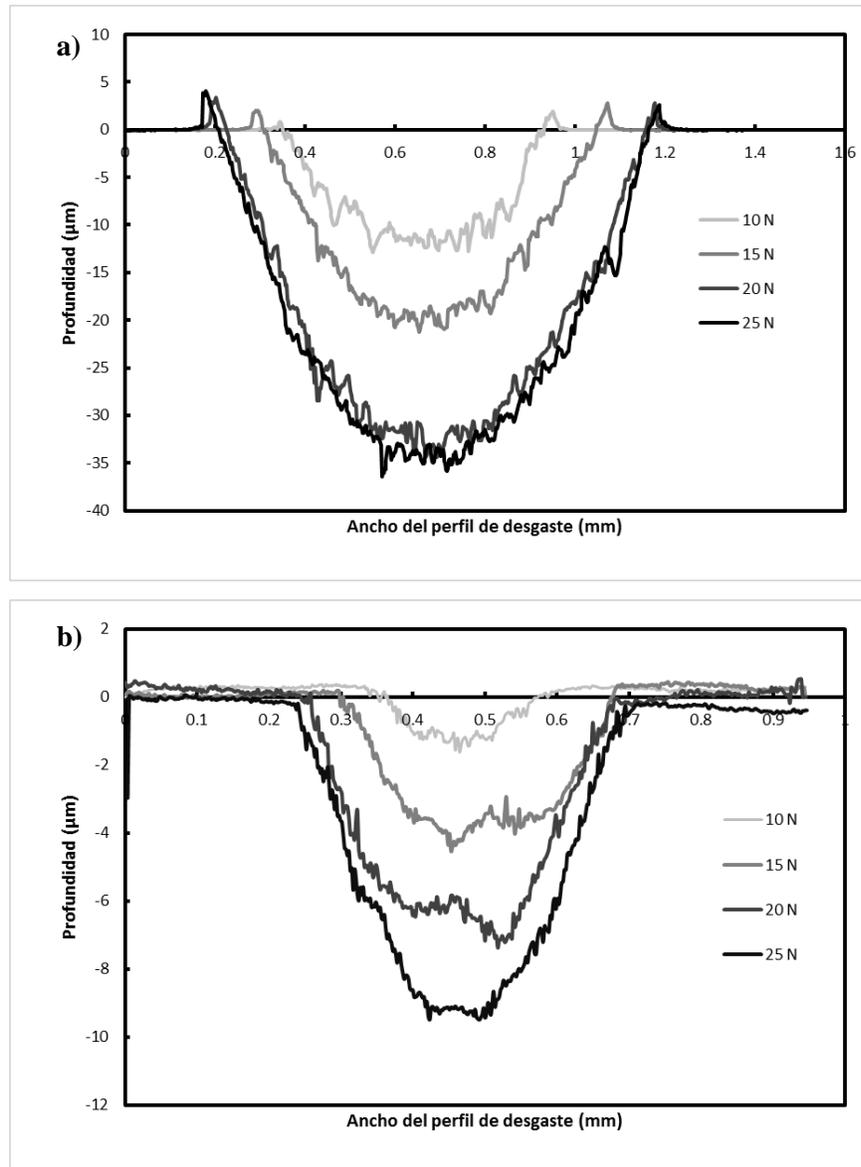


Figura 4.2. Profundidades de los canales de desgaste realizados sobre la superficie de los aceros
a) AISI H13 y b) AISI H13 borurado, en ambiente seco.



En la misma figura también se puede observar que en la Figura 4.2a sobresalen por encima del eje de referencia unos picos, los cuales no se presentan en Figura 4.2b. Esos picos que sobresalen son deformación plástica y solo se presentan en el acero AISI H13 debido al comportamiento dúctil que presenta, durante las pruebas de desgaste recíproco lineal en ambiente seco.

Tabla 4.3. Volúmenes perdidos obtenidos mediante estudios de perfilometría óptica.

Carga aplicada (N)	Volumen perdido $\times 10^{-1}$ (mm ³)	
	AISI H13	AISI H13 borurado
10	0.400 \pm 0.033	0.063 \pm 0.005
15	0.743 \pm 0.031	0.100 \pm 0.008
20	1.203 \pm 0.048	0.167 \pm 0.012
25	1.523 \pm 0.083	0.207 \pm 0.005

Con respecto a los volúmenes perdidos, se observa que en ambos aceros el volumen removido aumenta conforme se incrementa la carga. Nuevamente se observa el efecto de las propiedades mecánicas y tribológicas (dureza y resistencia al desgaste) de ambos materiales en los valores de volumen perdido, ya que para el acero AISI H13 borurado los valores son más bajos que en el acero AISI H13. Desde aquí se puede empezar a notar la mejora que ofrece el tratamiento termoquímico de borurado en la resistencia al desgaste de los aceros de alta aleación.



4.3.2 Tasa de desgaste

Las tasas de desgaste puntuales correspondientes a cada carga aplicada, se muestran a continuación:

Tabla 4.4. Tasas de desgaste puntuales estimadas de acuerdo a la norma ASTM G133-05.

Carga aplicada (N)	Tasa de desgaste $\times 10^{-5}$ (mm ³ /Nm)	
	AISI H13	AISI H13 borurado
10	4.000 \pm 0.327	0.633 \pm 0.047
15	5.133 \pm 0.206	0.666 \pm 0.054
20	6.017 \pm 0.239	0.771 \pm 0.062
25	6.093 \pm 0.330	0.827 \pm 0.019

Para la obtención de la tasa de desgaste global de cada acero, se graficó el volumen perdido vs carga-distancia, como se muestra en la Figura 4.3.

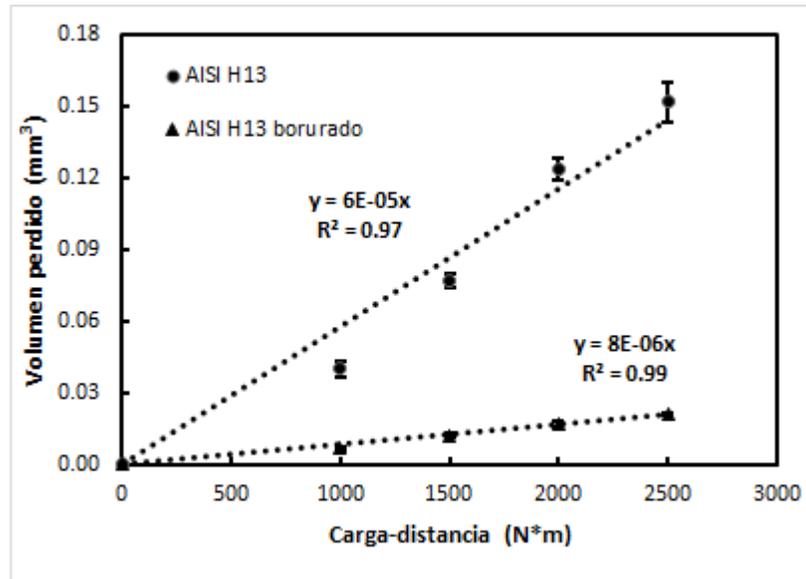


Figura 4.3. Tasas de desgaste globales para la condición de desgaste recíprocante lineal, en ambiente seco.

La tasa de desgaste global obtenida para el acero AISI H13 fue mucho mayor que la del acero AISI H13 borurado (6×10^{-5} y 8×10^{-6} mm³/N*m, respectivamente), con lo que se puede comprobar que la capa de boruros de hierro mejora considerablemente la resistencia al desgaste del acero AISI H13.

4.3.3 Mecanismos de desgaste

Para cada condición de carga se realizó un barrido completo de cada canal de desgaste para tener una imagen completa de éstos como referencia.

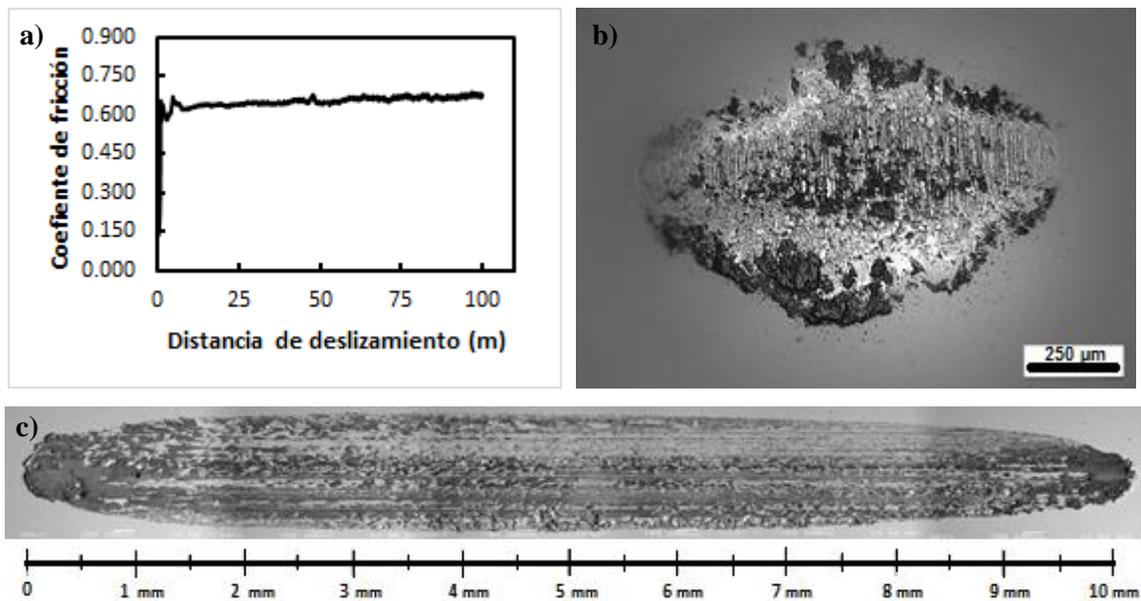


Figura 4.4. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 25 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

De las micrografías SEM obtenidas del acero AISI H13, sometido a pruebas de desgaste recíprocante lineal, en ambiente seco, se puede observar que existe adhesión del mismo acero AISI H13, deformación plástica (Z.P) y efecto de arado, a lo largo del canal de desgaste. Los mecanismos de desgaste mencionados anteriormente se pueden apreciar en la Figura 4.5. El acero AISI H13, para esta condición de desgaste, muestra un comportamiento dúctil.

También, en la Figura 4.4b se puede observar la marca de desgaste sobre la superficie de la bola de alúmina, después de las pruebas de desgaste. Sobre la superficie de la bola de alúmina se aprecia adhesión de material y el efecto de arado.

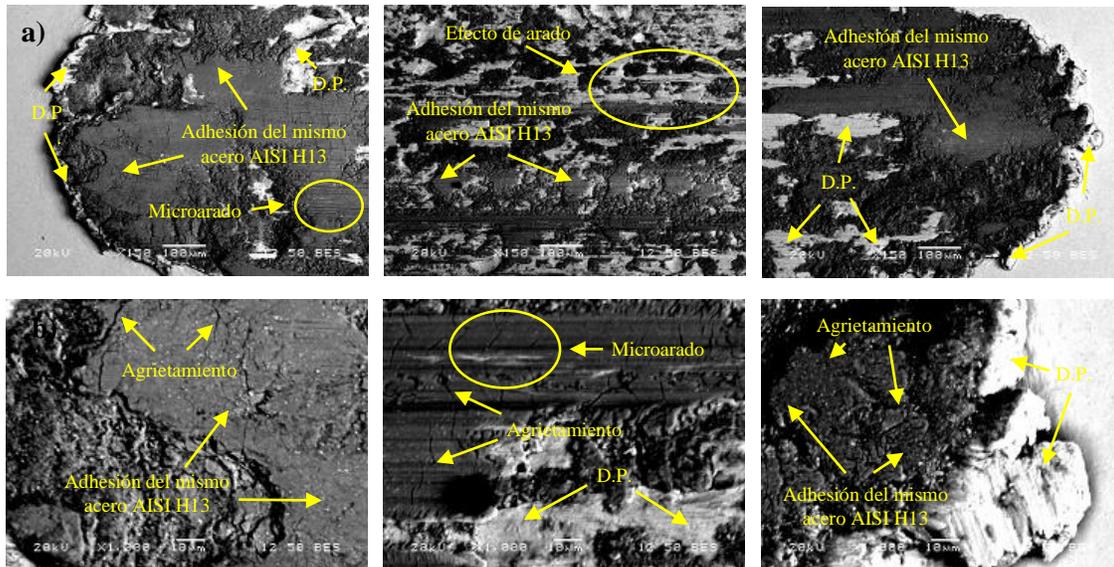


Figura 4.5. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13, a 25 N y en condiciones de desgaste seco.

Con los estudios de EDS se corroboró que el material adherido sobre los canales de desgaste y la superficie de la bola de alúmina, era acero AISI H13. Asimismo, en algunos de los espectros obtenidos se pueden apreciar picos de intensidad muy pequeños de aluminio, esto significa que no solamente existe transferencia de acero AISI H13 hacia la bola de alúmina, sino que también lo hay de la bola de alúmina hacia el acero AISI H13. De lo anterior se puede concluir que la bola de alúmina también presenta un daño mínimo en su superficie (aunque este no se observe en las micrografías).

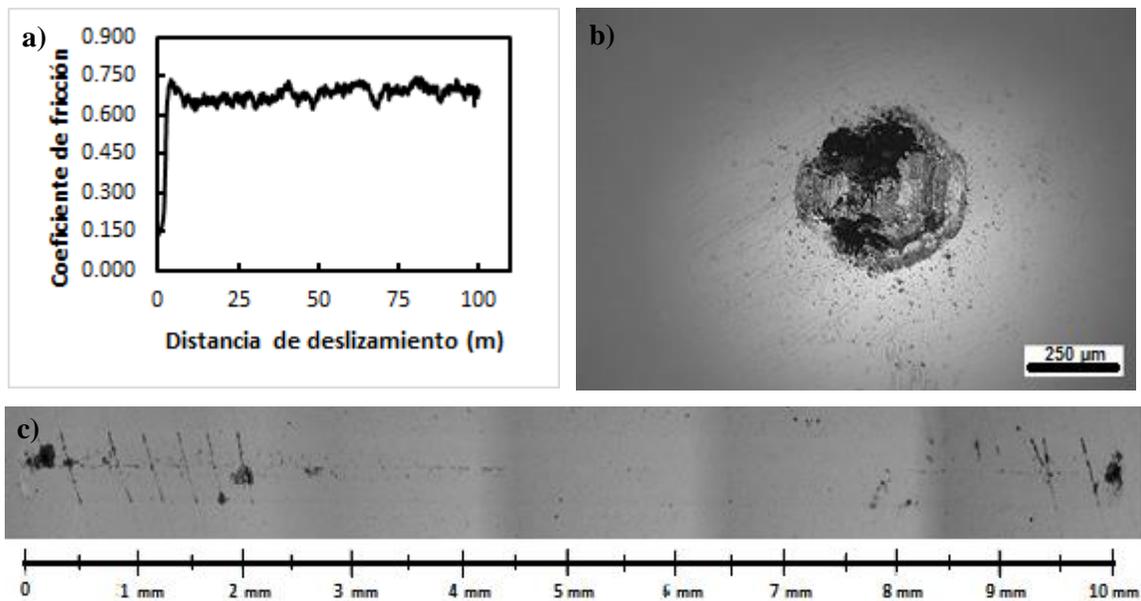


Figura 4.6. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 25 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

Por otra parte, el acero AISI H13 borurado presenta otra clase de comportamiento, bajo condiciones de desgaste recíprocante lineal. La capa externa (FeB) al ser más dura y frágil que el acero AISI H13 produce menos partículas de desgaste y por ende menos adhesión (Figura 4.7).

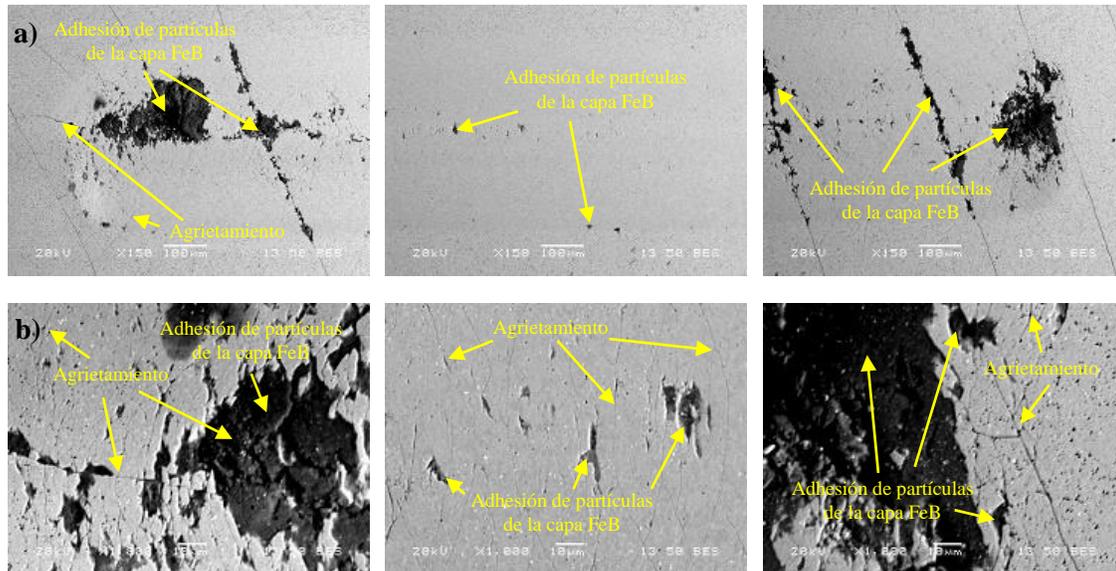


Figura 4.7. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13 borurado, a 25 N y en condiciones de desgaste seco.

En esta condición de desgaste se observa que sigue existiendo adhesión, pero ahora de partículas de la capa FeB, además se aprecia la existencia de grietas en los canales de desgaste. La presencia de grietas, después de las pruebas de desgaste, está relacionado con un mecanismo de desgaste de tipo abrasivo.

Las micrografías de la bola de alúmina revelan un desgaste severo en la superficie de dicha bola, si bien los espectros no revelan picos intensos de aluminio, el daño es claramente visible. La adhesión de partículas de la capa FeB en la superficie de la bola de alúmina es poca.



Tabla 4.5. Mecanismos de desgaste predominantes para cada condición de desgaste para una distancia de deslizamiento de 100 m.

