



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

**TESIS DE DOCTORADO EN CIENCIA Y  
TECNOLOGÍA DE MATERIALES**

***ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO Y LA GENERACIÓN DE  
PARTÍCULAS DE DESGASTE ESFÉRICAS EN FISURAS ABIERTAS POR FCR***

***Adrian Matias Urrestarazu***

BAHIA BLANCA

REPUBLICA ARGENTINA

2016





# Prefacio

---

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería/PLAPIQUI durante el período comprendido entre el 13 de Septiembre de 2011 y el 07 de Abril de 2016, bajo la dirección de la Doctora Lidia Quinzani – Departamento de Ingeniería Química UNS / Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI) y el Doctor Walter Tuckart – Departamento de Ingeniería UNS.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el ..../..../..... , mercedo la calificación de .....(.....)

## Resumen

---

El daño por fatiga de contacto que involucra la formación y desprendimiento de fragmentos de la superficie en forma de “escamas” es una de las principales causas de degradación y falla en elementos sometidos a movimiento relativo de rodadura, tales como dientes de engranajes, componentes de cojinetes rodantes, árboles de levas, rieles de ferrocarril, etc. Este modo de daño llamado “fatiga de contacto por rodadura” ó por sus siglas “FCR” (en inglés “rollingcontact fatigue” ó “RCF”) es fenomenológicamente complejo, y su comprensión realizaría un gran aporte al área de la tribología. Además, la generación de partículas de desgaste de forma esférica es asociada a los fenómenos de FCR.

En este trabajo de tesis se estudia el comportamiento de diferentes materiales sometidos a fatiga por rodadura de contacto. Esto involucra el análisis de penetración de diferentes fluidos en fisuras pre-existentes y el estudio de las partículas de desgaste esféricas generadas durante el mencionado proceso tribológico.

Con este propósito se realizaron ensayos en un tribómetro de contacto lineal y otro de contacto puntual. Los ensayos lineales fueron realizados con materiales de contacto rueda/pista de SAE 4140/SAE 4140 y SAE 4140/CAMPLO 2005 T3 con cuatro lubricantes diferentes. Los lubricantes utilizados fueron glicerina pura, agua pura, y dos disoluciones de la glicerina con agua al 75% y 50% en peso. Los lubricantes fueron mezclados con una pequeña cantidad de elementos trazadores para ser reconocidos dentro de la fisura mediante análisis de composición química puntual. Asimismo, los ensayos de contacto puntual se realizaron sobre rodamientos comerciales tipo crapodina, con pista de SAE 52100 y bolillas de Nitruro de Silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Como lubricante se utilizó vaselina líquida, libre de aditivos.

Por otra parte, las condiciones de contacto fueron modeladas mediante teorías termo-elastohidrodinámicas TEHD, para conocer principalmente la distribución de presión sobre la

superficie y el espesor de película lubricante generado en las diferentes condiciones de contacto.

Los resultados obtenidos en ensayos de FCR con contacto lineal en probetas de aleación de base aluminio muestran que en el rango de velocidad y presión de contacto aplicados, la penetración fluido lubricante dentro de las fisuras no depende de la viscosidad del fluido (en un rango de  $8 \times 10^{-4}$  a  $5.9 \times 10^{-1}$  Pa.s) y que el mecanismo produce una notable cantidad de partículas esféricas de desgaste en el interior de las fisuras.

Por otra parte, en los ensayos de contacto puntual se forman partículas de desgaste esféricas cuyos elementos componentes están relacionados con el estado de las superficies de rodadura. Al desarrollarse fisuras por RCF aparecen partículas esféricas con hierro, oxígeno y cromo.

Globalmente, los resultados de esta tesis permiten concluir que la nueva metodología propuesta para el análisis de penetración de líquido en diferentes condiciones de ensayo, permite identificar experimentalmente el comportamiento de las fisuras por FCR para diferentes materiales y condiciones. Además, las conclusiones alcanzadas en este estudio representan un aporte al conocimiento tecnológico del área de mantenimiento predictivo facilitando la toma de decisiones respecto de acciones que prevengan la falla prematura severa en equipos industriales.

# Abstract

---

Damage by fatigue contact, which involves the formation and detachment of fragments of a surface in the form of "flakes", is one of the main causes of degradation and failure in rolling elements subjected to relative motion, such as gear teeth, rolling bearings, camshafts, railroad tracks, etc. This mode of damage, known as "rolling contact fatigue" or, by its acronym, "RCF", is phenomenologically complex, and its understanding would make a great contribution to the area of tribology. Moreover, the generation of spherical wear particles is a phenomenon associated to FCR.

In this thesis, the behavior of different materials subjected to rolling contact fatigue is studied. This involves the analysis of the penetration of different fluids into pre-existing cracks and the study of the spherical wear particles generated during this tribological process.

With this purpose, different tests were carried out in tribometers of linear and point contact. Linear tests were conducted with wheel/track contact based in SAE 4140/SAE 4140 and SAE 4140/CAMPLO 2005 T3 using four different lubricants. The lubricants were: pure glycerin, pure water, and two solutions with 50 and 75wt% of glycerin in water. Small amounts of tracers were added to the lubricants to determine their depths of penetration inside the cracks by elemental analysis using Energy-dispersive X-ray spectroscopy. On the other hand, the point contact tests were performed on commercial thrust bearings based on SAE 52100 raceways and Silicon Nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) balls. Additive-free liquid vaseline was used as lubricant.

Moreover, thermo-elasto-hydrodynamic (TEHD) theories were used, mainly to calculate the pressure distribution on the surface and the lubricant film thickness generated at the different contact conditions.

The results obtained from the FCR line contact tests on specimens of aluminum based alloy show that, in the range of speed and contact pressure applied, the penetration of the lubricant fluid inside the cracks does not depend on the viscosity of the fluid (in the range of  $8 \cdot 10^{-4}$  to 0.59 Pa.s) and that the wear mechanism produces a considerable amount of spherical particles inside the cracks.

Furthermore, spherical particles are formed during the point contact wear tests, whose component elements can be associated with the state of the running surfaces. When RCF cracks appear, spherical particles are generated that contain iron, oxygen and chromium.

Overall, the results from this thesis allow to conclude that the proposed new methodology for the analysis of liquid penetration under different test conditions allow to experimentally identify the behavior of RCF cracks of different materials and conditions. Furthermore, the conclusions reached in this study represent a contribution to technological knowledge for the area of predictive maintenance, facilitating making decisions on actions to prevent severe premature failure in industrial equipment.

A mi familia, amigos, y compañeros por estar siempre



# Agradecimientos

---

Quisiera agradecer a la UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR, al Departamento de Ingeniería y a la Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI) por brindarme un lugar para realizar la tarea de investigación necesaria para continuar con mi formación académica.

Al CONICET, por haberme proporcionado los medios económicos para la realización de este trabajo.

A la Dra. Lidia Quinzani y el Dr. Walter Tuckart por su dirección de esta tesis, y a los profesores, amigos y compañeros de trabajo que me han ayudado a seguir adelante.

---

# Índice de contenidos

---

## Capítulo *Introducción general*

---

OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	3
REFERENCIAS	5

## Capítulo 2 *Tribología*

---

2.1	RESEÑA HISTÓRICA	6
2.2	CONCEPTOS SOBRE TRIBOLOGIA	10
2.2.1	Fricción	10
2.2.2	Desgaste y dañado superficial	12
2.2.3	Etapas de desgaste	12
2.3	Principales mecanismos de desgaste	13
2.3.1	Desgaste por adhesión	13
2.3.2	Desgaste por abrasión	15
2.3.3	Fatiga de contacto superficial	16
2.3.4	Desgaste corrosivo	17
2.3.5	Desgaste Fretting (micro-oscilatorio)	18
2.3.6	Desgaste Erosivo	18
2.3.7	Desgaste por Impacto:	19
2.4	RUGOSIDAD SUPERFICIAL	20
2.5	FUNDAMENTOS DE LUBRICACIÓN	21
	Regímenes de lubricación	22
	Curva de Stribeck	25
2.6	PARTÍCULAS DE DESGASTE Y FERROGRAFÍA ANALÍTICA	26
2.7	IMPORTANCIA INDUSTRIAL DE LA TRIBOLOGÍA Y ASPECTOS ECONÓMICOS	27
2.8	REFERENCIAS	28

---



## Capítulo 3 *Fatiga de contacto por rodadura*

---

3.1	DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN EL CONTACTO "IDEAL"	32
3.2	DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN EL CONTACTO "NO IDEAL"	36
3.3	ROL DE LA LUBRICACIÓN EHD EN LA FATIGA DE CONTACTO	40
3.4	MODOS DE FALLA EN FATIGA DE CONTACTO POR RODADURA	44
3.4.1	Falla sub-superficial temprana	44
3.4.2	Falla Sub-Superficial Tardía	44
3.4.3	Falla Superficial Temprana	44
3.5	EFFECTO DEL LUBRICANTE EN LA FATIGA DE CONTACTO	45
3.6	GENERACIÓN DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS DE DESGASTE POR RODADURA	49
3.7	REFERENCIAS	51

## Capítulo 4 *Materiales y métodos*

---

4.1	MATERIALES USADOS EN ENSAYOS DE CONTACTO LINEAL	54
4.1.1	Pistas y elemento rodante	54
4.1.2	Lubricantes	57
4.2	PREPARACIÓN DE LOS LUBRICANTES	58
4.2.1	Filtración	59
4.2.2	Agregado de trazadores solubles	59
4.3	MATERIALES USADOS EN ENSAYOS DE CONTACTO PUNTUAL	61
4.3.1	Pista y elemento rodante	61
4.3.2	Lubricante	62
4.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS METALES	62
4.4.1	Caracterización morfológica de superficies	62
4.4.2	Rugosidad superficial	64
4.5	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	65
4.5.1	Espectrometría de emisión óptica	65
4.5.2	Espectroscopia de energía dispersiva, EDS	66
4.6	CARACTERIZACIÓN DE ÓXIDOS	66
4.6.1	Espectroscopia fotoelectrónica de rayos-X (XPS ó ESCA)	66
4.6.2	Microscopía Raman	67
4.7	CARACTERIZACIÓN DE LOS LUBRICANTES	68
4.7.1	Estructura química	68
4.7.2	Viscosidad	69
4.8	ANÁLISIS DE PARTÍCULAS DE DESGASTE	69
4.9	GENERACIÓN DE FISURAS	70
4.10	DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS FISURAS GENERADAS	72
4.11	MEDICIÓN DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS Y DE ENSAYOS	72
4.12	REFERENCIAS	73

## Capítulo 5 *Ensayos de contacto lineal: Procedimiento experimental*

---

5.1	PREPARACIÓN DE PROBETAS CON SUPERFICIE PRE-FISURADAS	75
-----	--	----

5.1.1	Crecimiento de la fisura	75
5.1.2	Maquinado para obtener la fisura superficial abierta	78
5.1.3	Acabado superficial de las probetas	78
5.1.4	Sellado lateral de las fisuras abiertas	80
5.1.5	Medición de las fisuras	81
5.2	DENOMINACIÓN DE LAS PROBETAS	82
5.3	TRIBÓMETRO DE CONTACTO POR RODADURA LINEAL	83
5.4	CARACTERIZACIÓN DEL LUBRICANTE	84
5.5	ANÁLISIS DE LA FISURA	85
5.6	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LAS TRIBO-SUPERFICIES	88
5.7	REFERENCIAS	88

### Capítulo 6 *Ensayos de contacto puntual: Procedimiento experimental*

---

6.1	SUPERFICIES DE RODADURA	90
6.1.1	Esferas de rodamientos comerciales	92
6.1.2	Pistas de rodamientos comerciales	93
6.1.3	Esferas sueltas para elementos rodantes de uso múltiple	95
6.1.4	Esferas de rodamientos híbridos (nitruro de silicio)	96
6.1.5	Mejora superficial de las pistas de rodadura	96
6.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES RODANTES	98
6.3	TRIBÓMETRO DE CONTACTO POR RODADURA LINEAL	99
6.4	ANÁLISIS DEL LUBRICANTE	100
6.5	CARACTERIZACIÓN DE LAS TRIBO-SUPERFICIES	101
6.6	ANÁLISIS LAS PARTÍCULAS DE DESGASTE	101
6.7	REFERENCIAS	101