Muestra	Condición de desgaste	Mecanismo(s) de desgaste predominantes	Tipo de mecanismo de desgaste
AISI H13	Seco	Adhesión de partículas del mismo acero AISI H13 y efecto de arado	Adhesivo y abrasivo
AISI H13 borurado	Seco	Adhesión de partículas de la capa FeB y agrietamiento	Adhesivo y abrasivo

4.4 Caracterización tribológica de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado en ambiente húmedo

4.4.1 Coeficiente de fricción

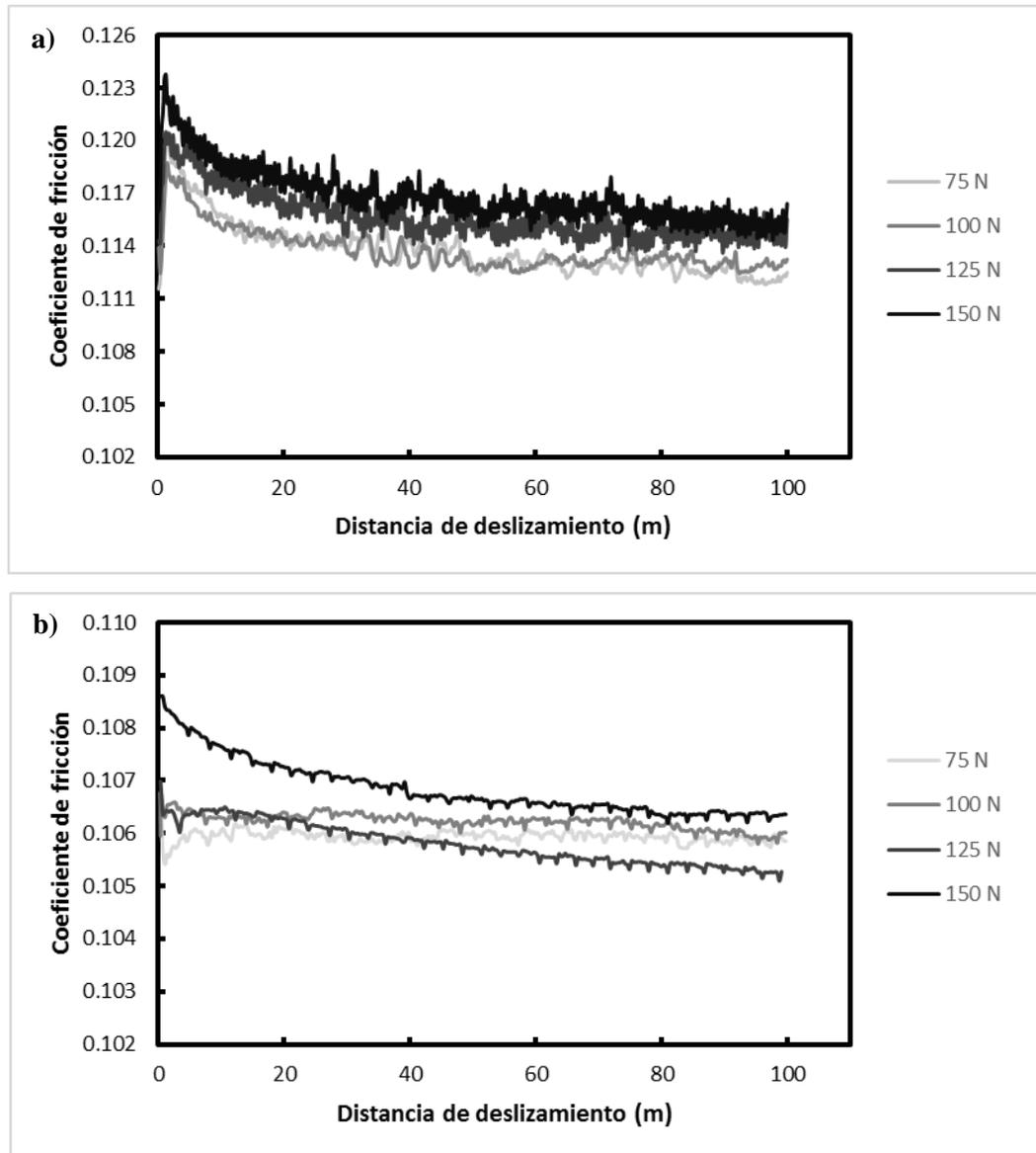


Figura 4.8. Variación del coeficiente de fricción en las muestras de acero a) AISI H13 y b) AISI H13 borurado, durante las pruebas de desgaste en ambiente húmedo.



En la condición de desgaste húmedo el comportamiento del COF es más inestable en la muestra de acero AISI H13 que en la de acero AISI H13 borurado. El comportamiento del COF en la muestra de acero AISI H13, está relacionado con el desprendimiento y adhesión de material en la bola de alúmina, mientras que el comportamiento estable del COF en la muestra de acero AISI H13 borurado se debe a la acción lubricante de la capa borurada y a la poca generación de partículas de desgaste.

Tabla 4.6. Comparativa de los coeficientes de fricción obtenidos en condiciones de desgaste húmedo.

Carga aplicada (N)	Coeficiente de fricción $\times 10^{-1}$ (Ad)	
	AISI H13	AISI H13 borurado
75	1.133 ± 0.014	1.066 ± 0.005
100	1.141 ± 0.012	1.057 ± 0.002
125	1.160 ± 0.014	1.054 ± 0.004
150	1.172 ± 0.011	1.061 ± 0.005

Los valores del COF registrados para esta condición de desgaste se presentan en la Tabla 4.6. El COF en el acero AISI H13 y AISI H3 borurado son pequeños debido al efecto del medio lubricante durante las pruebas de desgaste recíprocante lineal. En la muestra de acero AISI H13 el coeficiente de fricción va aumentando conforme se incrementa la carga aplicada, pero en el acero AISI H13 borurado no se observa ese incremento, más bien los valores están muy cercanos entre sí.



4.4.2 Volumen perdido

Bajo condiciones de desgaste húmedo se alcanzan profundidades de entre 1.5 y 15 μm . Para estas condiciones de desgaste la profundidad máxima en el acero AISI H13 es de 15 μm y en el acero AISI H13 borurado de 2.6 μm , aproximadamente.

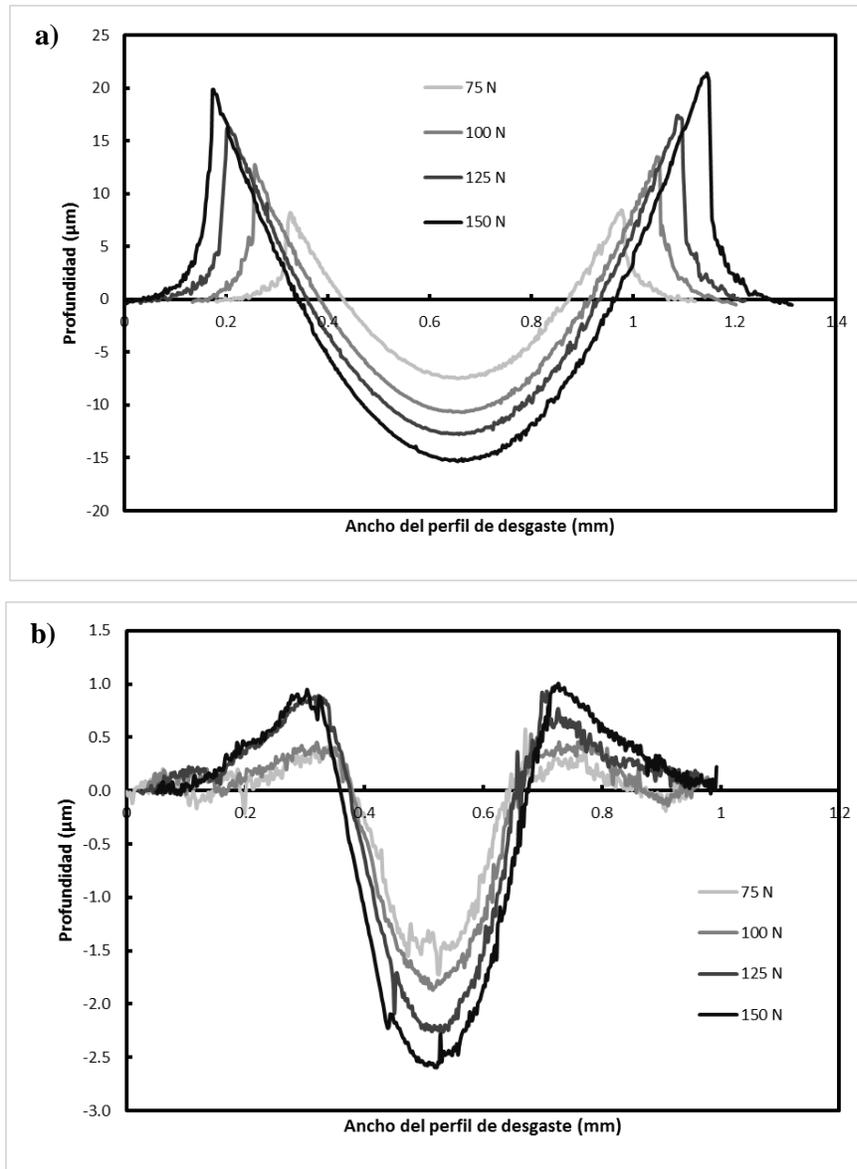


Figura 4.9. Profundidades alcanzadas por la bola de alúmina en cada condición de carga en los aceros a) AISI H13 y b) AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo.



En la Figura 4.9a se observa que hay demasiada deformación plástica a los lados de los canales de desgaste. Esta acumulación de deformación plástica esta relacionada con el tipo de mecanismo de desgaste presente en estas condiciones de desgaste. Este fenomeno no es tan apreciable en el acero AISI H13 borurado.

Tabla 4.7. Volúmenes perdidos para cada condición de carga aplicada.

Carga aplicada (N)	Volumen perdido $\times 10^{-1}$ (mm ³)	
	AISI H13	AISI H13 borurado
75	0.320 \pm 0.009	0.030 \pm 0.002
100	0.530 \pm 0.016	0.040 \pm 0.001
125	0.780 \pm 0.012	0.050 \pm 0.001
150	1.050 \pm 0.008	0.060 \pm 0.003

Los valores de volumen perdido para los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado estan en un rango de 0.320 a 1.050 $\times 10^{-1}$ y de 0.030 a 0.060 $\times 10^{-1}$, respectivamente. Los valores de volumen perdido registrados son muy bajos debido a que no hay un contacto pleno entre las muestras y la bolade alúmina, ocasionando que no haya demasiada remoción de material durante las pruebas de desgaste reciprocante lineal.

4.4.3 Tasa de desgaste

Las tasas de desgaste puntuales para las cargas de 75, 100, 125 y 150 N se estimaron de acuerdo a la norma G133-05, y los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:



Tabla 4.8. Tasas de desgaste puntuales calculadas de acuerdo a la norma G133-05.

Carga aplicada (N)	Tasa de desgaste $\times 10^{-6}$ (mm^3/Nm)	
	AISI H13	AISI H13 borurado
75	4.311 ± 0.126	0.338 ± 0.017
100	5.267 ± 0.170	0.361 ± 0.012
125	6.267 ± 0.100	0.363 ± 0.001
150	7.000 ± 0.054	0.369 ± 0.022

La tasa de desgaste global del perfil de desgaste para los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado, bajo condición de desgaste húmedo, se determinaron gráficamente (Figura 4.10). La tasa de desgaste global para los acero AISI H13 y AISI H13 borurado fueron de 6×10^{-6} y 4×10^{-7} , respectivamente.

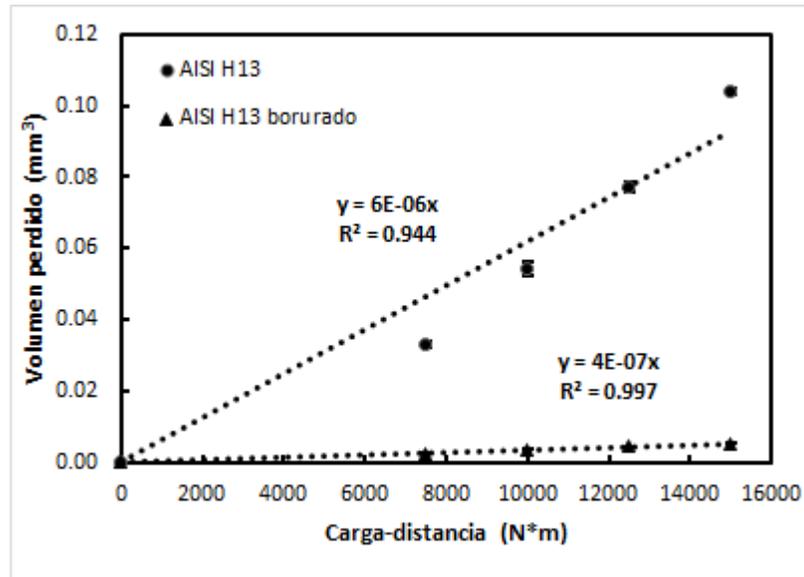


Figura 4.10. Tasas de desgaste globales correspondiente a la condición de desgaste en ambiente húmedo.

La tasa de desgaste global en el acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo, se reduce casi en un orden de magnitud.

4.4.5 Mecanismos de desgaste

Durante el proceso de desgaste en ambiente húmedo, el medio lubricante no solo reduce la fricción y el desgaste de los cuerpos que están en contacto, sino también al mismo proceso y los mecanismos de desgaste que pueden presentarse durante dicho proceso de desgaste.

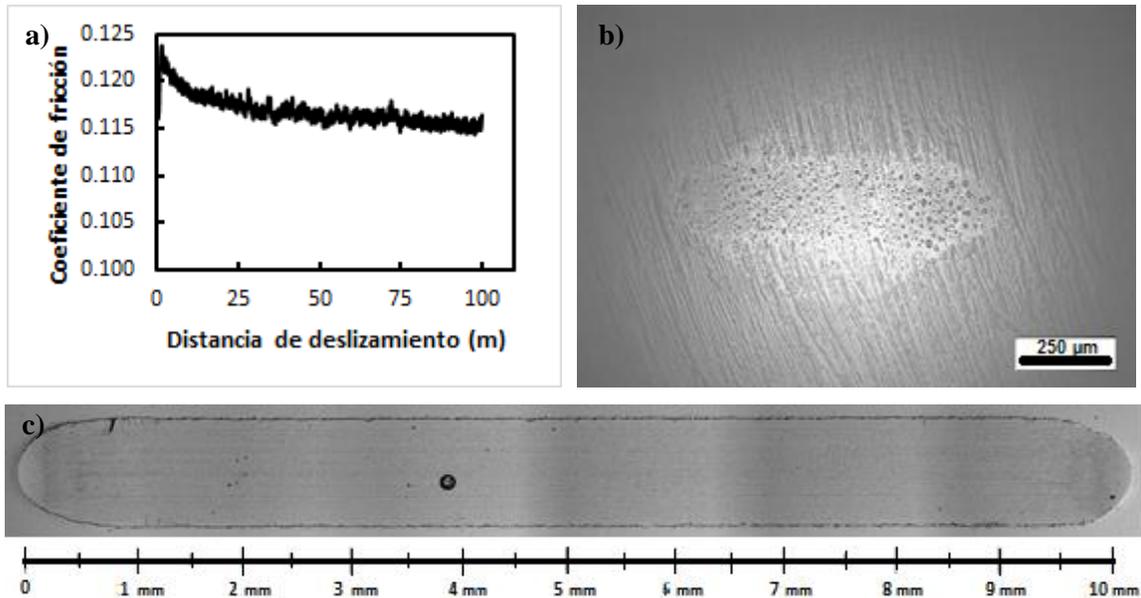


Figura 4.11. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 150 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

En el acero AISI H13 bajo condiciones de desgaste recíprocante lineal, en ambiente húmedo, predomina un mecanismo de desgaste de tipo abrasivo, debido a que se observa la formación de surcos (efecto de arado) a lo largo del canal de desgaste. Aunque también existe deformación plástica, es claro que el efecto de arado predomina en esta condición de desgaste. Este mecanismo de desgaste se debe a que el medio lubricante (en este caso aceite SAE W-40) impide la acumulación de las partículas de desgaste, lo que ocasiona que solo exista adhesión en la superficie de la bola de alúmina, llevándose a cabo una interacción abrasiva de dos cuerpos.

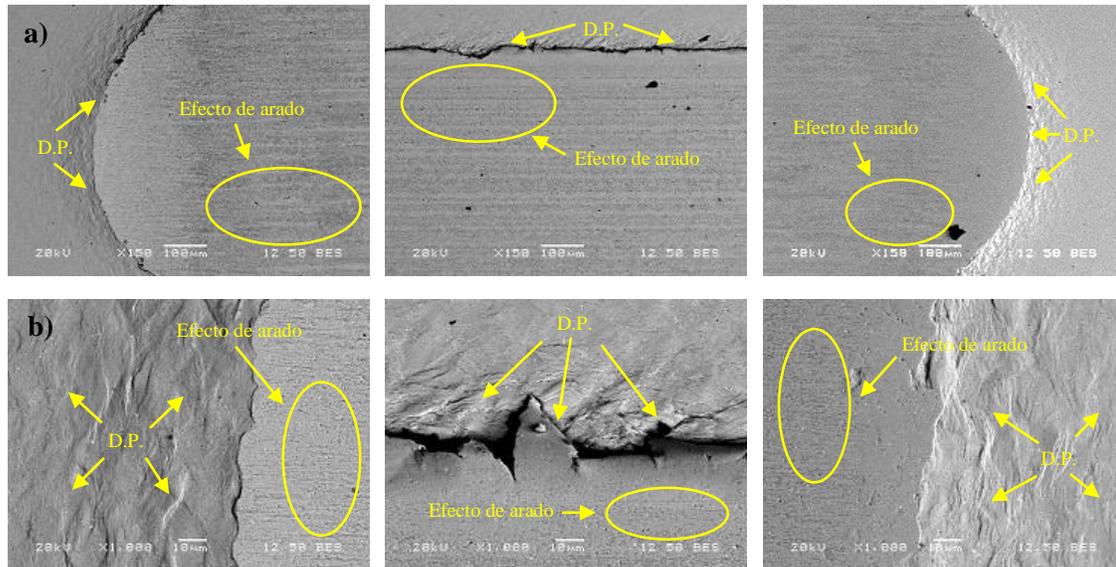


Figura 4.12. Micrografías a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 150 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13.

Sobre la superficie de la bola de alúmina se logra apreciar un daño significativo, resultado de las pruebas de desgaste recíprocante lineal, en ambiente húmedo.

Para la condición de desgaste húmedo, sobre la muestra de acero AISI H13 borurado, además del efecto del lubricante sobre el proceso de desgaste, también se agrega el efecto de la capa borurada en la resistencia al desgaste.