### Capítulo 7 *Modelización del contacto*

---

7.1	ECUACIONES BÁSICAS	102
7.1.1	Ecuación de Reynolds	103
7.1.2	Ecuación de Reynolds en contacto lineal	104
7.1.3	Ecuación de Reynolds en contacto puntual	104
7.1.4	Ecuación de energía	104
7.1.5	Ecuación de energía en contacto lineal	105
7.1.6	Ecuación de energía en contacto puntual	105
7.1.7	Ecuación de espesor de película lubricante	105
	Ecuación de espesor de película lubricante en contacto lineal	106
	Ecuación de espesor de película lubricante en contacto puntual	106
7.1.8	Ecuación de deformación elástica contacto lineal	106
7.1.9	Ecuación de deformación elástica para contacto puntual	107
7.1.10	Características del lubricante en contactos EHD	107
7.1.11	Relación viscosidad-presión en lubricantes	107
	Ecuación de Roelands en contacto lineal	108
	Ecuación de Roelands en contacto puntual	108

7.1.12	Ecuación de densidad para contacto lineal y puntual	108
7.2	DIAGRAMA DE BLOQUE SIMPLIFICADO PARA EL CONTACTO TEHD PUNTUAL Y LINEAL	109
7.3	REFERENCIAS	110

### Capítulo 8 *Resultados contacto puntual*

---

8.1	CALCULOS TEHD DE CONTACTO PUNTUAL	112
8.1.1	Contacto sin lubricación. Teoría de Hertz y validación con elementos finitos	112
8.1.2	Resultados del modelo TEHD de contacto puntual	114
8.1.3	Relación de película lubricante: parámetro $\lambda$	115
8.2	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS TRIBOLÓGICOS DE CONTACTO PUNTUAL	116
8.2.1	ANÁLISIS DE LA ETAPA INICIAL DE ASENTAMIENTO O "RUNNING-IN"	117
8.2.2	Partículas de desgaste esféricas	117
8.2.3	Rugosidad de superficies y parámetro $\lambda$ en la etapa de asentamiento	124
8.2.4	Análisis FTIR del lubricante	126
8.2.5	ETAPA ESTACIONARIA O "STEADY-STATE"	126
8.2.6	Partículas de desgaste esféricas	126
8.2.7	Rugosidad de superficies y parámetro $\lambda$ en etapa estacionaria	129
8.2.8	ETAPA FINAL: DEGRADACIÓN PRODUCTO DE FCR	134
8.2.9	Partículas de desgaste esféricas	134
8.3	DISCUSION DE RESULTADOS	147
8.4	CONCLUSIONES	151
8.5	REFERENCIAS	152

### Capítulo 9 *Resultados contacto lineal*

---

9.1	CALCULOS TEHD DE CONTACTO LINEAL (PISTA AISI-SAE 4140/RUEDA AISI-SAE 4140)	154
9.1.1	Contacto sin lubricación: Teoría de Hertz	155
9.1.2	Resultados del modelo TEHD de contacto lineal	155
9.1.3	Relación de película lubricante	158
9.2	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTACTO (pistas de acero)	159
9.3	SUPERFICIES DE FRACTURA Y RECONOCIMIENTO DEL TRAZADOR	159
9.3.1	Fluido lubricante: Glicerina	159
	Ensayo AC-100%GL-3000-N01	159
9.3.2	Fluido lubricante: 75% Glicerina / 25% Agua	160
	Ensayo AC-75%GL-3000-N01	160
9.3.3	Fluido lubricante: 50% Glicerina / 50% Agua	161
	Ensayo AC-50%GL-3000-N01	161
9.3.4	Fluido lubricante: 100% Agua	164
	Ensayo AC-100%AG-3000-N01	164
9.4	PARTÍCULAS DE DESGASTE ESFÉRICAS	167
9.5	CALCULOS TEHD DE CONTACTO LINEAL (PISTA CAMPLO 2005 T3/RUEDA AISI 4140)	168
9.5.1	Contacto sin lubricación: Teoría de Hertz	169
9.5.2	Resultados del modelo TEHD de contacto lineal	169
9.5.3	Relación de película lubricante	172
9.6	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTACTO (Pistas base aluminio)	173

9.6.1	Fluido lubricante: Glicerina	174
	Ensayo AL-100%GL-1000-N01	174
	Ensayo AL-100%GL-1000-N02	176
	Ensayo AL-100%GL-1000-N03	178
9.6.2	Fluido lubricante: 75% Glicerina / 25% Agua	180
	Ensayo AL-75%GL-1000-N01	180
	Ensayo AL-75%GL-1000-N02	182
	Ensayo AL-75%GL-1000-N03	184
9.6.3	Fluido lubricante: 50% Glicerina / 50% Agua	186
	Ensayo AL-50%GL-1000-N01	186
	Ensayo AL-50%GL-1000-N02	189
	Ensayo AL-50%GL-1000-N03	190
9.6.4	Fluido lubricante: Agua	192
	Ensayo AL-100%AG-1000-N01	192
	Ensayo AL-100%AG-1000-N02	194
9.7	PARTÍCULAS DE DESGASTE ESFÉRICAS	196
9.7.1	Fluido lubricante: Glicerina	196
	Ensayos AL-100%GL-1000-N01; AL-100%GL-1000-N02 y AL-100%GL-1000-N03	196
9.7.2	Fluido lubricante: 75% Glicerina/25%agua	198
	Ensayos AL-75%GL-1000-N01; AL-75%GL-1000-N02 y AL-75%GL-1000-N03	198
9.7.3	Fluido lubricante: 50% Glicerina/50%agua	201
	Ensayos AL-50%GL-1000-N01; AL-50%GL-1000-N02 y AL-50%GL-1000-N03	201
9.7.4	Fluido lubricante: agua	202
	Ensayos AL-100%AG-1000-N01; AL-100%AG-1000-N02	202
9.8	ANÁLISIS DEL LUBRICANTE	203
9.9	DISCUSIÓN	205
9.9.1	Interacción líquido en fisuras abiertas por fatiga de contacto	205
9.9.2	Identificación de Partículas de Desgaste Esféricas	208
9.10	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	209
9.11	REFERENCIAS	210

## Capítulo 10 Conclusiones

---

10.1	CONTACTO PUNTUAL	212
10.2	CONTACTO LINEAL	213

## Capítulo 11 Trabajos futuros

---

11.1	TRABAJOS FUTUROS	214
------	------------------	-----

# Índice de figuras

## Capítulo *Introducción general*

## Capítulo *Tribología*

Figura 2.1: Dibujo egipcio en la tumba de Djehutihotep, 1880 a.C., y detalle ampliado [3]	8
Figura 2.2: Dibujos de Leonardo Da Vinci sobre el rozamiento	8
Figura 2.3: Esquema del tribómetro utilizado por Coulomb en 1785 [6]	10
Figura 2.4: Adhesión durante el deslizamiento de dos superficies en contacto	13
Figura 2.5: Proceso de transferencia de metal debido a adhesión (adaptado de [11])	14
Figura 2.6: Modelo de deformación en el contacto de las asperezas de la superficie para materiales dúctiles y frágiles (adaptado de [12])	14
Figura 2.7: Superficie de una aleación de Al-Si dañada por desgaste adhesivo(izq.) y material transferido de latón sobre una superficie de aluminio(der.) [11]	15
Figura 2.8: Ejemplificación de movimiento de partículas abrasivas en proceso de desgaste abrasivo de tres cuerpos	16
Figura 2.9: Imágenes SEM que muestran ejemplos de tres procesos de desgaste abrasivo: (a) corte; (b) formación de cuña; y (c) surcado [13]	16
Figura 2.10: Esquema del proceso de formación de fisuras por rodadura de contacto (adaptado de [14])	16
Figura 2.11: Superficie en la que se observa el descascarillado típico de degradación por fatiga de contacto por rodadura. Izq.: 100x; Der.: 200x	17
Figura 2.12: Representación de desgaste con formación de capa de óxido	18
Figura 2.13: Ciclo de remoción de la película de óxido en corrosión-fretting (Adaptado de [15])	18
Figura 2.14: Posibles mecanismos de erosión a) Abrasión bajas a bajos ángulos de impacto, b) Fatiga superficial por baja velocidad y alto ángulo de impacto, c) deformación plástica múltiple o por velocidad moderada, y alto ángulo de impacto o fractura frágil d) soldadura con la superficie a altas velocidades de impacto, e) erosión macroscópica con efectos secundarios, f) degradación de la red cristalina por impacto con átomos (Adaptado de [11])	19
Figura 2.15: Ilustración esquemática de los mecanismos de desgaste por impacto (adaptado de [11])	20

Figura 2.16: Curva de Stribeck mostrando el coeficiente de fricción en función de $hN/P$ para los diferentes regímenes de lubricación	26
Figura 2.17: Esquema donde se observa la pérdida de utilidad de piezas con el porcentaje estimado de la importancia económica de cada una [8]	28

### Capítulo 3 *Fatiga de contacto por rodadura*

Figura 3.1. Los elementos mecánicos más comunes sometidos a FCR, Izq.: Engranajes; Der.: Rodamientos	30
Figura 3.2: Degradación superficial producto de FCR, Izq.: Vía de ferrocarril; Der.: Pista exterior dañada perteneciente a un rodamiento de rodillos	31
Figura 3.3: a) Esquematación tridimensional del contacto entre dos esferas de radios $R_1$ y $R_2$ , bajo un esfuerzo $P$ , con área de contacto circular de radio $a$ ; b) distribución de presión de contacto semi-elíptica resultante [3]	33
Figura 3.4: a) Geometría de contacto entre dos cilindros $R_1$ y $R_2$ , bajo un esfuerzo $P$ , con área de contacto rectangular [3]	33
Figura 3.5: Distribución de tensiones normales $\sigma_{xx}$ , $\sigma_{yy}$ y $\sigma_{zz}$ y la tensión de corte unidireccional $\tau_{11}$ debajo del punto central del área de contacto para el contacto puntual (a) y lineal (b) [3]	34
Figura 3.6: Diferentes perfiles de superficies con el mismo valor de $R_a$ [1]	36
Figura 3.7: Distribución de presión de contacto para un cilindro y una superficie plana sin rugosidad (distribución hertziana) y con una rugosidad del cilindro $R_a = 0.44$ mm y $P_z = 2.2$ GPa [8]	37
Figura 3.8: Tensiones de contacto de Von Mises para una superficie plana y un cilindro con una rugosidad $R_a = 0.44$ mm y $p_H = 2.2$ GPa [8]	37
Figura 3.9: Movimiento de la distribución de la tensión de corte debido al incremento de los valores del coeficiente de fricción [11]	39
Figura 3.10: Distribución de la tensión de corte máxima en la dirección principal para el deslizamiento de dos cuerpos con $\mu = 0.2$ [3]	39
Figura 3.11 Distribución del espesor de la película lubricante y la presión de contacto en la lubricación EHD [14]	40
Figura 3.12: Coeficiente presión-viscosidad en función de la viscosidad cinemática para distintos aceites [12]	43
Figura 3.13: Contacto entre las asperezas superficiales (Sup.) y por causa de partículas en el aceite produciendo la nucleación de daño por FCR (Inf.). Adaptado de [3]	45
Figura 3.14: Simulación del espesor de película lubricante y presión de contacto para una lubricación con grasa (Velocidad 0.87 m/s y carga 100 KN) [19]	46
Figura 3.15: Ilustración esquemática del mecanismo de presión hidráulica en las superficies de la fisura [3]	47
Figura 3.16: Imágenes de ferrograma obtenidas en microscopio óptico (izq., 200x) y microscopio electrónico (der., 6000x) con partículas esféricas de caja reductora 200 HP de potencia	50

### Capítulo 4 *Materiales y métodos*

Figura 4.1: Imagen de microscopio óptico (100x) donde se observa ferrita aliotromorfa y perlita además de la gran cantidad de sulfuros (puntos negros)	56
Figura 4.2: Izq.) Imagen de microscopio electrónico (500x) donde se observa gran cantidad de sulfuros. Der.) Espectro EDS donde se detecta la presencia de azufre	56
Figura 4.3: Balanza de precisión utilizada para la preparación de mezclas lubricantes	59
Figura 4.4: Espectro EDS del trazador con base titanio, sobre acero	60