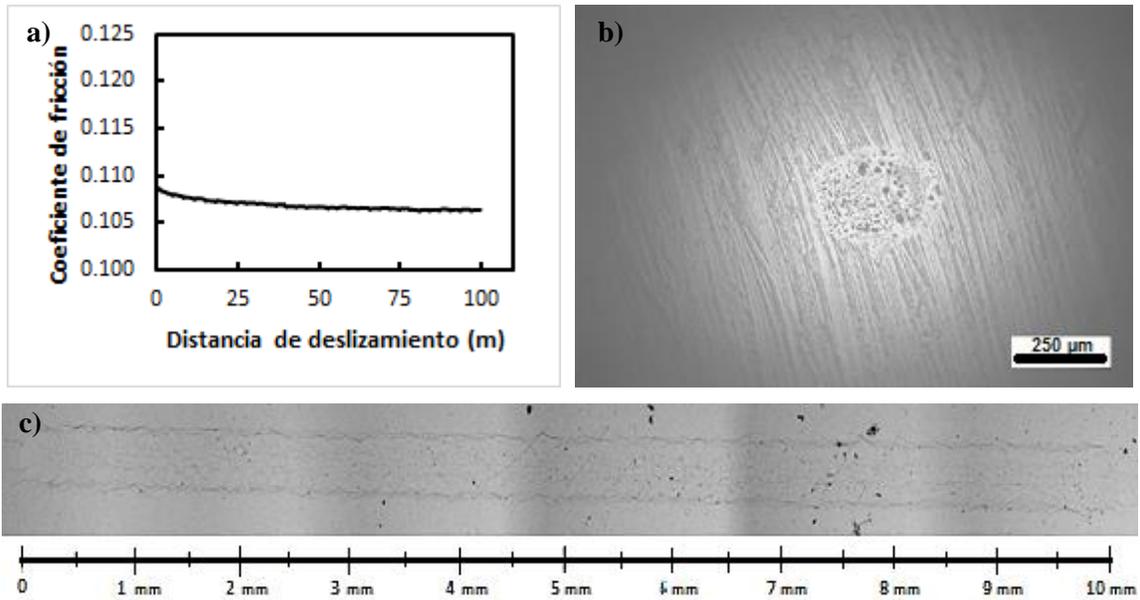


Figura 4.13. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 150 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

Después de las pruebas de desgaste recíproca y con ayuda de las micrografías de SEM, se observó la formación de grietas conformales, como mecanismo de desgaste.

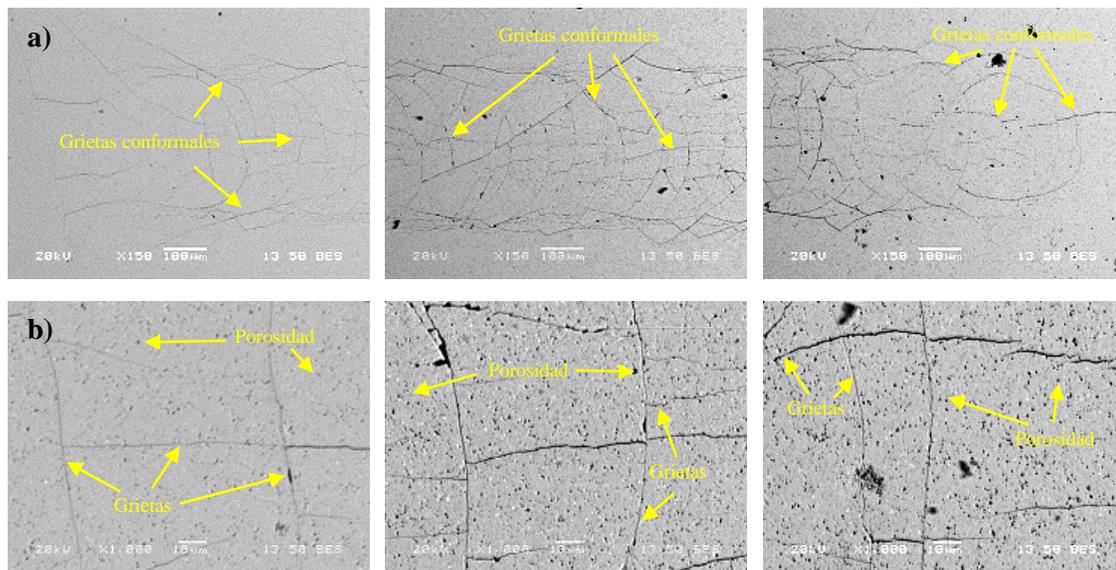


Figura 4.14. Micrografías a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 150 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13 borurado.

El resto de micrografías de SEM y los estudios de EDS se muestran en la sección de apéndices.



Tabla 4.9. Mecanismos de desgaste predominantes para cada condición de desgaste para una distancia de deslizamiento de 100 m.

Muestra	Condición de desgaste	Mecanismo(s) de desgaste predominantes	Tipo de mecanismo de desgaste
AISI H13	Húmedo	Efecto de arado	Abrasivo
AISI H13 borurado	Húmedo	Grietas conformales	Abrasivo



Conclusiones generales

La morfología de capa obtenida en el acero AISI H13, borurado a una temperatura de 950 °C y a un tiempo de exposición de 6 horas, corresponde con lo reportado en literatura por otros autores. La morfología de capa plana y semiaserrada es característica de los aceros altamente aleados. En el caso particular del acero AISI H13, sobre éste se tiende a formar capas boruradas con morfología semiaserrada, debido principalmente al contenido de silicio y molibdeno en este acero herramental. Con los resultados obtenidos de la caracterización físico-química se comprobó la presencia de las capas FeB y Fe₂B, y la formación del compuesto intersticial CrB.

Con base a los resultados obtenidos mediante la técnica de microindentación instrumentada Vickers, se estableció que la dureza de las capas FeB y Fe₂B (para esta condición de borurado) fueron de 18.73 ± 0.65 y 15.56 ± 0.80 μm , respectivamente; en el substrato se obtuvo una dureza de 5.66 ± 0.14 μm .

De la caracterización tribológica de los aceros AISI H13 y AISI H13 borurado se observó que el volumen perdido y la tasa de desgaste aumentan conforme se incrementa la carga aplicada. Lo anterior no aplica para el COF, debido a que durante el proceso de desgaste hay otros factores que influyen en dicho valor, como la adhesión de partículas de desgaste y el cambio de rugosidad.

En el acero AISI H13, el mecanismo de desgaste predominante presente en las condiciones de desgaste seco y húmedo cambia. En ambiente seco el mecanismo de desgaste predominante es la adhesión, mientras que en ambiente húmedo es el efecto de arado. El aceite SAE-W40 modifica el proceso de desgaste, pasa de ser desgaste adhesivo (ambiente seco) a desgaste abrasivo (ambiente húmedo).



El agrietamiento mostrado en el acero AISI H13 borurado, tanto en condiciones de desgaste seco y húmedo se debe, principalmente, a la fatiga interna que sufre la capa de borurada, como resultado del movimiento de vaivén de la bola de alúmina sobre la superficie de este acero. Además, el esfuerzo residual de tipo tensil influye en la formación de este tipo de mecanismo de desgaste. La diferencia en ambas condiciones de desgaste, es que en ambiente seco no solo existe adhesión de partículas de desgaste en la bola de alúmina, sino también en el canal de desgaste, algo que no ocurre en ambiente húmedo, debido a que el aceite SAE-W40 solo permite adhesión en la bola de alúmina.

Finalmente se establece, que en ambas condiciones de desgaste (ambiente seco y húmedo) el acero AISI H13 es el que presenta menor resistencia al desgaste y por ende es el que más se desgasta. Por otra parte, el acero AISI H13 borurado es el material que presenta mejor resistencia al desgaste. La resistencia del acero AISI H13 borurado, bajo condiciones de desgaste seco es 7.5 veces mayor con respecto al acero AISI H13; en ambiente húmedo se incrementó 15 veces.



Perspectivas de trabajo

- Evaluar la resistencia al desgaste del acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco, bajo cargas de 75, 100, 125 y 150 N, para comparar los resultados con los obtenidos bajo condiciones de desgaste húmedo.
- Variar las condiciones experimentales para estudiar la variación de la tasa de desgaste.



Referencias bibliográficas

Carrera R (2014), *Desarrollo e implementación de una formulación con base al potencial de boro, para el proceso de borurización en caja de un acero AISI 1018*. Tesis doctoral, Instituto Politécnico Nacional, México.

Carrera R, Figueroa U, Martínez J, Campos I, Hernández E, Motallebzadeh A (2016), “Tribological behaviour of boride 1018 steel under linear reciprocating sliding condition”, *Wear*, 1-7.

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

Davis J (2002), “Surface hardening of steels: Understanding the basics”, Davis & Associates, USA, ASM International.

Fernandez M (1999), *Boración de aceros*. Tesis doctoral. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Fichtl W (1981), “Boronizing and its practical applications”, *Mater. Eng.*, 2, 278-286.

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

Hernandez H y Espejo E (2002), “Mecánica de fractura y análisis de falla”, Colombia, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.



Keddam M, Ortiz-Domínguez M, Elias-Espinoza M, Damián-Mejía O, Arenas-Flores A, Gómez-Vargas O, Abreu-Quijano M, Aldana-González J and Zuno-Silva J (2014), “Growth Kinetics of the Fe₂B Coating on AISI H13 Steel”, *Trans. Indian Inst. Met.*, 68, 433-442.

Kalpakjian S y Schmid S (2008), “Manufactura, ingeniería y tecnología”, quinta edición, México, PEARSON EDUCACIÓN.

Khizhnyak V, Korol V, Kostenko A (2003), “Wear resistance of carbide and boride coatings on U8A Steel”, *Powder Metall. Met.*, 42, 644-648.

Matushka A Graf Von (1980), “Boronizing”, Carl Hanser Verlag, Munich, FRG.

Motallebzadeh A, Dilektasli E, Baydogan M, Atar E, Cimenoglu H (2015), “Evaluation of the effect of boride layer structure on the high temperature wear behavior of borided steels”, *Wear*, 110-114.

Straffelini G (2015), “Friction and wear: Methodologies for design and control”, Springer.

Standard Test Method for Linearly Recirculating Ball-on-Flat Sliding Wear, ASTM G133-05, 2010.

Standard Practice for Instrumented Indentation Testing, ASTM E2546-07, 2007.

Tribology Series (1987), “Classification of wear processes”, ELSEVIER, *Microstructure and wear of materials*, ScienceDirect.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SEPI ESIME ZACATENCO



Vera Cárdenas E, Lewis Roger, Martínez Pérez A, Bernal Ponce J, Pérez Pinal F., Ortíz Domínguez M, Rivera Arreola E (2015), “Characterization and wear performance of boride phases over tool steel substrates”, *Advances in Mechanical Engineering*, 8, 1-10.

Wulpi D (1999), “Understanding how components fail”, second edition, USA, ASM International.

Apéndice A

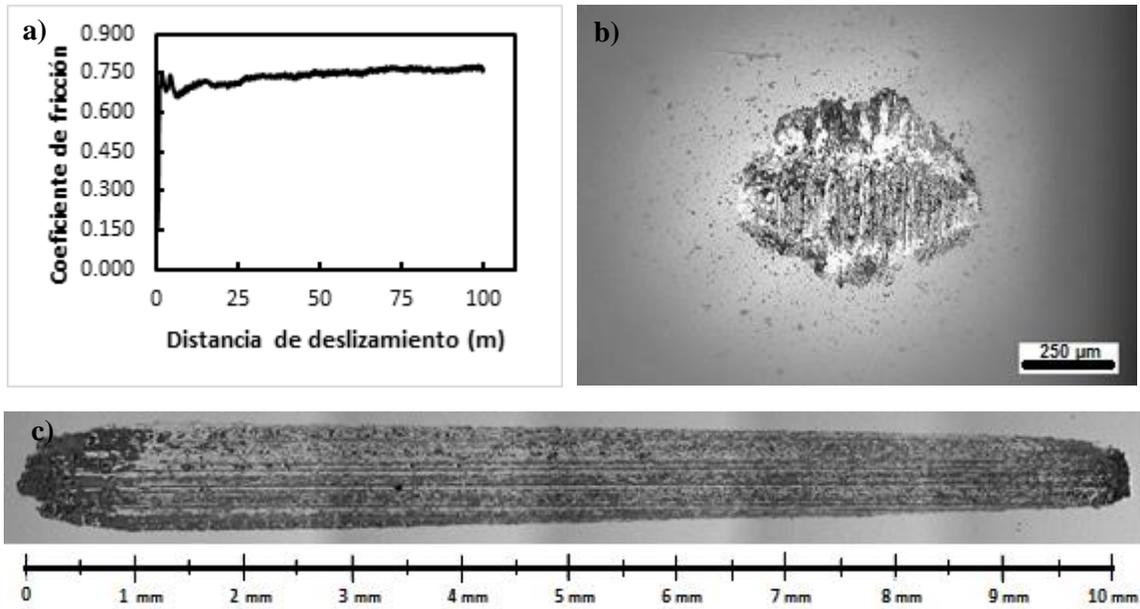


Figura A1. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 10 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

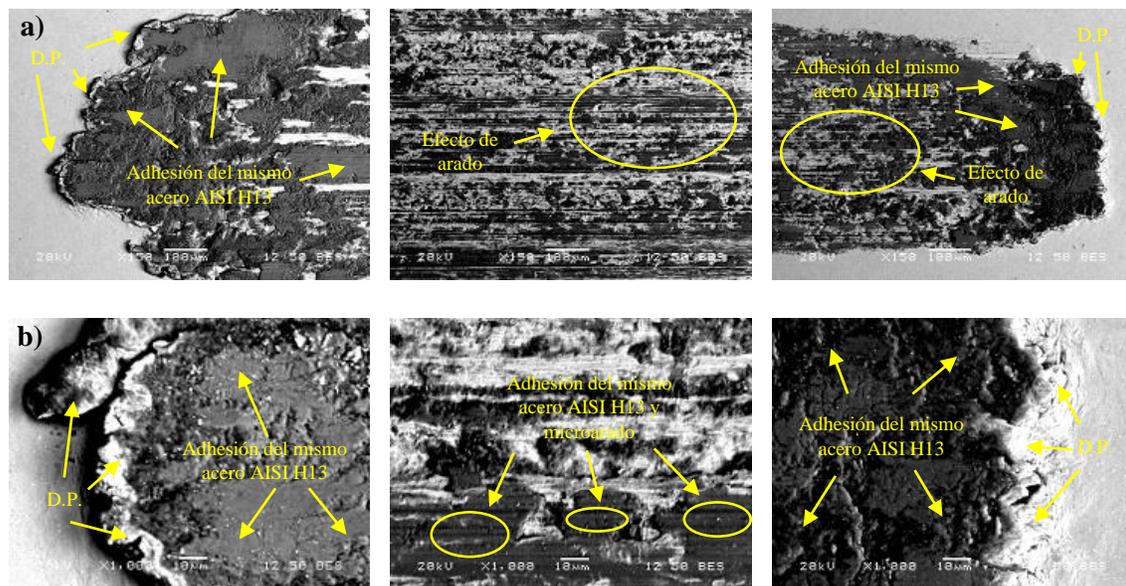


Figura A2. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13, a 10 N y en condiciones de desgaste seco.

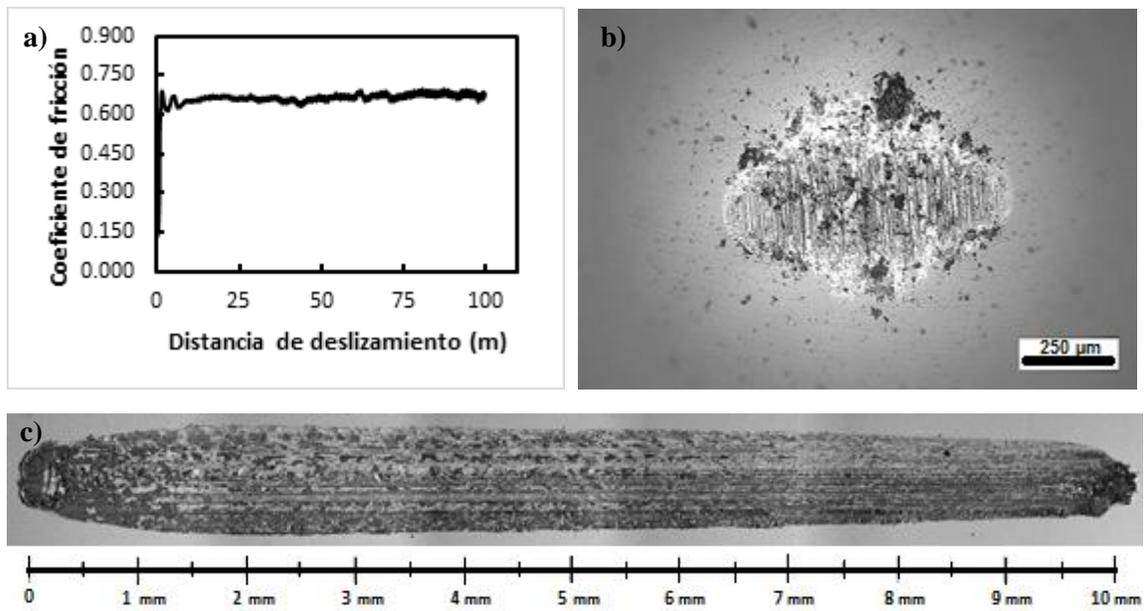


Figura A3. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 15 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

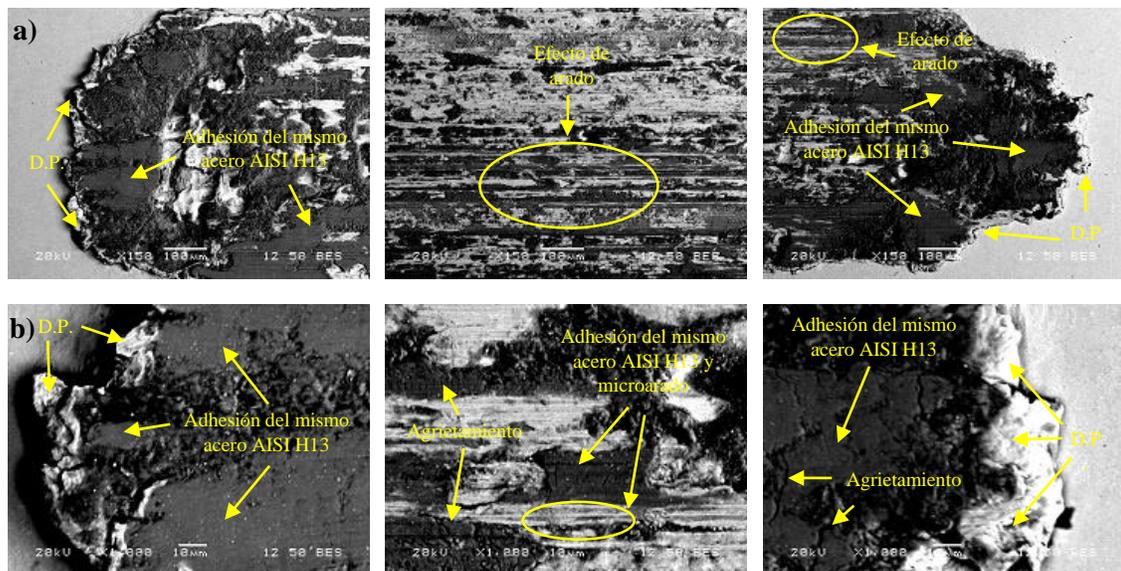


Figura A4. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13, a 15 N y en condiciones de desgaste seco.

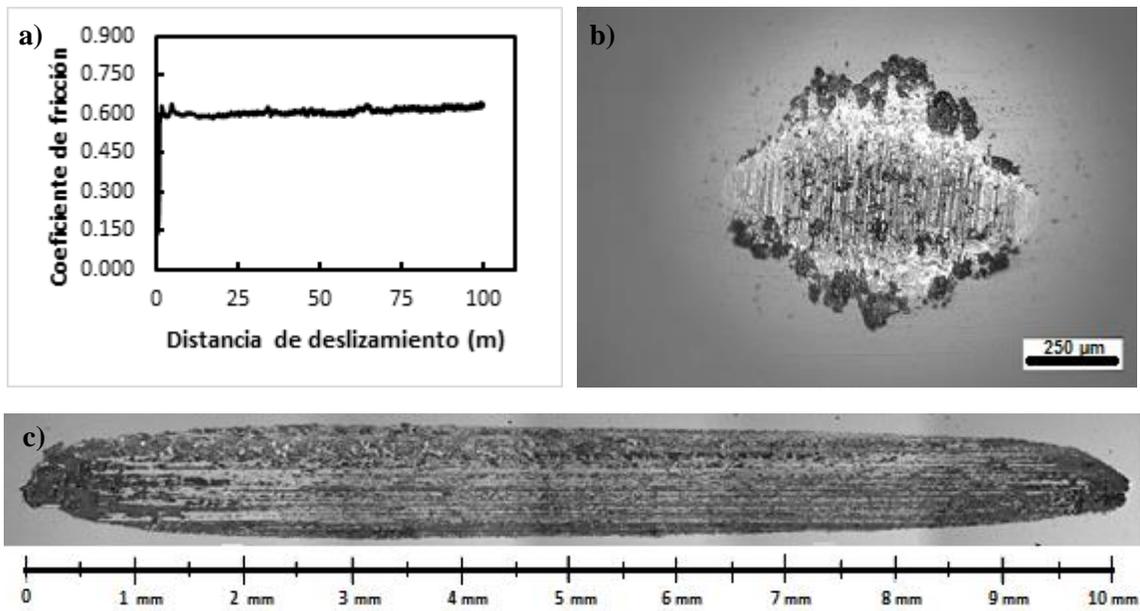


Figura A5. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 20 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

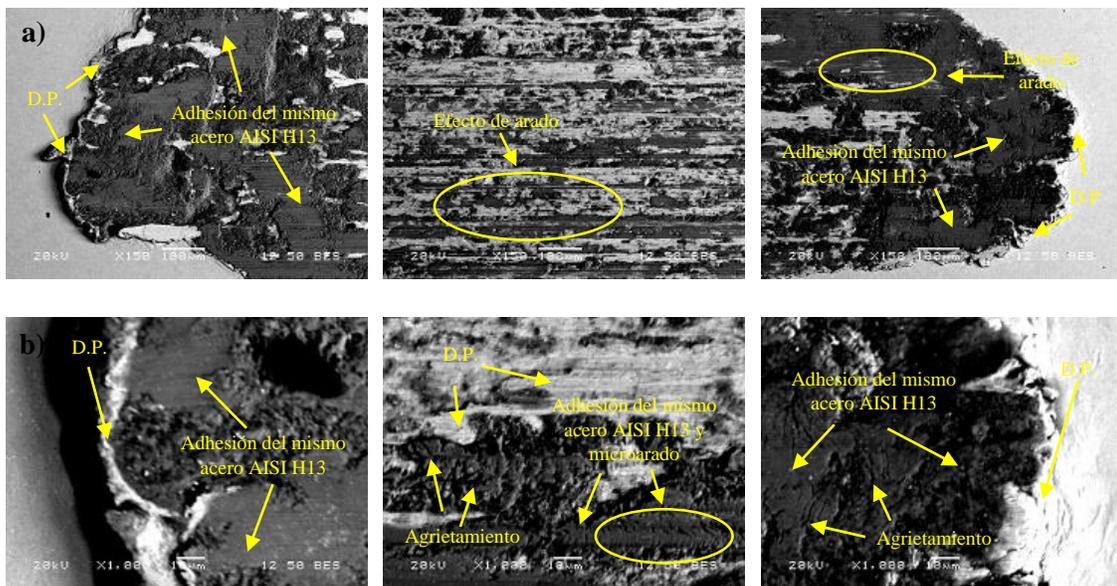


Figura A6. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13, a 20 N y en condiciones de desgaste seco.

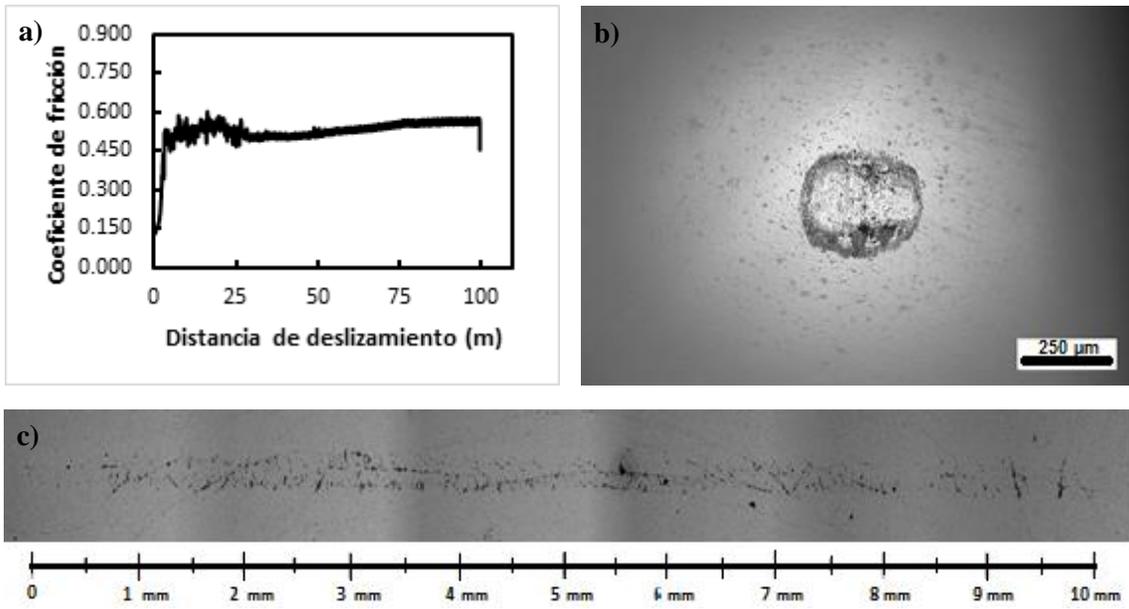


Figura A7. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 10 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

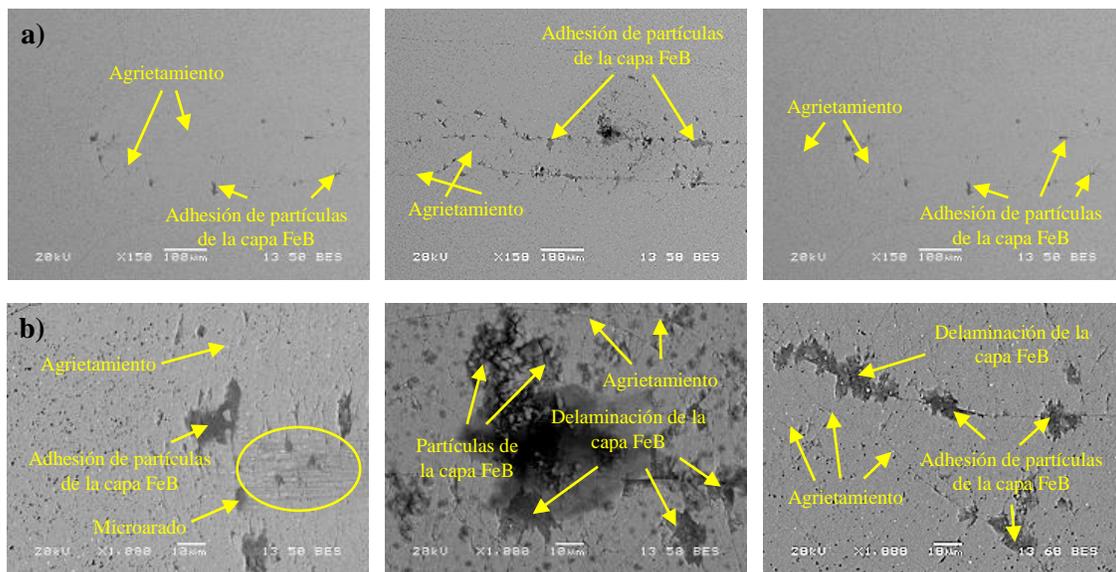


Figura A8. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13 borurado, a 10 N y en condiciones de desgaste seco.

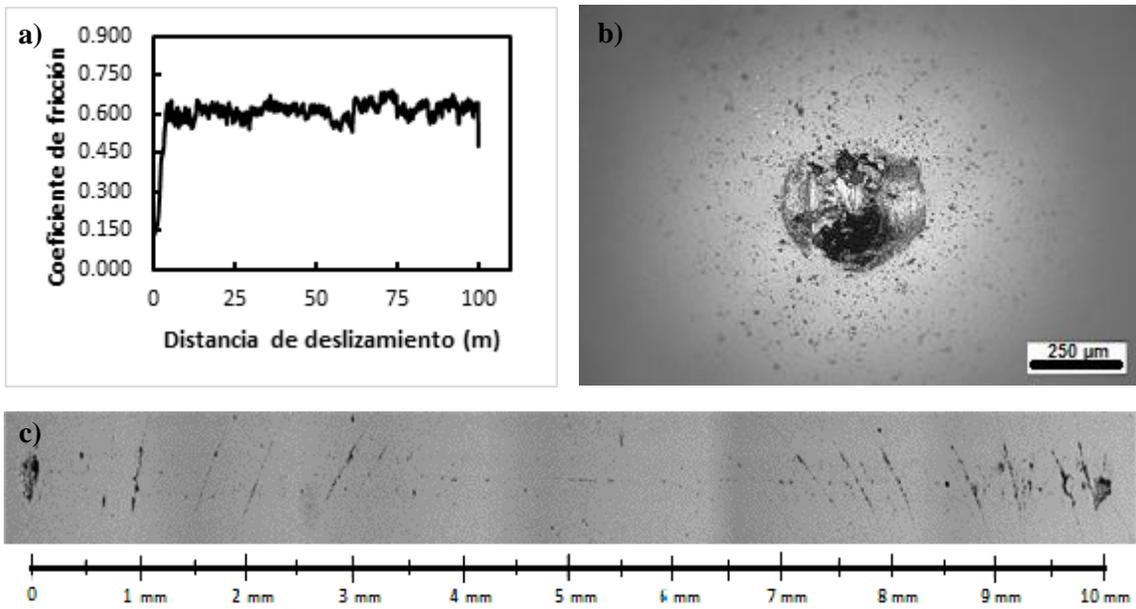


Figura A9. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 15 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

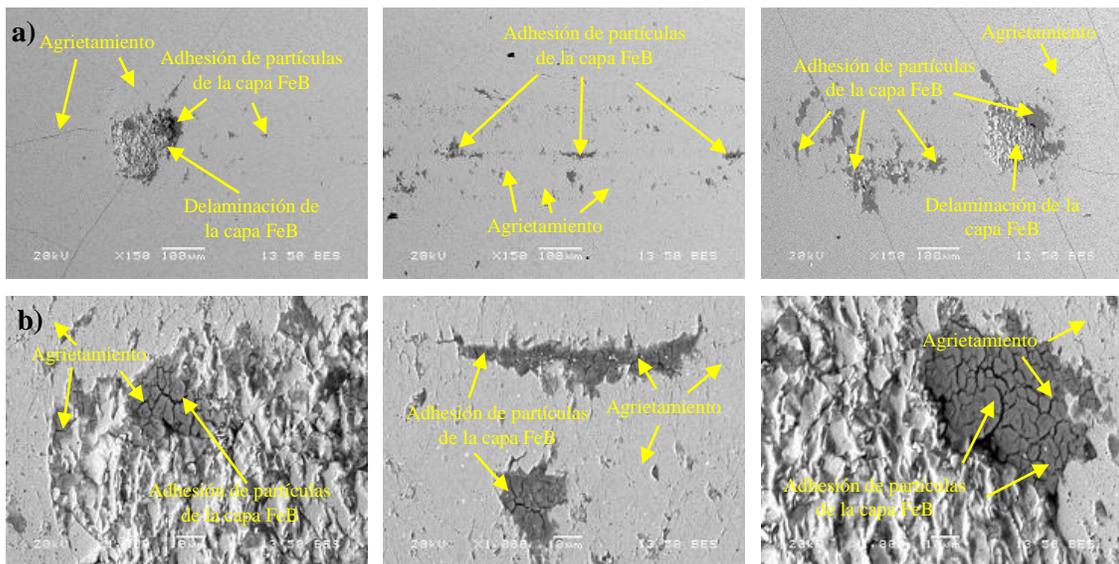


Figura A10. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13 borurado, a 15 N y en condiciones de desgaste seco.

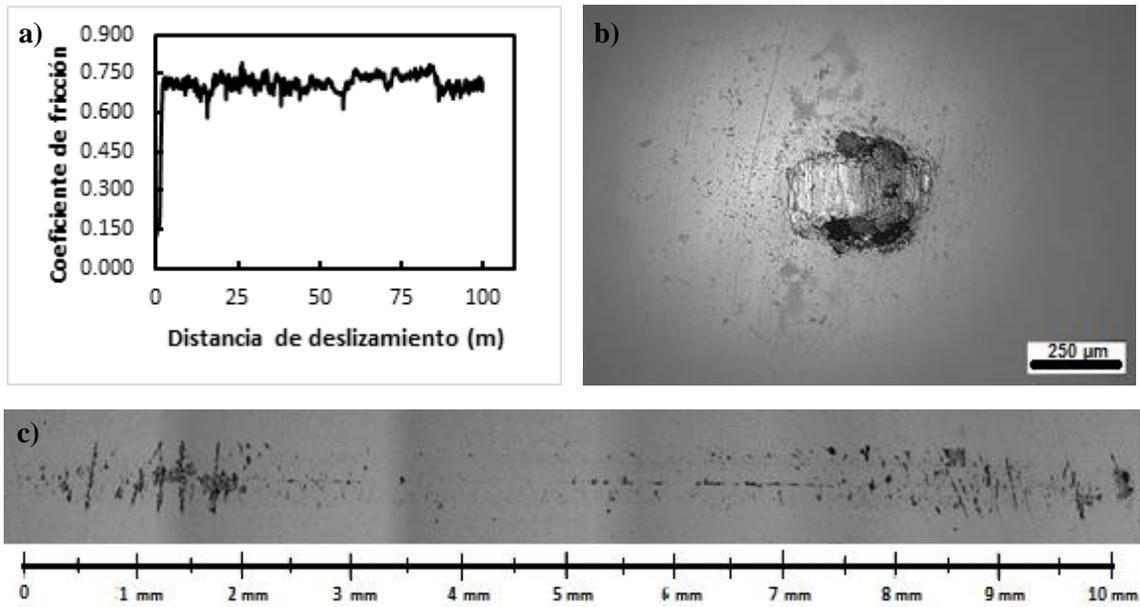


Figura A11. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 20 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste seco y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

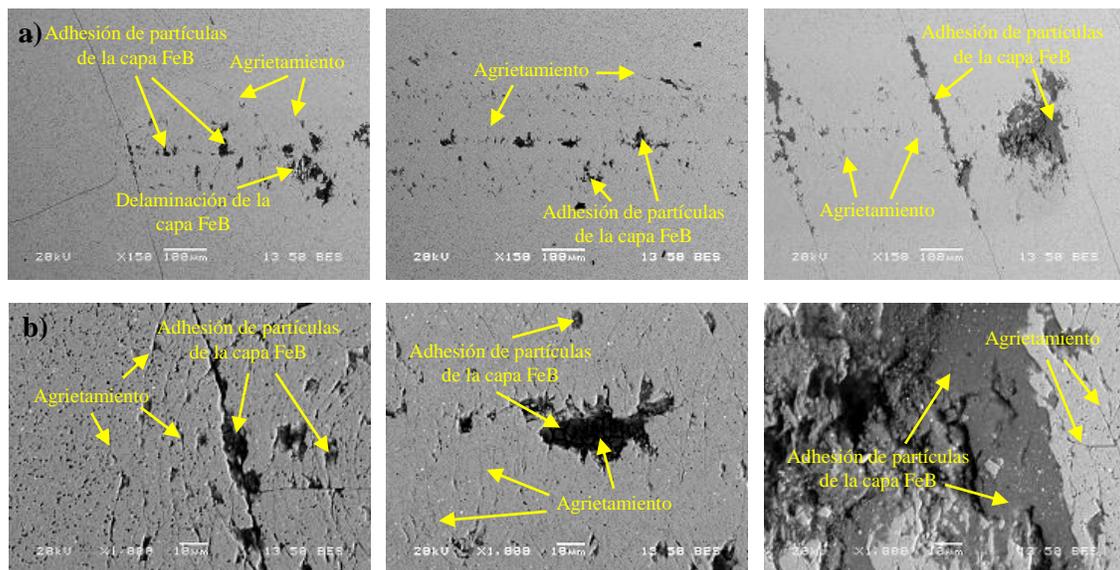


Figura A12. Mecanismos de desgaste presentes a aumentos de a) 150x y b) 1000x. Canal de desgaste realizado en un acero AISI H13 borurado, a 20 N y en condiciones de desgaste seco.