Figura 4.5: Espectro EDS del trazador con base cloro, sobre acero	60
Figura 4.6: Espectro EDS del trazador con base aluminio, sobre acero	60
Figura 4.7: Microscopio óptico Nikon. Detalle del equipo durante el análisis de las partículas obtenidas mediante ferografía analítica (der.)	63
Figura 4.8: Microscopios electrónicos de barrido con detector de electrones secundarios. Jeol 35CF (izq.) y Jeol JSM-6460LV(der.)	64
Figura 4.9: Microscopio óptico confocal OlympusLex	64
Figura 4.10: Rugosímetro Jenoptik realizando una medición sobre una probeta de contacto lineal	65
Figura 4.11: Espectrómetro usado para la caracterización química de los aceros. Detalle del equipo en la zona de emisión de chispa (der.)	66
Figura 4.12: Equipo XPS usado en la caracterización de óxidos superficiales	67
Figura 4.13: Equipo RAMAN, del INTEMA, Mar del Plata	67
Figura 4.14: Espectrómetro de infrarrojo Nexus 520 con microscopio acoplado	68
Figura 4.15: Reómetro AR-G2 de TA Instruments. Detalle de la geometría de medición con una muestra de lubricante (der.)	69
Figura 4.16: Ferrógrafo para el análisis de las partículas de desgaste	70
Figura 4.17: Vibróforo de alta frecuencia AMSLER, modelo Type 10 HFP 422. Detalle de equipo operando (der.)	71
Figura 4.18: Máquina pre-fisuradora de desplazamiento (lab. de Mecánica de Fractura, U.N. del Comahue). Detalle de equipo operando	71
Figura 4.19: Equipo de ultrasonido Olympus Omniscan. Detalle del detector 5L60 sobre una probeta pre-fisurada de contacto lineal (der.)	72
Figura 4.20: Equipo para la medición de temperatura y humedad del ambiente (izq.), y equipo para monitoreo de temperatura en diferentes puntos del ensayo (der.)	73

## Capítulo 5 *Ensayos de contacto lineal: Procedimiento experimental*

Figura 5.1: Ilustración esquemática de las probetas de mecánica de la fractura no estándar	76
Figura 5.2: Imagen de la pre-fisura en una probeta de mecánica de la fractura no estándar	77
Figura 5.3: Ilustración esquemática de los cortes realizados en el maquinado de la probeta hasta obtener un prisma rectangular con fisura superficial	77
Figura 5.4: Imágenes de las probetas con fisura superficial. Izq.) CAMPLO 2005 T3; Der.) acero AISI 4140	78
Figura 5.5: Imagen de una probeta con fisura superficial abierta antes del pulido final (etapa A). Detalle obtenido con microscopio Laser a 2000x (der.)	79
Figura 5.6: Imágenes de las probetas con fisura superficial antes del pulido final	79
Figura 5.7: Dibujo de fisura no pasante (izq.) y pasante (der.)	80
Figura 5.8: Acabado superficial de las paredes laterales antes del sellado con epoxi	81
Figura 5.9: Sellado lateral de las fisuras pasantes	81
Figura 5.10: Espectro obtenido del equipo de ultrasonido donde se observa la fisura abierta en la superficie	82
Figura 5.11: Tribómetro de rodadura de contacto lineal. Detalle de la rueda sobre la probeta sumergida en lubricante (der.)	83
Figura 5.12: Esquema del tribómetro de rodadura de contacto lineal	84
Figura 5.13: Imágenes de las probetas luego de finalizado el ensayo en el tribómetro de contacto de rodadura lineal	85
Figura 5.14: Imagen de la probeta con la superficie cubierta para evitar la contaminación del	86

maquinado

Figura 5.15: Probetas cortadas para proceder a la apertura de la fisura	86
Figura 5.16: Izq.) Esquema del método de apertura de fisura para su observación microscópica posterior con dispositivo utilizado (arriba) y detalle de equipo operando (abajo)	86
Figura 5.17: Imagen de una probeta con fisura abierta, lista para ser analizada	87
Figura 5.18: Identificación de zonas de análisis y determinación de profundidad de fisura	88

### Capítulo 6 *Ensayos de contacto puntual: Procedimiento experimental*

Figura 6.1: Dimensiones de rodamiento axial 51101 [1]	91
Figura 6.2: Superficies de los elementos rodantes de rodamientos nuevos. Imágenes de microscopía óptica (arriba) y confocal laser 100x (abajo)	92
Figura 6.3: Perfil superficial de la esfera realizado con microscopía laser confocal sobre un área (arriba) y una línea (abajo)	93
Figura 6.4: Imágenes de microscopio óptico (arriba) y confocal (abajo) de las superficies rodantes de rodamientos sin usar, con surcos propios del proceso de pulido. Sup. izq.: 200x; sup. der.: 500x, con defectos; inf.: 1000x (barra: 10 mm)	94
Figura 6.5: Perfil superficial de la pista de rodadura realizado con microscopía laser confocal sobre un área (arriba) y una línea (abajo)	95
Figura 6.6: Superficies de los elementos rodantes adquiridos comercialmente (100x)	96
Figura 6.7: Superficies de elementos rodantes de nitruro de silicio obtenidas por microscopía óptica (izq.:200x; der.:500x)	96
Figura 6.8: Pistas de rodadura antes (izq.) y después del pulido (der.)	97
Figura 6.9: Superficies rodantes del rodamiento luego del proceso de pulido. Imágenes de microscopía óptica (arriba, 100x y 200x) y laser confocal (abajo, 1000x)	98
Figura 6.10: Perfil superficial de la pista de rodadura luego de la etapa de pulido realizado con microscopía laser confocal sobre un área (Sup.) y una línea (Inf.)	98
Figura 6.11: Esquema del tribómetro de contacto puntual con la presión de contacto para una carga de 100N	100
Figura 6.12: Rodamiento montado en el tribómetro de contacto puntual	101

### Capítulo 7 *Modelización del contacto*

Figura 7.1: Configuración del espesor de la película en contacto lineal	106
Figura 7.2: Diagrama de bloque simplificado para obtener las distribuciones de presión, temperatura y espesor de película lubricante en contacto TEHD puntual y lineal	110

### Capítulo 8 *Resultados contacto puntual*

Figura 8.1: Resultados del contacto mediante la simulación por elementos finitos [3]	113
Figura 8.2: Resultados del modelo TEHD para el espesor de película lubricante	114
Figura 8.3: Resultados del modelo TEHD para la presión de contacto	115
Figura 8.4: Resultados del modelo TEHD sobre la línea central. Izq.: distribución de la presión de contacto; Der.: distribución del espesor de película lubricante	115
Figura 8.5: Gráfico cualitativo que exhibe la generación de partículas esféricas en las diferentes etapas de desgaste por rodadura de contacto	117
Figura 8.6: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 30 (Sup.) y 90 min (Inf.)	118



correspondientes a  $6.3 \times 10^4$  y  $1.9 \times 10^5$  ciclos aproximadamente (Mag.: 500x.)