Apéndice B

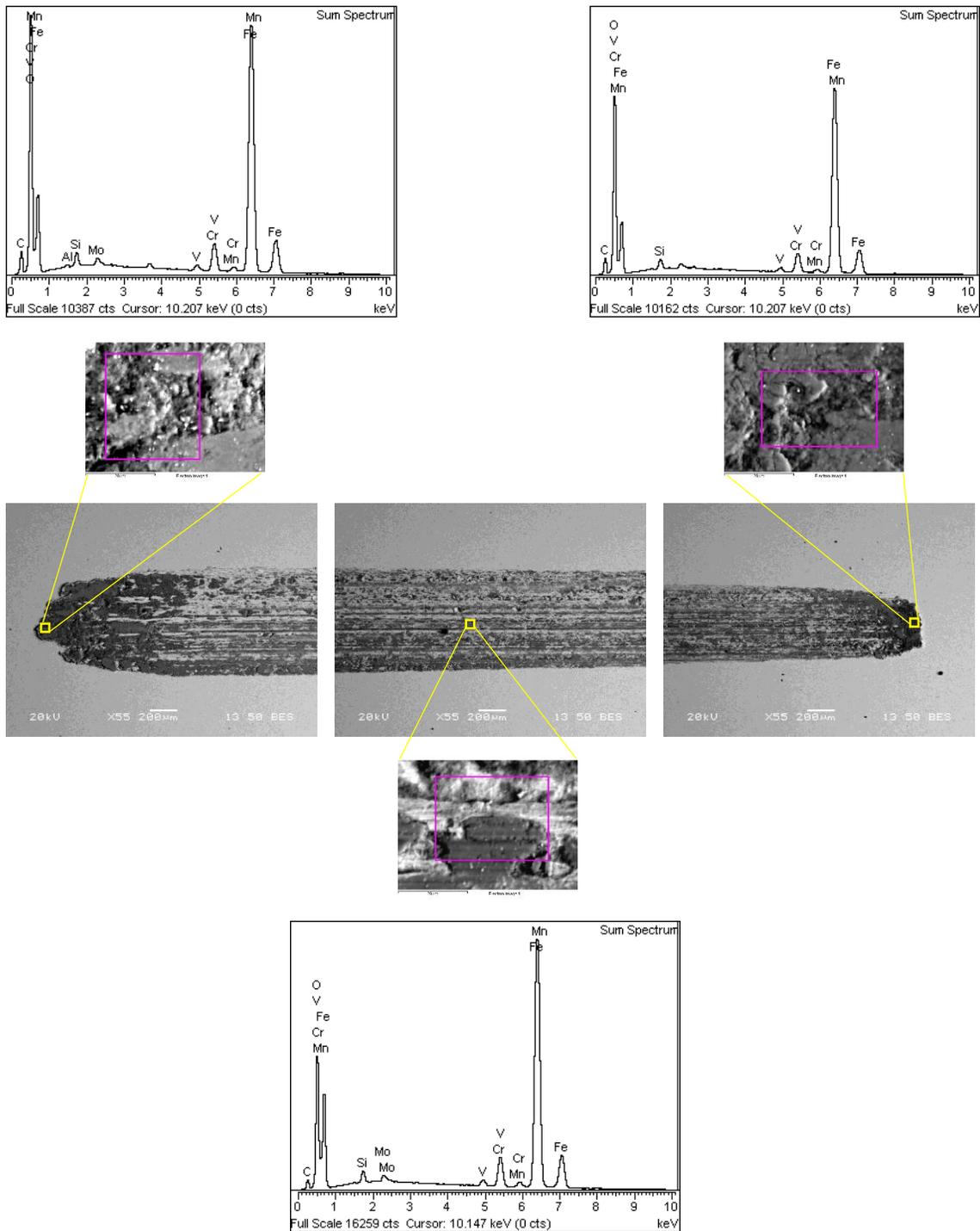


Figura B1. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 10 N, en un acero AISI H13 y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste seco. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x.

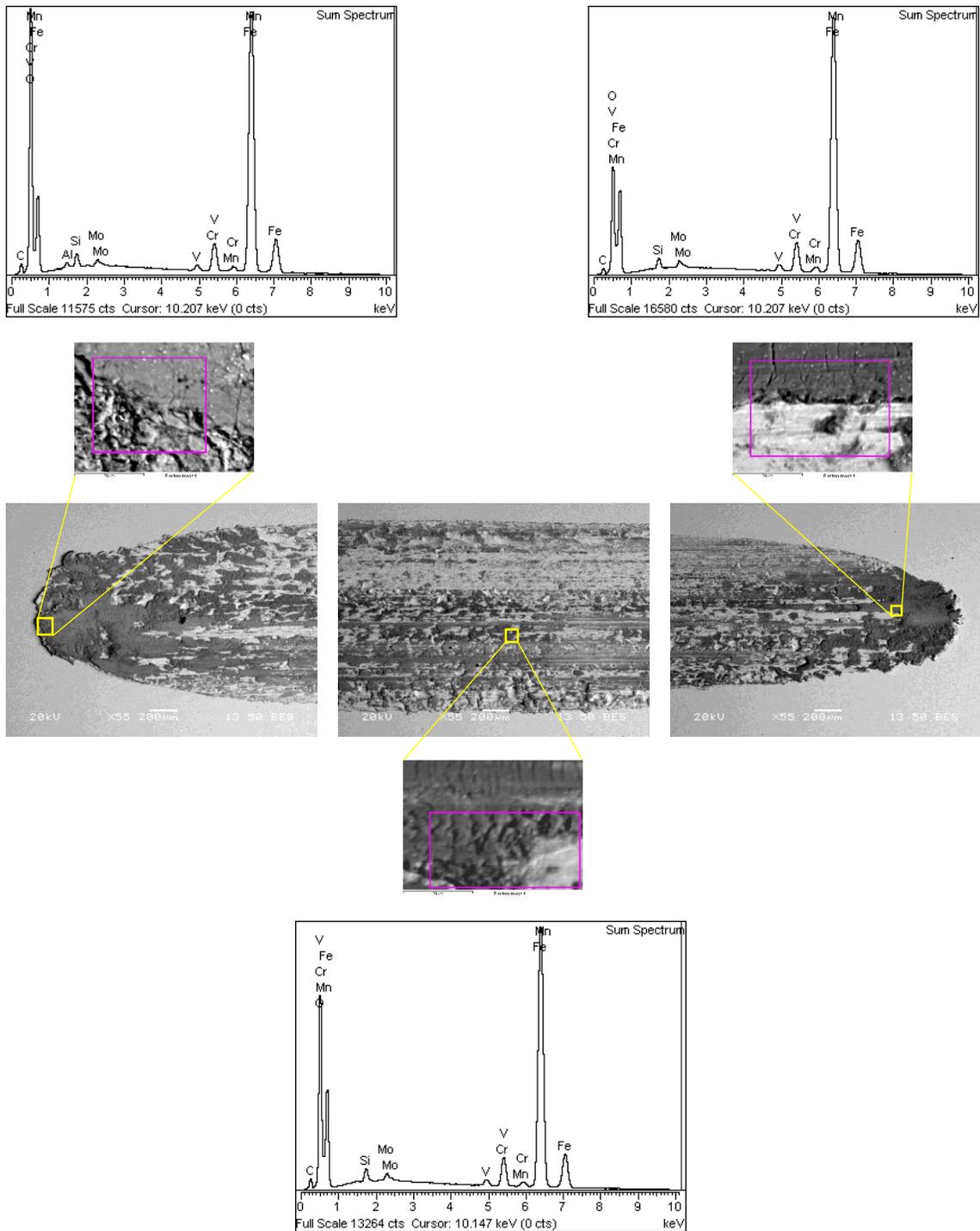


Figura B2. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 25 N, en un acero AISI H13 y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste seco. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x.

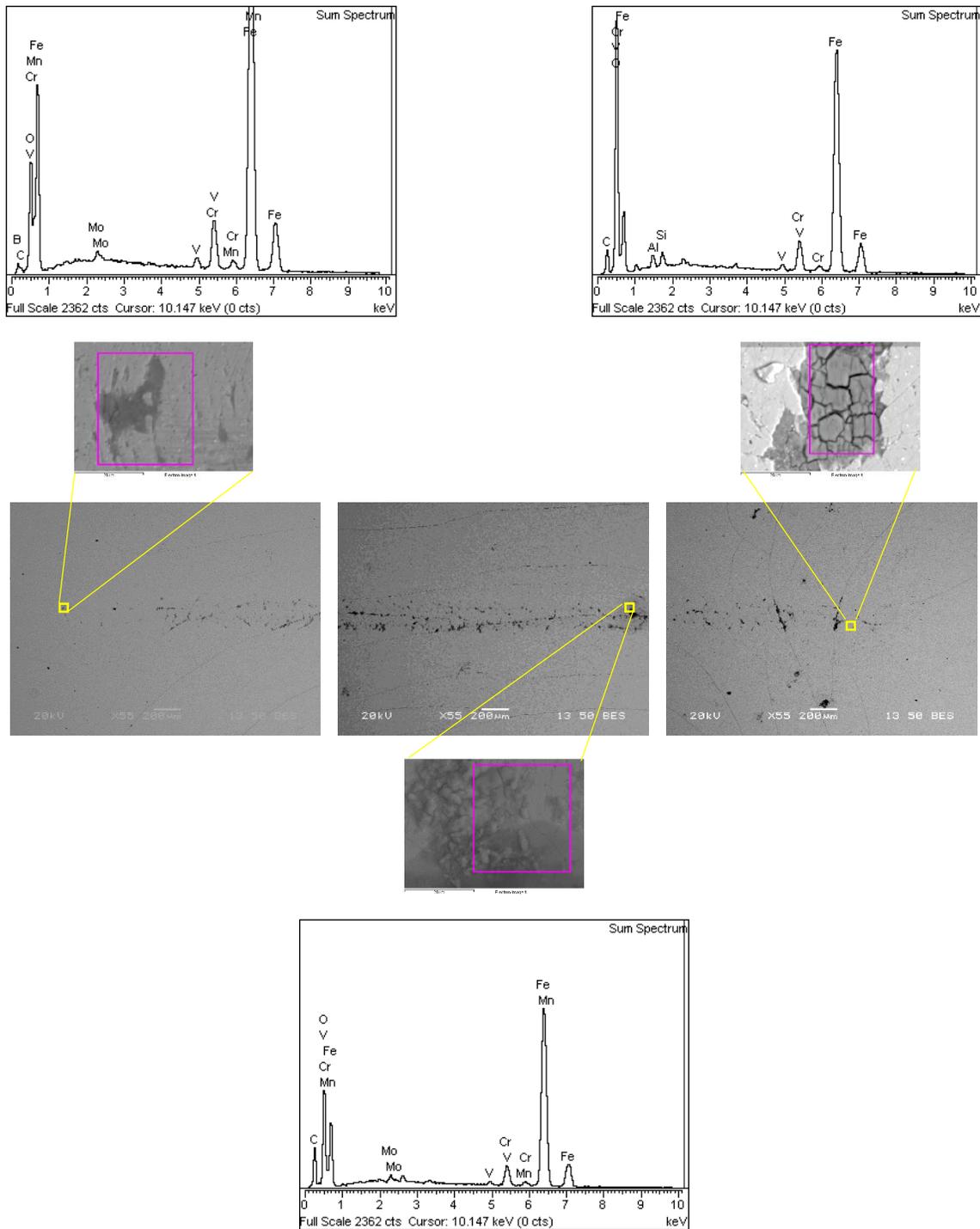


Figura B3. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 10 N, en un acero AISI H13 borurado y sometido a una distancia de deslizamiento de 100, en condiciones de desgaste seco. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x.

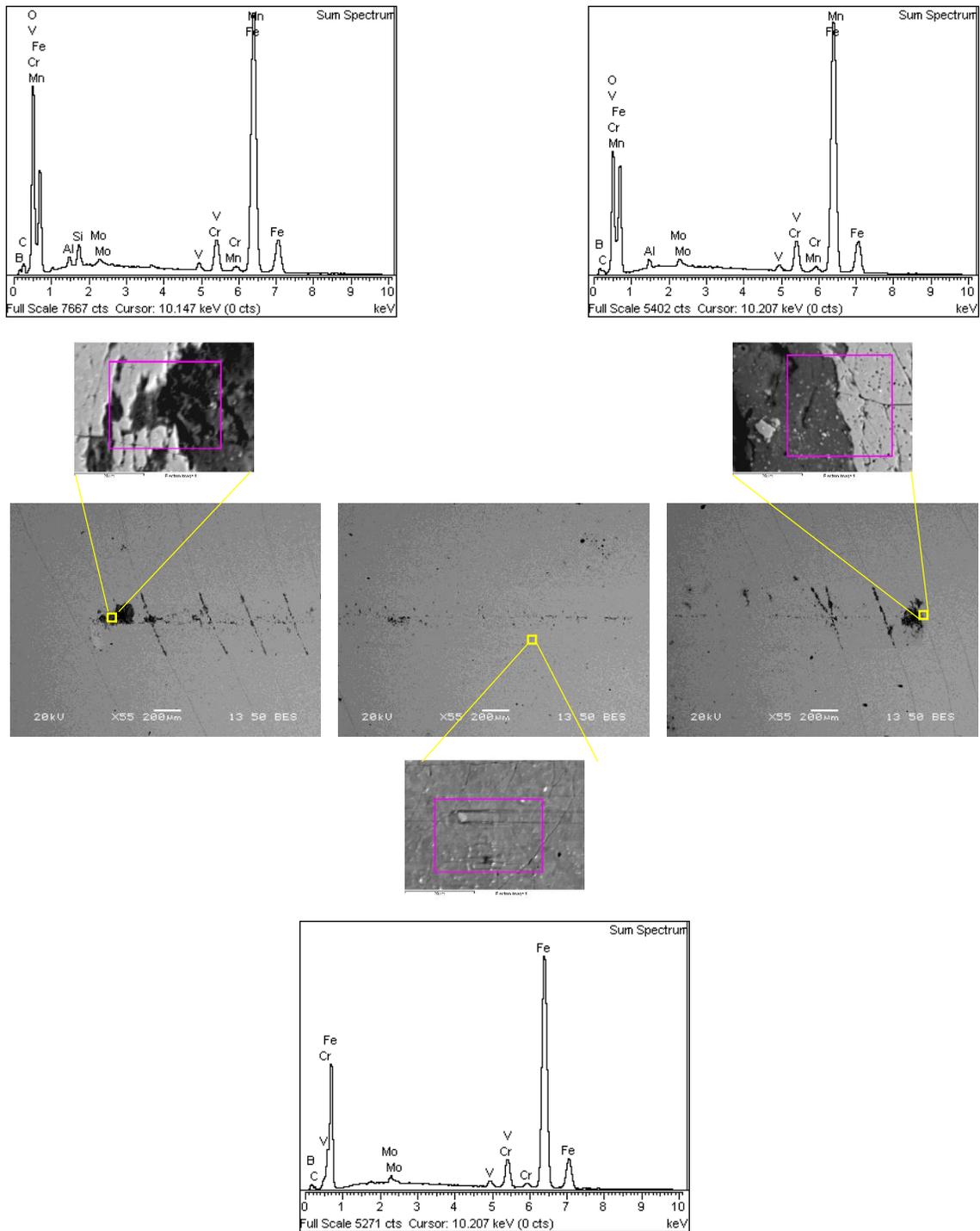


Figura B4. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 25 N, en un acero AISI H13 borurado y sometido a una distancia de deslizamiento de 100, en condiciones de desgaste seco. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x.

Apéndice C

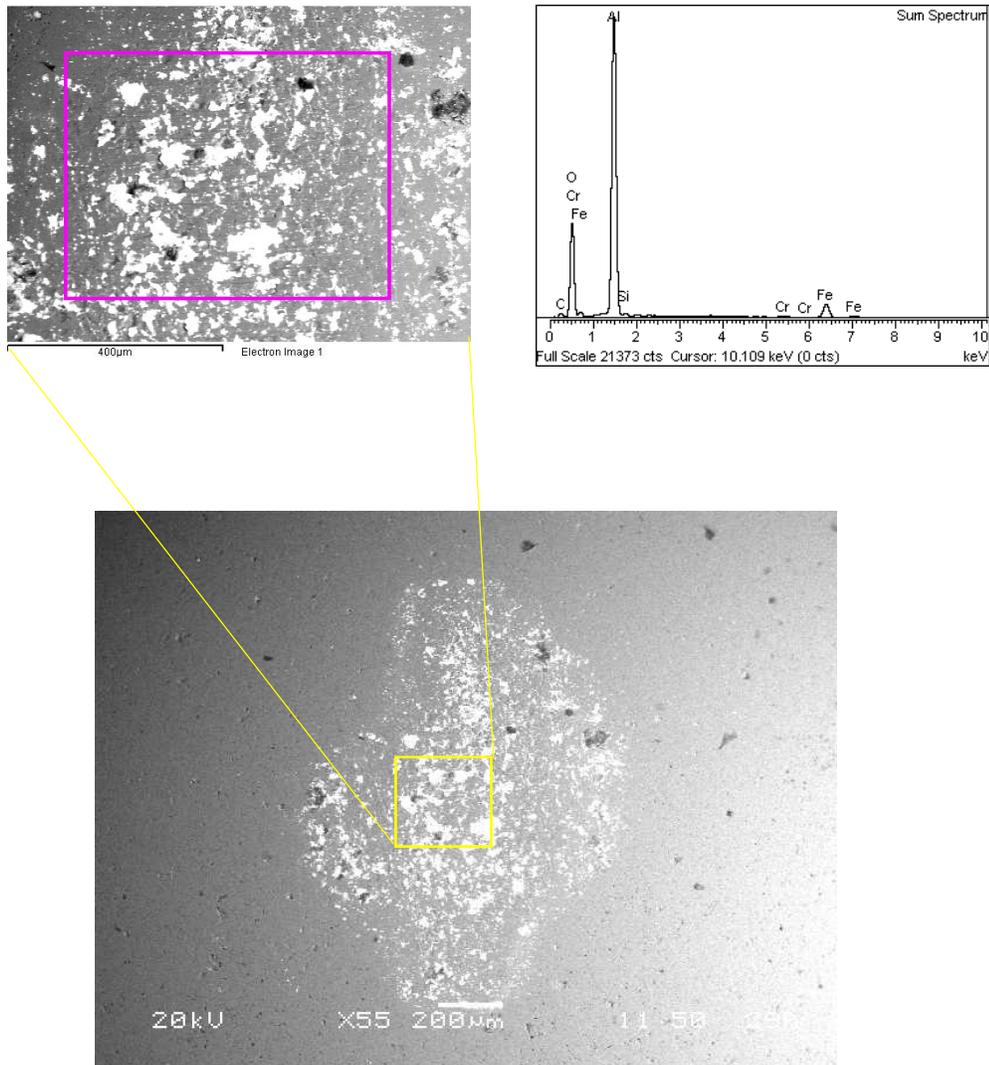


Figura C1. Estudios de EDS realizados sobre la superficie desgastada de una bola de alúmina que se utilizó para desgastar un acero AISI H13, aplicando una carga de 25 N y una distancia de deslizamiento de 100 m, bajo condiciones de desgaste seco.

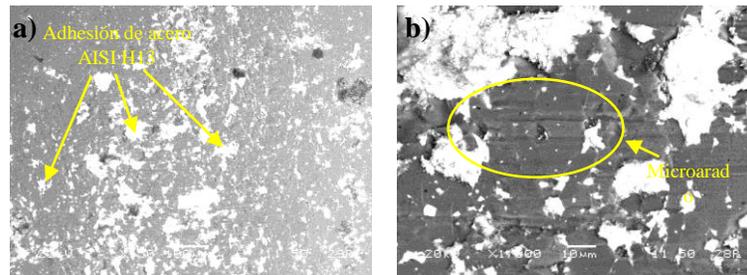


Figura C.2. Mecanismos presentes en la bola de alúmina a aumentos de a) 150x y b) 1000x.

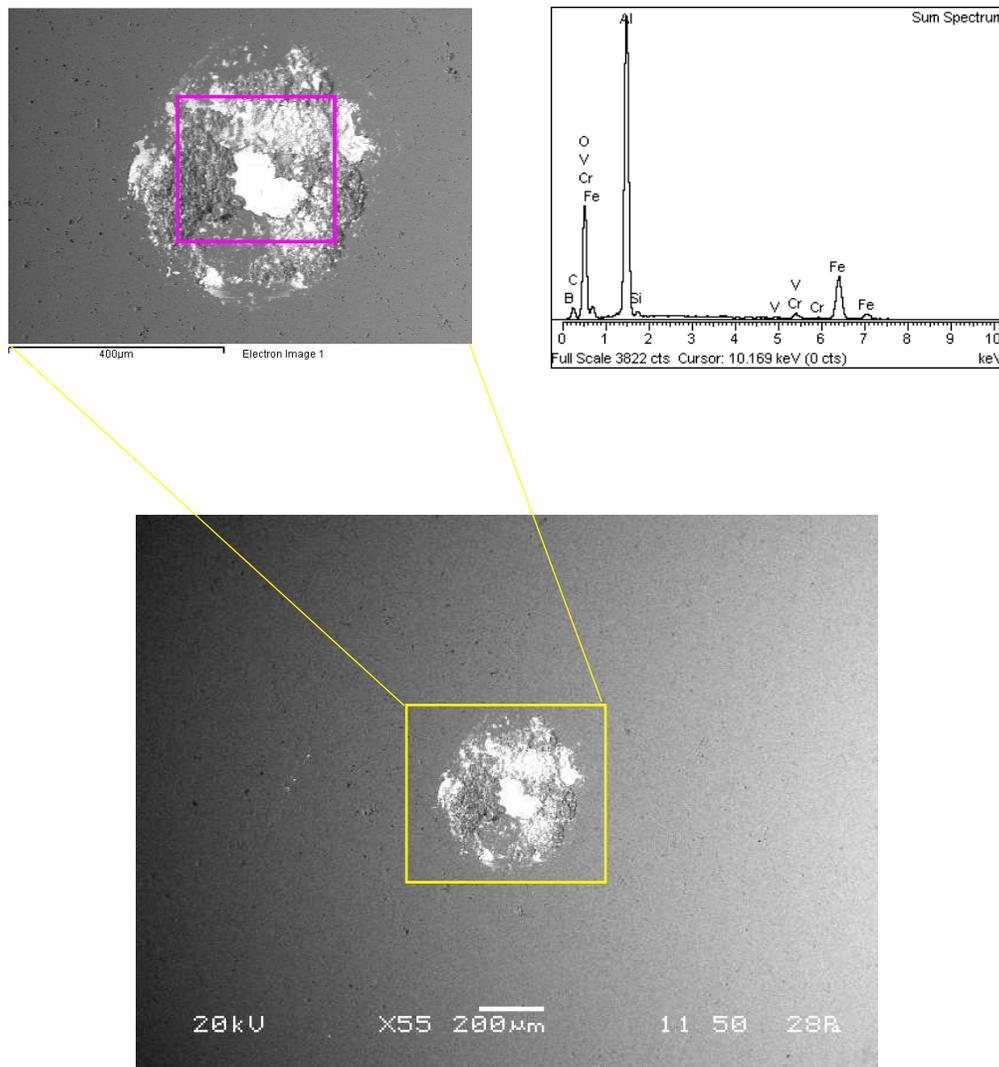


Figura C3. Estudios de EDS realizados sobre la superficie desgastada de una bola de alúmina que se utilizó para desgastar un acero AISI H13 borurado, aplicando una carga de 25 N y una distancia de deslizamiento de 100 m, bajo condiciones de desgaste seco.

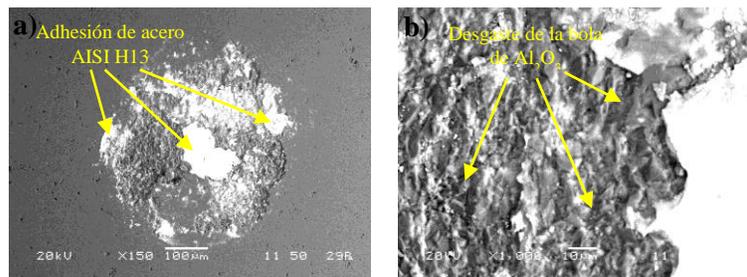


Figura C4. Mecanismos presentes en la bola de alúmina a aumentos de a) 150x y b) 1000x.

Apéndice D

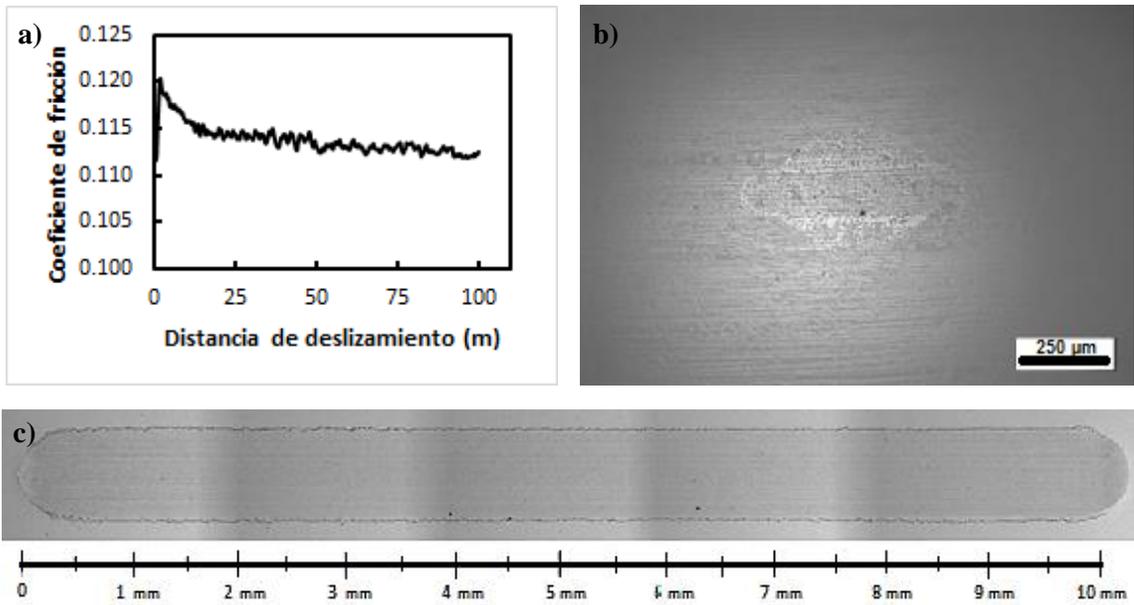


Figura D.1. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 75 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

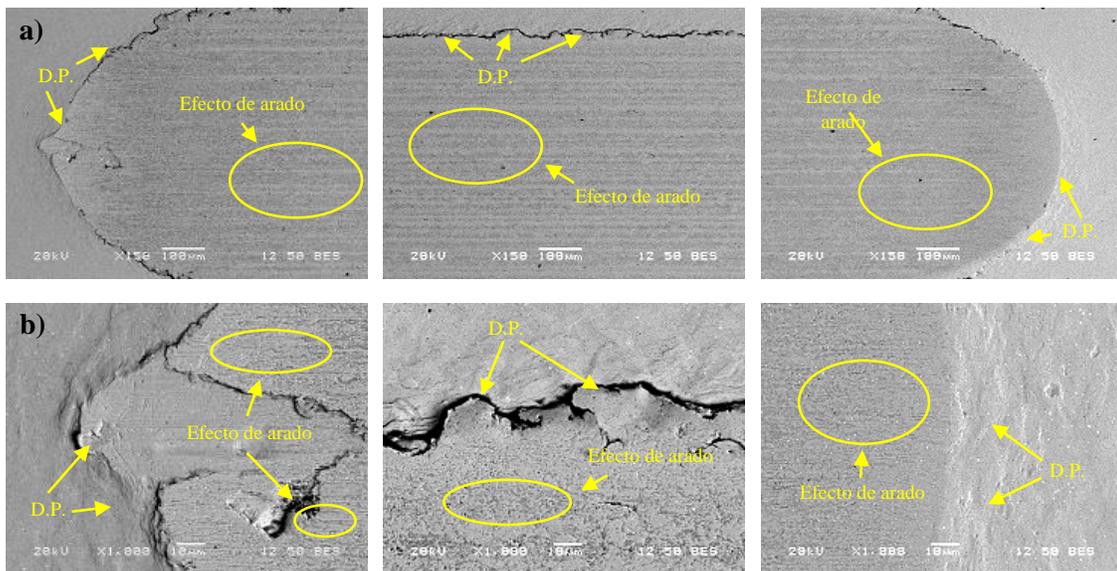


Figura D2. Micrografías a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 75 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13.

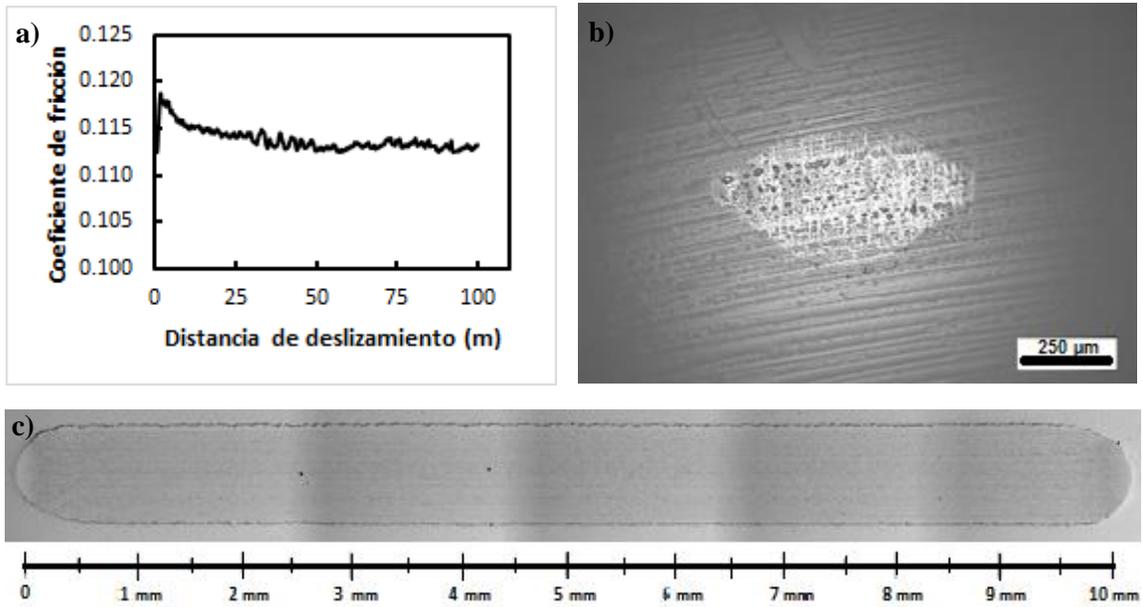


Figura D3. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 100 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

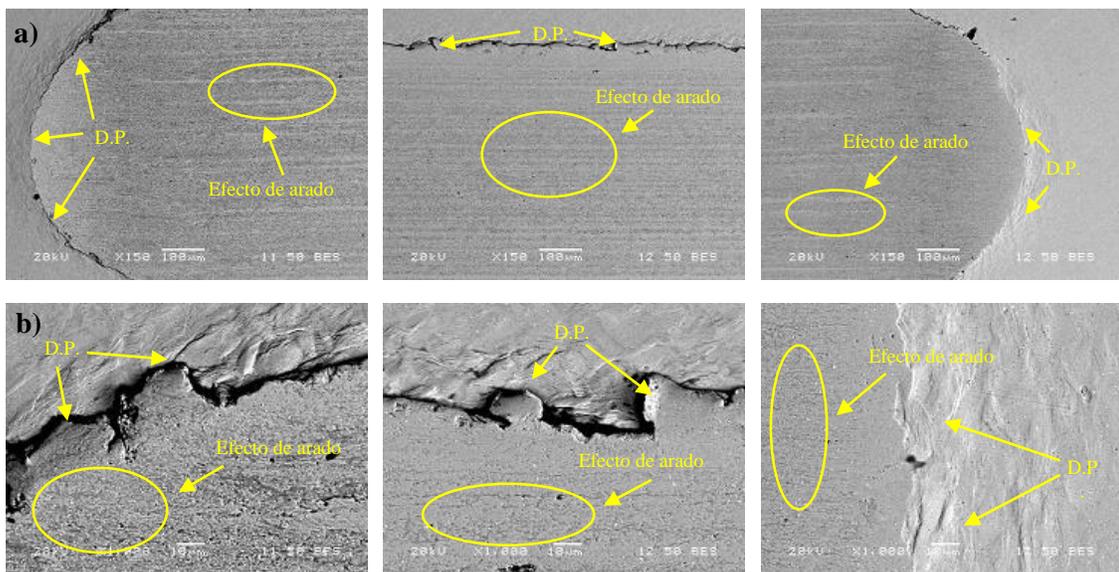


Figura D4. Micrografías a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 100 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13.

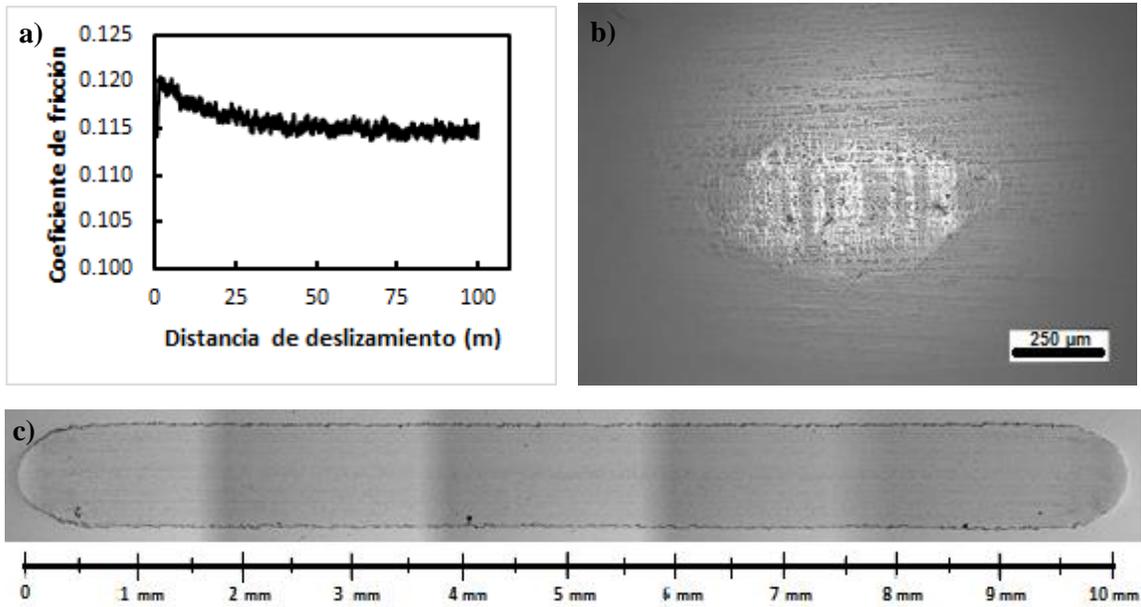


Figura D5. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 125 N sobre un acero AISI H13, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

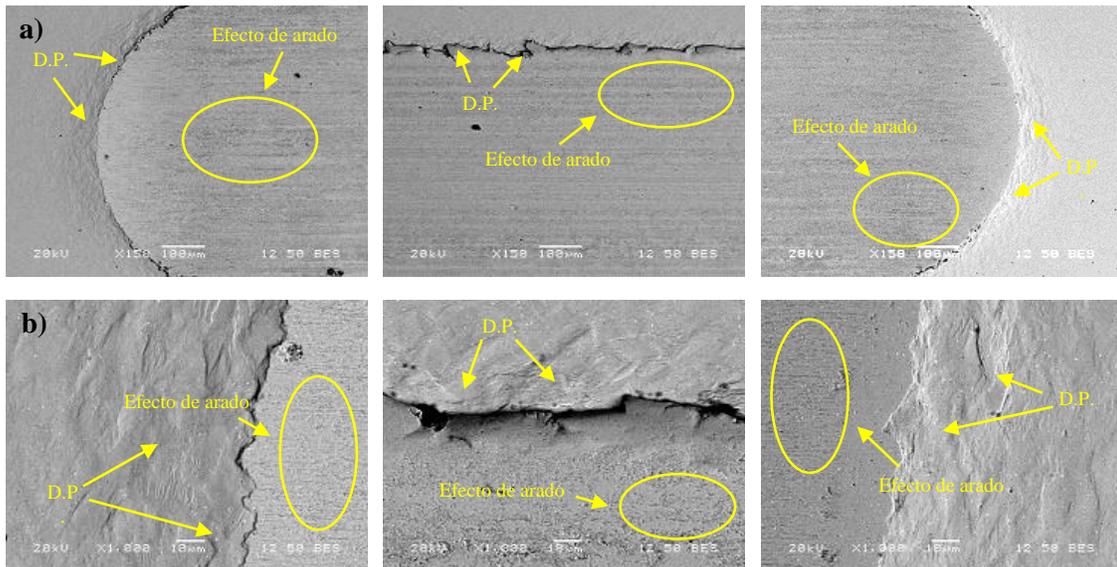


Figura D6. Micrografías a a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 125 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13.