Figura 8.7: Imágenes de microscopía óptica de los caminos de rodadura sin ensayar (Izq.) y luego de 90 min de ensayo ( $\sim 1.9 \times 10^5$ ciclos) (Mag.: 200x)	118
Figura 8.8: Partículas esféricas tomadas de ferrografías a 30 min ( $6.3 \times 10^4$ ciclos) en proceso de formación (Mag.: Sup.: Izq.: 6000x; Der.: 10000x; Inf.: 500x)	119
Figura 8.9: Partícula esférica en un borde del el camino de rodadura, luego de 90 min de ensayo (aprox. $1.9 \times 10^5$ ciclos) (Mag.: 500x)	119
Figura 8.10: Partícula esférica proveniente de las bolillas cerámicas y su respectivo espectro EDS (con Silicio en composición) de un ferrograma a los 30 min ( $6.3 \times 10^4$ ciclos) (SEM Mag.: 6000x)	120
Figura 8.11: Partícula esférica y su respectivo espectro EDS con elementos Fe y O <sub>2</sub> de un ferrograma los 30 min ( $6.3 \times 10^4$ ciclos) (SEM Mag.: 6000x)	121
Figura 8.12: Espectro Raman de partícula perteneciente a un ferrograma a los 15 min [ $3.1 \times 10^4$ ciclos]	121
Figura 8.13: Espectro Raman de partícula perteneciente a un ferrograma a los 90 min [ $1.9 \times 10^5$ ciclos]	122
Figura 8.14: Perfil de energía correspondiente al oxígeno en función al tiempo de sputtering	123
Figura 8.15: perfiles de ablación iónica con decaimiento de la concentración de oxígeno con el aumento de la profundidad	124
Figura 8.16: Morfología superficial de los caminos de rodadura (Sup. Izq.) y, perfil superficial realizado con microscopia laser confocal sobre un área (Sup. Der.) y una línea (Inf.) (Mag. 200x)	124
Figura 8.17: Morfología superficial de las bolillas rodantes y perfil superficial de la misma realizado con microscopia laser confocal (Mag. 100x)	125
Figura 8.18: Espectro FTIR del lubricante sin ensayar (azul) y del lubricante luego de 90 min de ensayo	
Figura 8.19: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 660 (Izq.) y 840 min (Der.) correspondientes a los $1.3 \times 10^6$ y $1.7 \times 10^6$ ciclos aproximadamente (Mag.: 500x.)	127
Figura 8.20: Espectro Raman de partícula perteneciente a una ferrografía tomada a los 660 min [ $1.4 \times 10^6$ ciclos]	128
Figura 8.21: Espectro Raman de partícula perteneciente a una ferrografía tomada a los 840 min [ $1.7 \times 10^6$ ciclos]	128
Figura 8.22: Caminos de rodadura luego de 660 min de ensayo correspondientes a los $1.4 \times 10^6$ ciclos. (Mag.: Sup.: 100x, 200x; Inf.: 500x)	129
Figura 8.23: Caminos de rodadura luego de 840 min de ensayo correspondientes a los $1.7 \times 10^6$ ciclos. (Mag.: Sup.: 500x, 5000x; Inf.: 10000x)	130
Figura 8.24: Morfología superficial de los elementos rodantes tomada a los 1020 min correspondiente a los $2.1 \times 10^6$ ciclos (Mag. 200x)	131
Figura 8.25: Morfología superficial de los caminos de rodadura tomada a los 1020 min ( $2.1 \times 10^6$ ciclos) donde se observan las primeras fisuras producidas y un perfil superficial del mismo realizado con microscopia laser confocal (Mag. 500x)	133
Figura 8.26: Caminos de rodadura luego de 1200 min de ensayo correspondientes a los $3.5 \times 10^6$ ciclos. (Mag.: Sup.: 500x, 5000x; Inf.: 10000x)	133
Figura 8.27: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 1560 min correspondientes a los $3.2 \times 10^6$ ciclos aproximadamente (Mag.: 500x)	134
Figura 8.28: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 1560 min correspondientes a los $3.2 \times 10^6$ ciclos aproximadamente, junto con el espectro EDS sin presencia de cromo (Mag.: Óptico 500; SEM 5000x)	135
Figura 8.29: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 1560 min correspondientes a los $3.2 \times 10^6$ ciclos aproximadamente, junto con el espectro EDS con presencia de cromo (Mag.: Sup.: 6000x; Inf.: 10000x)	136
Figura 8.30: Espectro Raman de partícula perteneciente a una ferrografía tomada a los 1560 min [ $3.2 \times 10^6$ ]	136

Figura 8.31: Partículas esféricas tomadas de ferrografías a los 1560 min ( $3.2 \times 10^6$ ciclos) en proceso de formación (Mag.: Sup.: Izq.: 6000x; Der.:10000x; Inf.: 500x)	137
Figura 8.32: Partícula esférica encontrada en la superficie de rodadura luego de 1560 min de ensayo correspondientes a los $3.2 \times 10^6$ ciclos. (Mag.: 500x)	137
Figura 8.33: Fisuras superficiales de los caminos de rodadura luego de 1560 min de ensayo correspondientes a los $3.2 \times 10^6$ ciclos. La flecha indica el sentido del movimiento de rodadura (Mag.: 500x)	138
Figura 8.34: Morfología superficial de los caminos de rodadura tomada a los 1560 min ( $3.2 \times 10^6$ ciclos) donde se observa gran cantidad de fisuras superficiales abiertas (Sup.: 500x). Detalle de la morfología en la zona cercana a la fisura (Izq.:3000x; Der.:5000x)	139
Figura 8.35: Morfología superficial de los caminos de rodadura tomada a los 1560 min ( $3.2 \times 10^6$ ciclos) (Sup. Izq.) y perfil superficial realizado con microscopia laser confocal sobre un área (Sup. Der.) y una línea (Inf.)(Mag. 500x)	140
Figura 8.36: Morfología superficial de los elementos rodantes tomada a los 1560 min correspondiente a los $3.2 \times 10^6$ ciclos (Mag.: Izq.: 100x; Der.:200x)	140
Figura 8.37: Morfología superficial de los elementos rodantes tomada a los 1560 min correspondiente a los $3.2 \times 10^6$ ciclos y un perfil superficial del mismo realizado con microscopia laser confocal (Mag. 500x)	141
Figura 8.38: Espectro XPS de análisis superficial de pista de rodadura sin la presencia de cromo a los 90 min de ensayo [ $1.9 \times 10^6$ ]	142
Figura 8.39: Espectro XPS de análisis a una profundidad de 300 nm con presencia de cromo (1%) a los 90 min de ensayo [ $1.9 \times 10^6$ ]	143
Figura 8.40: Metalografía de las pistas de rodadura (AISI-SAE 52100)	144
Figura 8.41: Perfiles de ablación iónica con decaimiento de la concentración de oxígeno con el aumento de la profundidad	145
Figura 8.42: Perfiles de ablación iónica con decaimiento de la concentración de oxígeno con el aumento de la profundidad	145
Figura 8.43: Esquema simplificado del proceso de generación de partículas esféricas sin cromo en su composición	146
Figura 8.44: Esquema simplificado del proceso de generación de partículas esféricas con cromo en su composición	148
Figura 8.45: Esquema simplificado del proceso de generación de partículas esféricas en el interior de la fisura con cromo en su composición [adaptado de 33]	149

## Capítulo 9 *Resultados contacto lineal*

Figura 9.1: Resultados del modelo TEHD para la presión de contacto generada	156
Figura 9.2: Resultados del modelo TEHD para la distribución de la presión de contacto	157
Figura 9.3: Resultados del modelo TEHD para la distribución de la temperatura de contacto. Fluido 50% glicerina/50% agua	158
Figura 9.4: Morfología de las superficies de fisura pertenecientes al ensayo AC-100%GL-3000-N01. Fluido lubricante: 100% Glicerina (Mag: 1500x)	160
Figura 9.5: Morfología de la superficie de fisura pertenecientes al ensayo AC-100%GL-3000-N01. Fluido lubricante: 100% Glicerina Der.) Espectro EDS donde no se observa presencia de los trazadores (Mag: 3000x)	160
Figura 9.6: Morfología de las superficies de fisura pertenecientes al ensayo AC-75%GL-3000-N01 Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag: 100x ; 3000x)	161
Figura 9.7: Morfología de la superficie de fisura pertenecientes al ensayo AC-100%GL-3000-N01 Fluido	161

lubricante: 100% Glicerina (Mag: 3000x) Der.) Espectro donde no se observa presencia de los trazadores

Figura 9.8: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AC-50%GL-3000-N01 Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag: 600x)	163
Figura 9.9: Morfología de la superficies donde se observa el límite de penetración del lubricante. Se observa los EDS de la zona 1 (Sup.) y la zona 2 (Inf.) con el pico sobre el trazador de cloro (Mag.: 1500x)	163
Figura 9.10: Morfología de la superficie donde se realizo un análisis EDS lineal. Se observa un claro incremento del carbono donde ha ingresado lubricante	163
Figura 9.11: Morfología de las superficies recubiertas por de fluido lubricante. Los análisis EDS muestran los trazadores Cl, Ti y Al (Mag.: 1500x; 3000x)	164
Figura 9.12: Morfología de las superficies (Mag.: 25x)	165
Figura 9.13 Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AC-100%AG-3000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x)	166
Figura 9.14: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AC-100%AG-3000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x)	166
Figura 9.15: Morfología de la superficies de fisura sin restos de lubricante pertenecientes al ensayo AC-100%AG-3000-N01 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x)	166
Figura 9.16: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AC-100%AG-3000-N01 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Al	167
Figura 9.17: Imágenes de ferrogramas tomados a los 1x10 <sup>6</sup> ciclos para Der.) Glicerina pura y lzq.) mezcla de glicerina y agua (50% en peso) como lubricante	167
Figura 9.18: Morfología de las fisura correspondiente al ensayo AC-75%GL-3000-N01 donde se observa una posible formación de partícula esférica (3000x)	168
Figura 9.19: Morfología de la fisura correspondiente al ensayo AC-50%GL-3000-N01 donde se observan algunas partículas con forma aparentemente esférica (3000x) Der.) Espectro EDS sobre la partícula n°3 con elementos Fe-O	168
Figura 9.20 Resultados del modelo TEHD para la distribución de la presión de contacto	170
Figura 9.21: Resultados del modelo TEHD para el espesor de película lubricante	171
Figura 9.22: Resultados del modelo TEHD para la distribución de la temperatura de contacto Fluido 50% glicerina/50%agua	172
Figura 9.23: Probeta correspondiente al ensayo AL-100%GL-1000-N0A abortado a las 38 hs donde se observa el descascarillado superficial producto de FCR	174
Figura 9.25: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N01 Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 30x)	175
Figura 9.26: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x)	176
Figura 9.27: Morfología de la superficie de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x)	176
Figura 9.28: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 30x)	176
Figura 9.29: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x)	177
Figura 9.30: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x)	177
Figura 9.31: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x)	178
Figura 9.32: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona central (B)	178

donde se observan los trazadores Ti y Cl

Figura 9.33: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N03 Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 30x)	178
Figura 9.34: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N03 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x)	179
Figura 9.35: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x)	179
Figura 9.36: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl	180
Figura 9.37: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 50x)	180
Figura 9.38: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x)	181
Figura 9.39: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x)	181
Figura 9.40: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x)	181
Figura 9.41: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl	182
Figura 9.42: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 200x)	182
Figura 9.43: Morfología de la superficies de fisura sin restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x)	183
Figura 9.44: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x)	183
Figura 9.45: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x)	184
Figura 9.46: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl	184
Figura 9.47: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre partículas detectadas en la zona lateral (C) (flecha azul) donde se observa la presencia de un alto contenido de plomo	184
Figura 9.48: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 200x)	185
Figura 9.49: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x)	185
Figura 9.50: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x)	186
Figura 9.51: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; espectro EDS sobre la superficie lateral con presencia de Ti	186

Figura 9.52: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N01. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 200x)	187
Figura 9.53: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x)	187
Figura 9.54: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x)	188
Figura 9.55: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x)	188
Figura 9.56: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl	189
Figura 9.57: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N02. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 30x)	189
Figura 9.58: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N02 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x)	190
Figura 9.59: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x)	190
Figura 9.60: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N03. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 27x)	190
Figura 9.61: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x)	191
Figura 9.62: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N03 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x)	191
Figura 9.63: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x)	192
Figura 9.64: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl	192
Figura 9.65: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01. Fluido lubricante: agua (Mag.: 25x)	192
Figura 9.66: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x)	193
Figura 9.67: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x)	193
Figura 9.69: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl	194
Figura 9.70: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N02. Fluido lubricante: agua (Mag.: 25x)	194
Figura 9.71: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N02 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x)	195
Figura 9.72: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N02 sobre la zona central (A). Análisis EDS sobre la zona central donde se observa el trazador Cl (Der.) (Mag.: 500x)	195