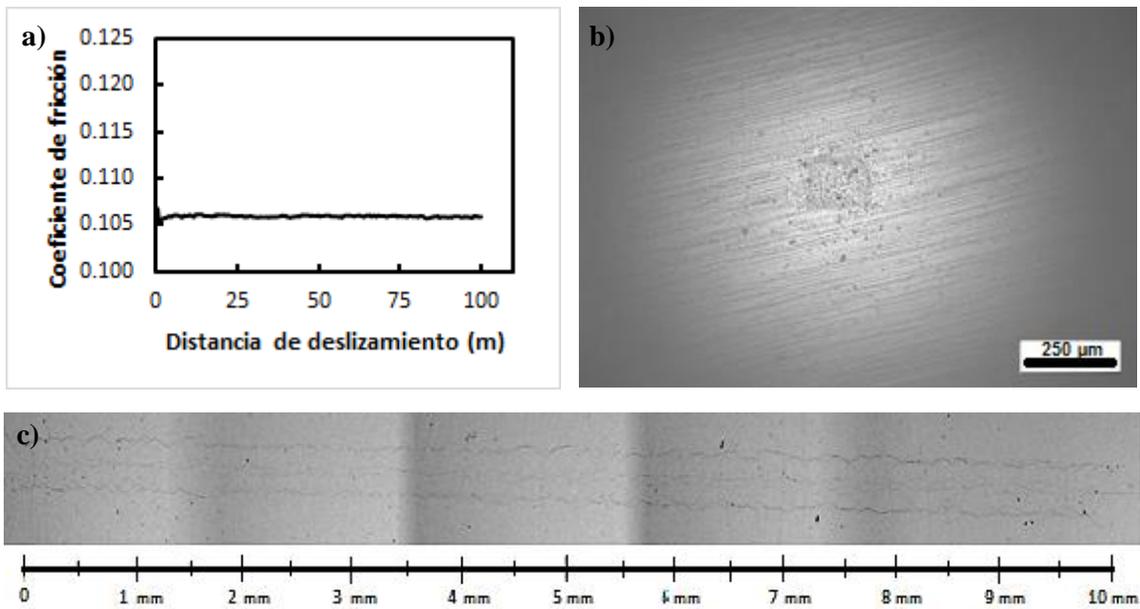


Figura D7. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 75 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

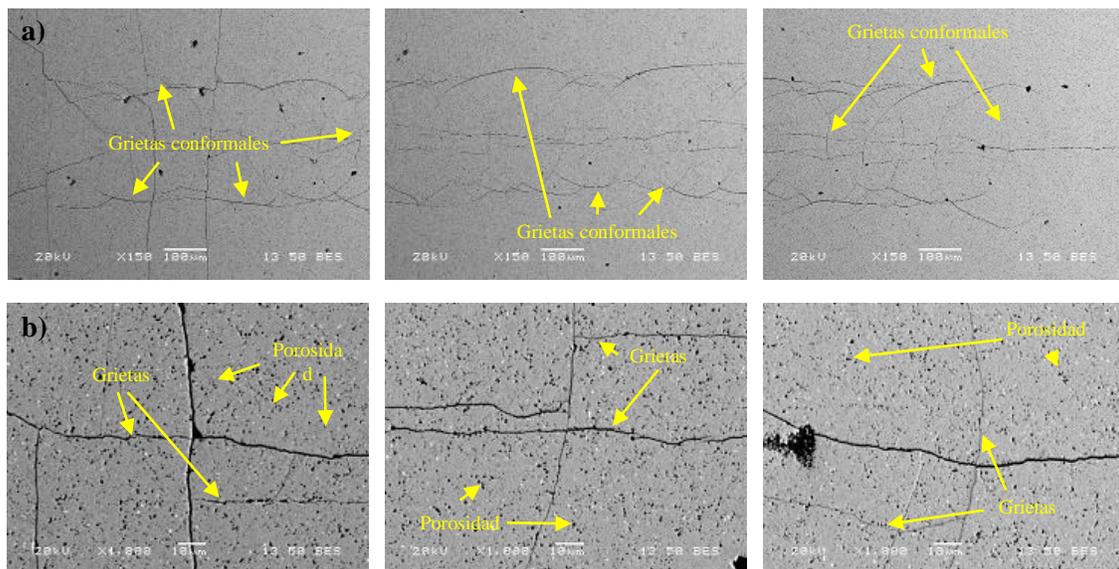


Figura D8. Micrografías a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 75 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13 borurado.

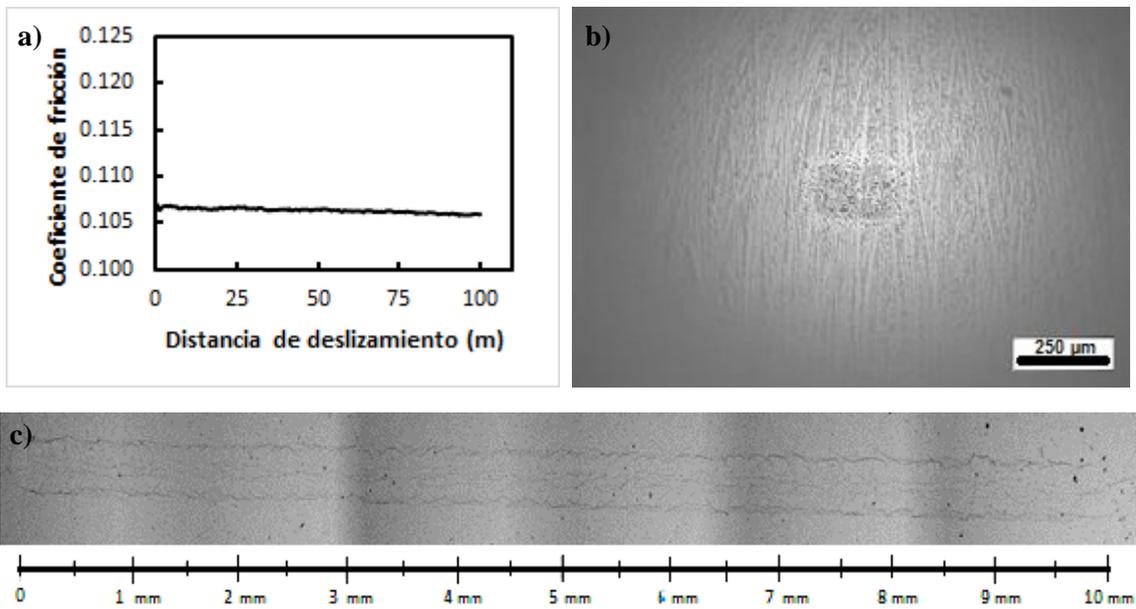


Figura D9. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 100 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

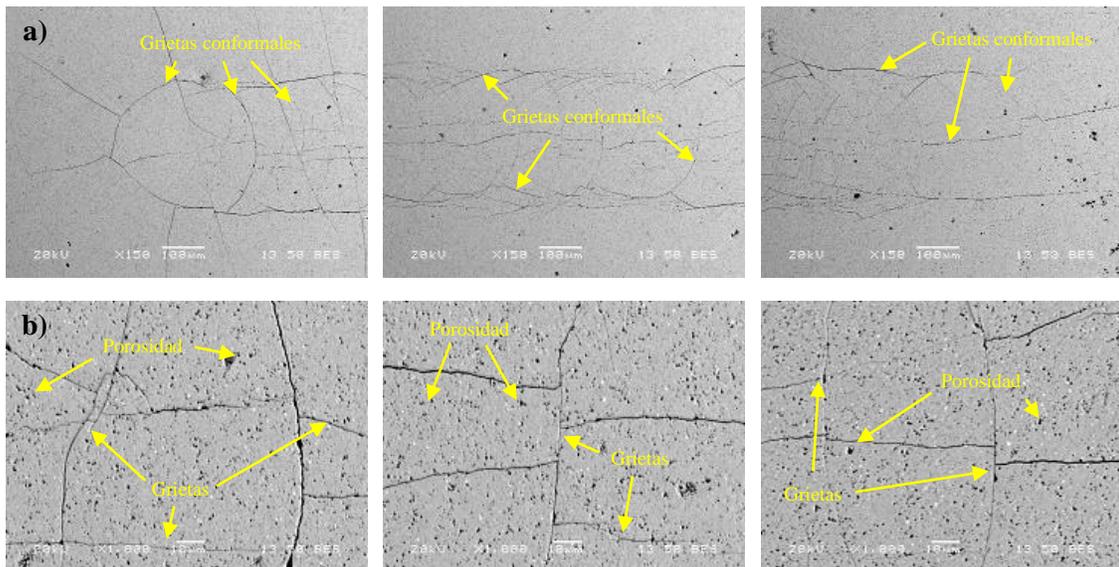


Figura D10. Micrografías a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 100 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13 borurado.

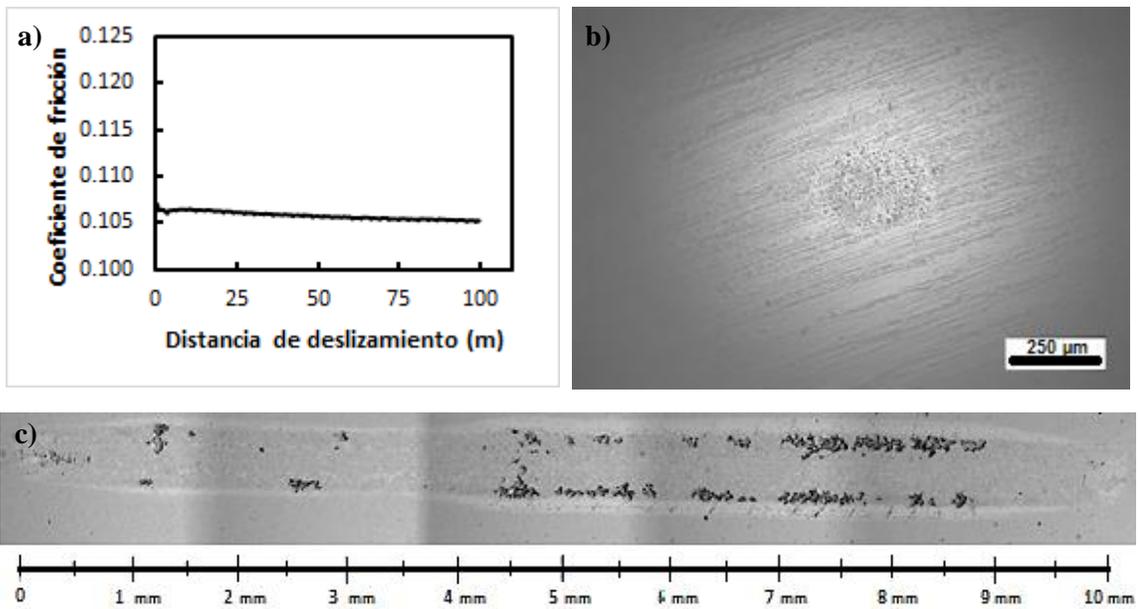


Figura D11. a) Coeficiente de fricción, b) marca en la huella de alúmina y c) canal de desgaste, representativos para la condición de carga aplicada de 125 N sobre un acero AISI H13 borurado, en condiciones de desgaste húmedo y a una distancia de deslizamiento de 100 m.

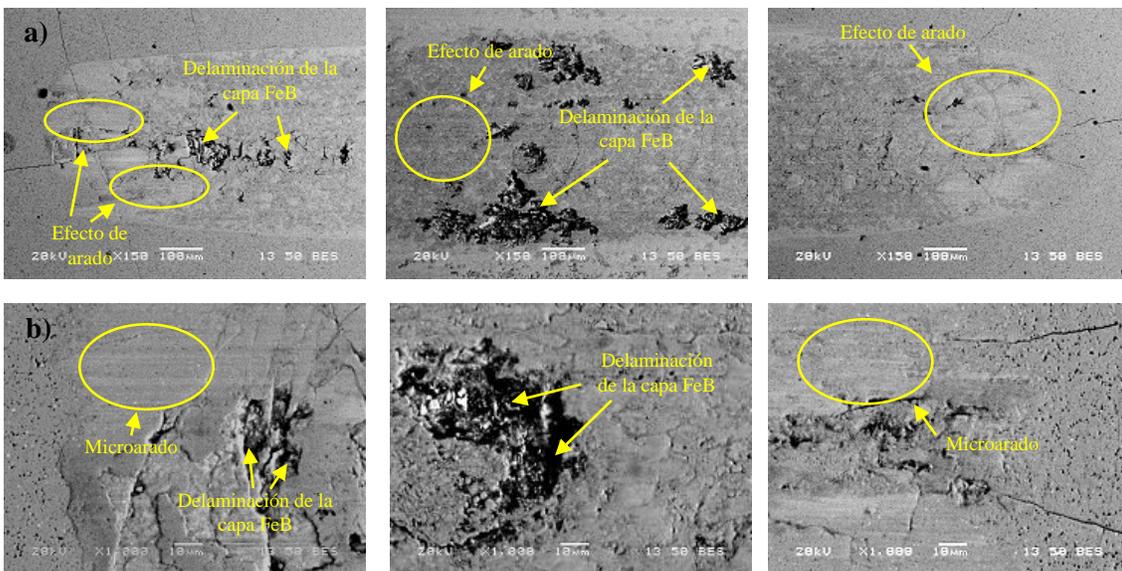


Figura D12. Micrografías a) 150x y b) 1000x, de la zona de los extremos y centro de un canal de desgaste, realizado a una carga de 125 N, en condiciones de desgaste húmedo y sobre un acero AISI H13 borurado.

Apéndice E

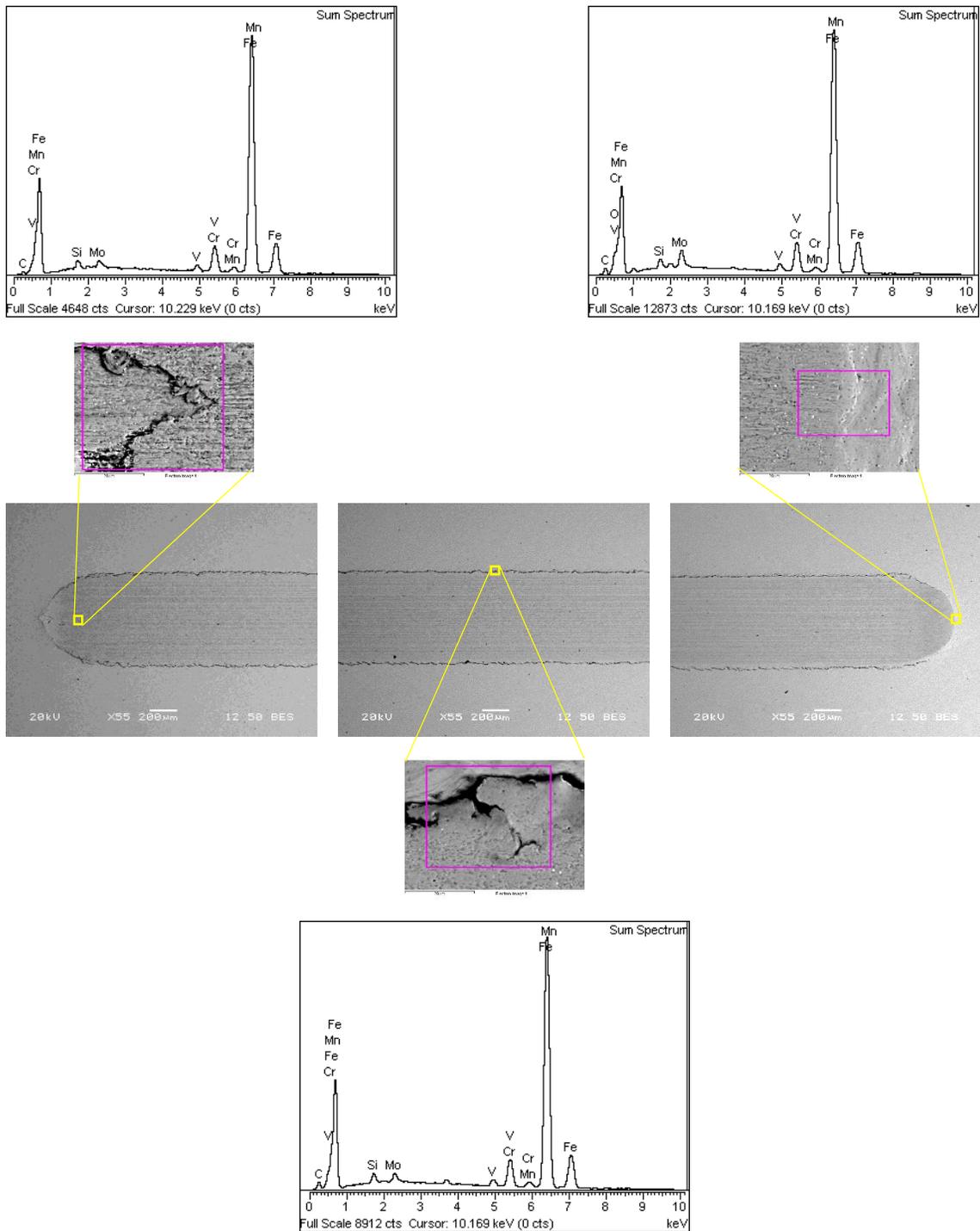


Figura E1. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 75 N, en un acero AISI H13 y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste húmedo. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x.

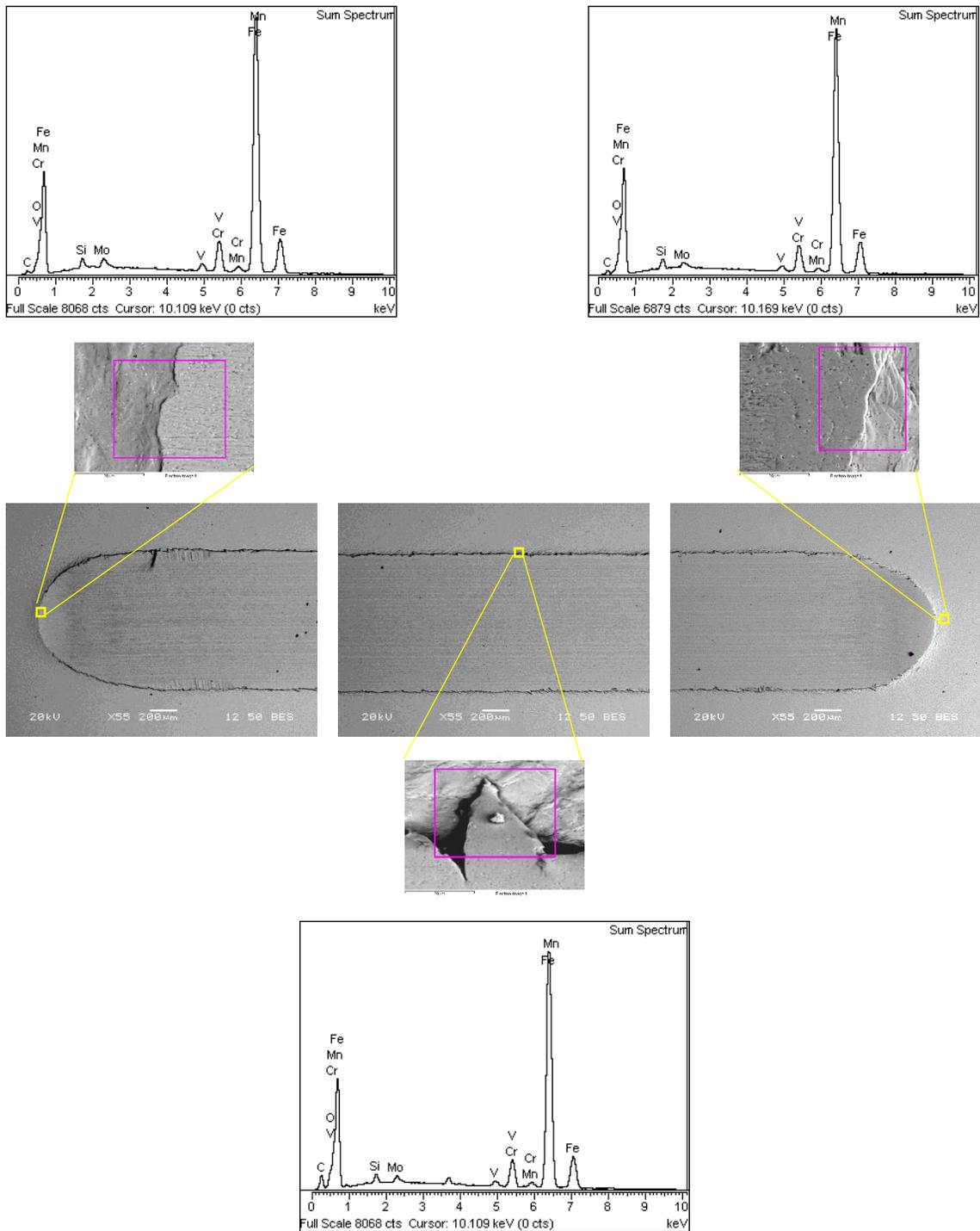


Figura E2. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 150 N, en un acero AISI H13 y sometido a una distancia de deslizamiento de 100 m, en condiciones de desgaste húmedo. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x.

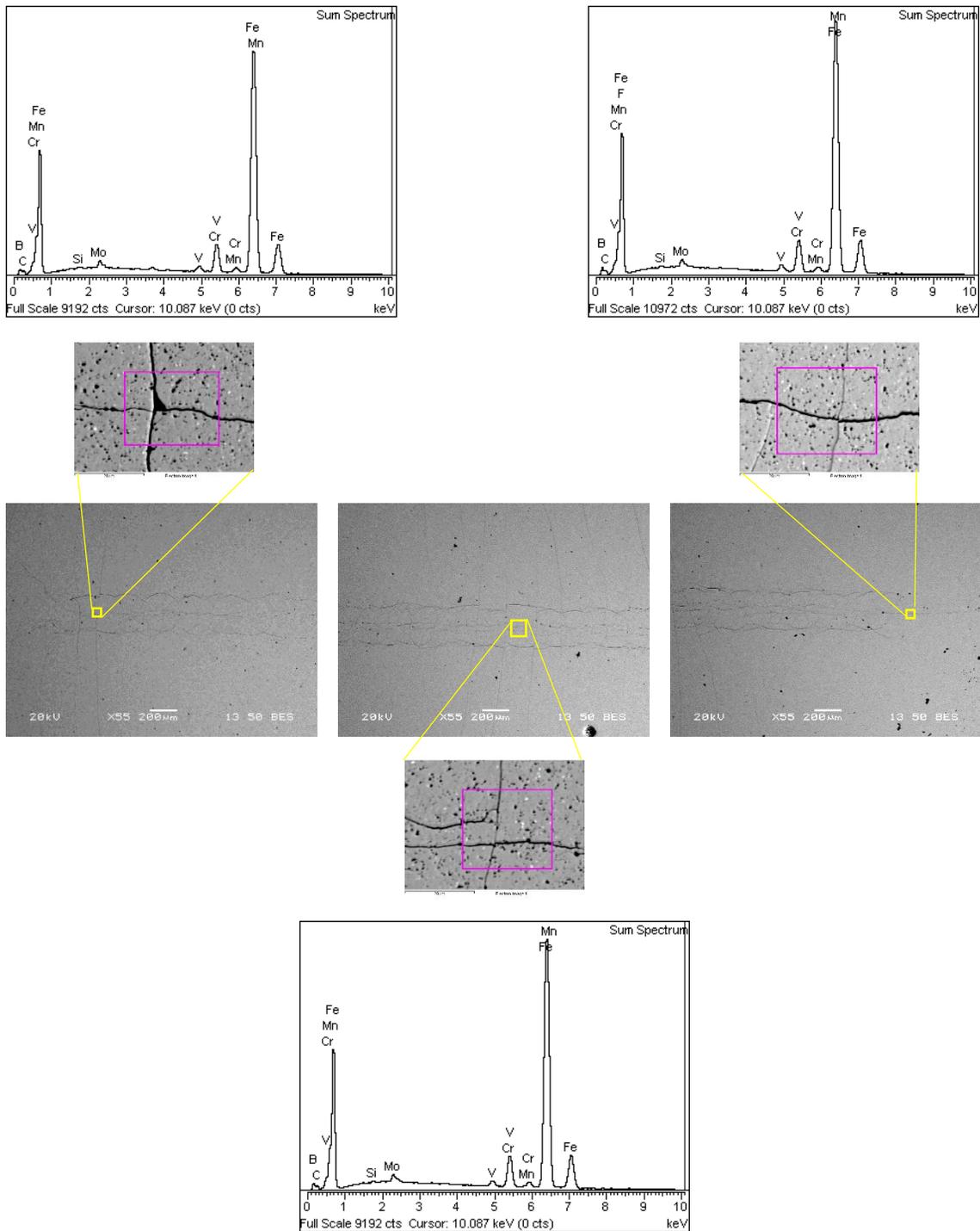


Figura E3. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 75 N, en un acero AISI H13 borurado y sometido a una distancia de deslizamiento de 100, en condiciones de desgaste húmedo. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x.

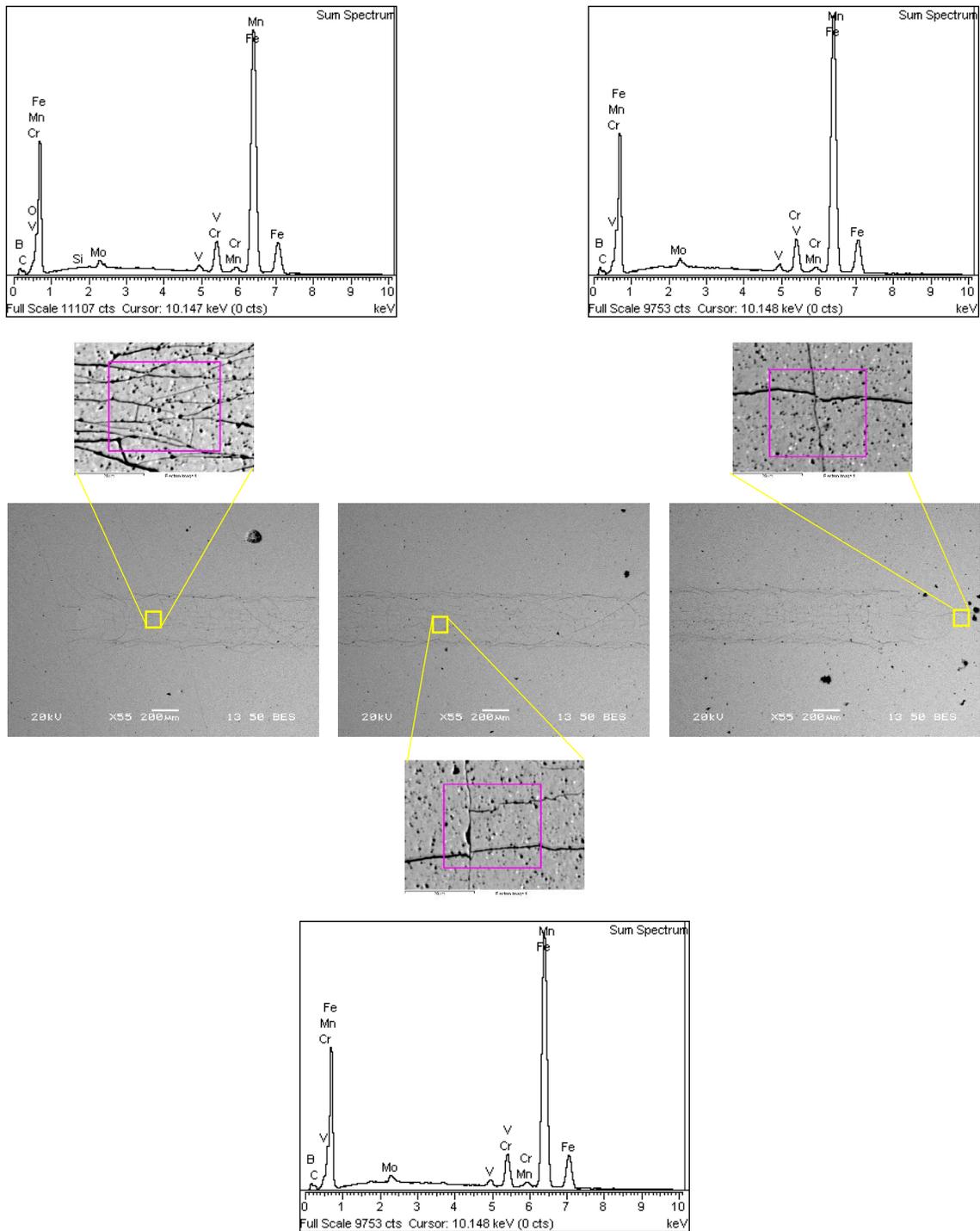


Figura E4. Estudios de EDS realizados sobre un canal de desgaste, correspondiente a una carga aplicada de 150 N, en un acero AISI H13 borurado y sometido a una distancia de deslizamiento de 100, en condiciones de desgaste húmedo. Los estudios de EDS se realizaron a aumentos de 2000x.

Apéndice F

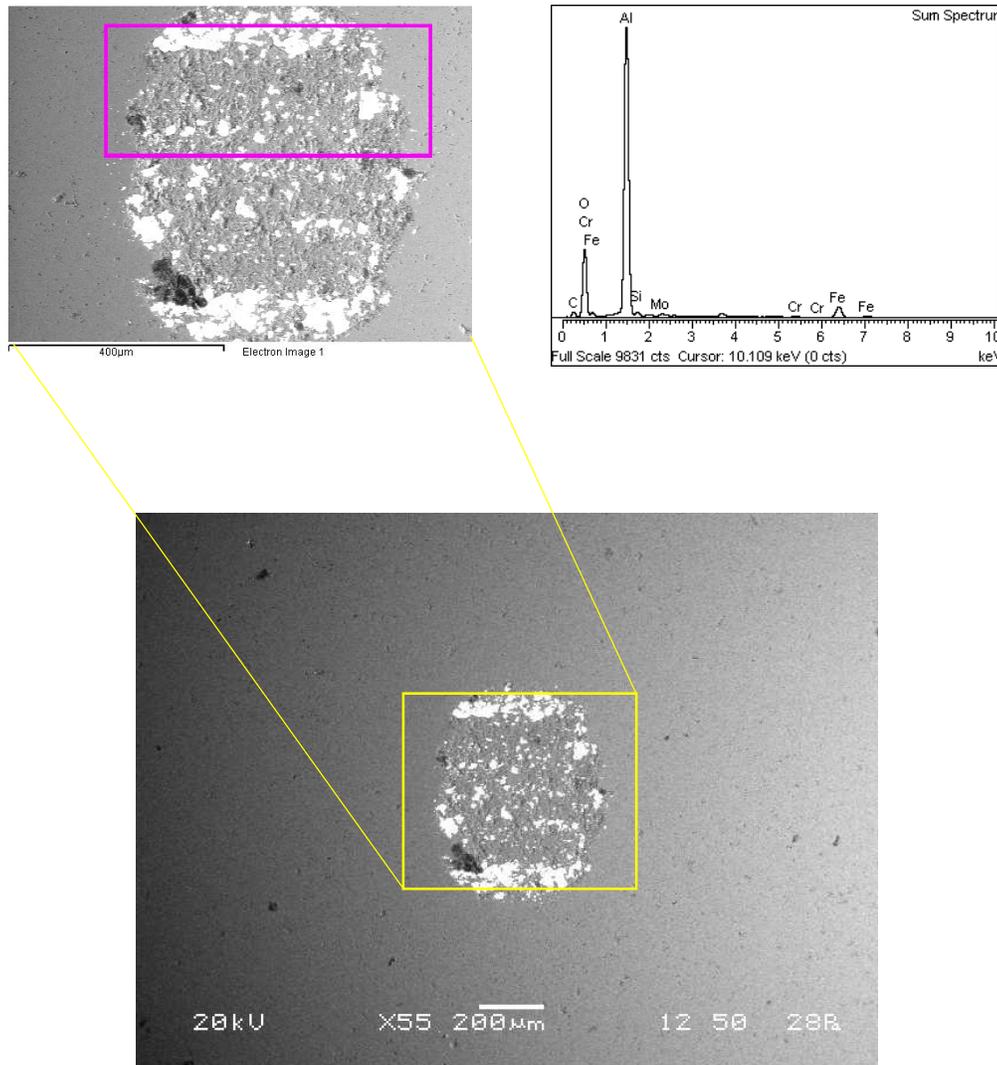


Figura F1. Estudios de EDS realizados sobre la superficie desgastada de una bola de alúmina que se utilizó para desgastar un acero un acero AISI H13, aplicando una carga de 150 N y una distancia de deslizamiento de 100 m, bajo condiciones de desgaste húmedo.

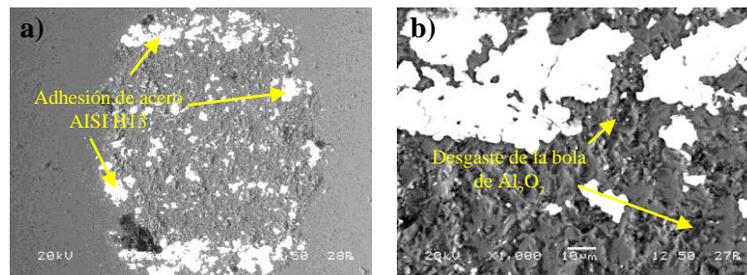


Figura F2. Mecanismos presentes en la bola de alúmina a aumentos de a) 150x y b) 1000x.

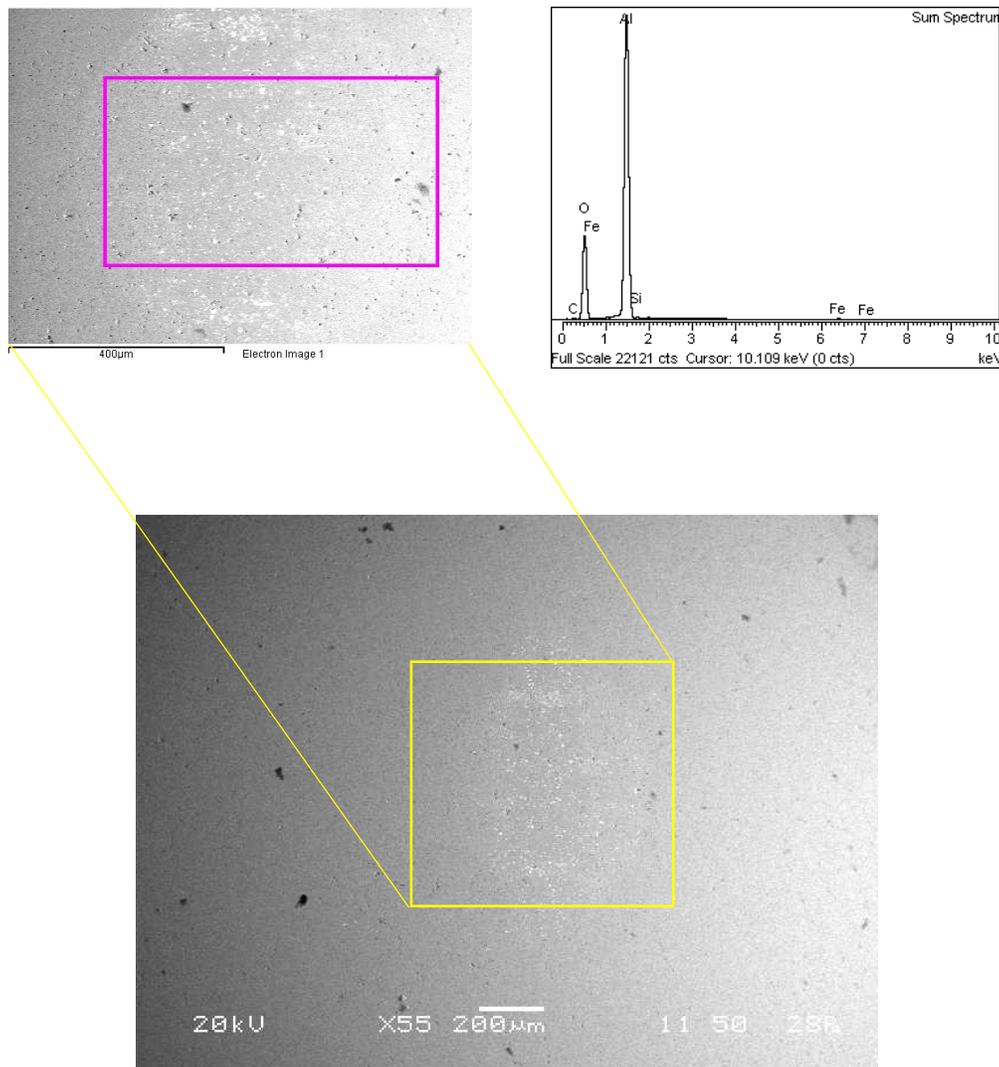


Figura F3. Estudios de EDS realizados sobre la superficie desgastada de una bola de alúmina que se utilizó para desgastar un acero un acero AISI H13 borurado, aplicando una carga de 150 N y una distancia de deslizamiento de 100 m, bajo condiciones de desgaste húmedo.

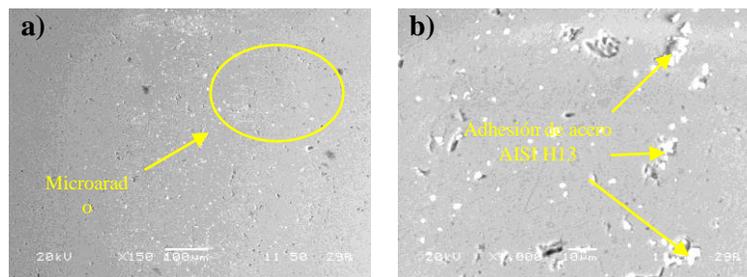


Figura F4. Mecanismos presentes en la bola de alúmina a aumentos de a) 150x y b) 1000x.