Figura 9.73: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N02 sobre la zona lateral (C). Electrones retrodifundidos (Der.)(Mag.: 500x)	196
Figura 9.74: Ferrografía de ensayo AL-100%GL-1000-N01 realizada a los 48x103 ciclos. Fluido lubricante: Glicerina (Mag.:500x)	197
Figura 9.75: Ferrografía de ensayo AL-100%GL-1000-N01 realizada a los 48x103 ciclos. Fluido lubricante: Glicerina (Mag.: Sup. 500x; Inf. 1000x)	197
Figura 9.76: Ferrografía del ensayo AL-75%GL-1000-N01 realizada a los 48x103 ciclos. Fluido lubricante: 75% Glicerina / 25% agua (Mag.: Sup. 500x; Inf. 1000x)	198
Figura 9.77: Partícula esférica detectada sobre la zona central (B) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-75%GL-1000-N01. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 13000x)	199
Figura 9.78: Partículas esféricas detectada sobre la zona central (B) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-75%GL-1000-N01 junto a sus espectros EDS. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 13000x)	200
Figura 9.79: Partícula esférica detectada sobre la zona lateral (C) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-75%GL-1000-N01 junto a su espectro EDS. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: Sup. 13000x; Inf. 5000x)	200
Figura 9.80: Ferrografía del ensayo AL-50%GL-1000-N01 realizada a los 48x103 ciclos. Fluido lubricante: 50% Glicerina / 50% agua (Mag.: Sup. 500x; Inf. 1000x)	201
Figura 9.81: Partícula esféricas detectada sobre la zona central (B) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-50%GL-1000-N01 junto a su espectro EDS. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 13000x)	201
Figura 9.82: Ferrografía del ensayo AL-100%GL-1000-N01 realizada a los 48x103 ciclos. Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x)	202
Figura 9.83: Partícula esféricas detectada sobre la zona central (B) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-100%AG-1000-N01 junto a su espectro EDS. Fluido lubricante: agua (Mag.: 13000x)	202
Figura 9.84: Espectro FTIR del lubricante (Mezcla Glicerina y agua 50% en peso) antes de realizar los ensayos	203
Figura 9.85: Espectro FTIR del lubricante (Mezcla Glicerina y agua 50% en peso) luego del ensayo realizado AL-50%GL-1000-N01 (48x103 ciclos)	204
Figura 9.86: Espectro FTIR del lubricante (Mezcla Glicerina y agua 50% en peso) luego del ensayo realizado AC-50%GL-3000-N01 (106 ciclos)	205

## Capítulo 10 Conclusiones

---

## Capítulo 11 Trabajos futuros

---



# Índice de tablas

---

## Capítulo *1* **Introducción general**

---

## Capítulo *2* **Tribología**

---

Tabla 2.1: Parámetros de caracterización de superficies	21
Tabla 2.2: Propiedades características de las películas lubricantes [16]	24

---

## Capítulo *3* **Fatiga de contacto por rodadura**

---

## Capítulo *4* **Materiales y métodos**

---

Tabla 4.1: Composición química nominal de los aceros usados en contacto lineal	55
Tabla 4.2: Composición química de la aleación de aluminio 2005 T3	55
Tabla 4.3: Propiedades del material AISI 4140	56
Tabla 4.4: Propiedades del Alum 2005 T3	56
Tabla 4.5: Propiedades del lubricante 100%GL	57
Tabla 4.6: Propiedades del lubricante 75%GL.	57
Tabla 4.7: Propiedades del lubricante 50%GL.	58
Tabla 4.8: Propiedades del lubricante 100%AG	58
Tabla 4.9: Composición química nominal del acero usado en ensayos de contacto puntual	61
Tabla 4.10: Propiedades del acero utilizado en ensayos de contacto puntual	61
Tabla 4.11: Propiedades del material cerámico	61
Tabla 4.12: Propiedades del lubricante usado en los ensayos puntuales	62

---

## Capítulo *5* **Ensayos de contacto lineal: Procedimiento experimental**

---

Tabla 5.1: Rugosidad inicial de las superficies de contacto	80
---	----

---

Tabla 5.2: Extracciones realizadas para monitoreo de lubricante y partículas de desgaste	84
--	----

---

## Capítulo 6 *Ensayos de contacto puntual: Procedimiento experimental*

---

Tabla 6.1: Dimensiones del rodamiento [1]	91
Tabla 6.2: Características del rodamiento 51101 [1]	91
Tabla 6.3: Parámetros de rugosidad superficial de las pistas de rodadura	99
Tabla 6.4: Parámetros de rugosidad superficial de las esferas de rodadura	99

---

## Capítulo 7 *Modelización del contacto*

---

### Capítulo 8 *Resultados contacto puntual*

---

Tabla 8.1: Resultados de los parámetros del contacto según la teoría de Hertz	113
Tabla 8.2: Espesor de película lubricante inicial	116
Tabla 8.3: Parámetros de rugosidad de las superficies en el periodo de asentamiento (90 min)	125
Tabla 8.4: Espesor de película lubricante en el periodo de asentamiento (90 min)	125
Tabla 8.5: Parámetros de rugosidad de las superficies en el periodo estacionario (840 min)	131
Tabla 8.6: Espesor de película lubricante en el periodo estacionario (840 min)	132
Tabla 8.7: Parámetros de rugosidad de las superficies en la etapa final de degradación por FCR (1560 min)	141
Tabla 8.8: Espesor de película lubricante en la etapa final de degradación por FCR (1560 min)	141

---

### Capítulo 9 *Resultados contacto lineal*

---

Tabla 9.1: Resultados de los parámetros del contacto según la teoría de Hertz	155
Tabla 9.2: Rugosidad de las superficies iniciales	158
Tabla 9.3: Espesor de película lubricante inicial y parámetro $\lambda$	159
Tabla 9.4: Ensayos realizados sobre acero AISI-SAE 4140 (Carga aplicada 3000 Kg)	159
Tabla 9.5: Resultados de los parámetros del contacto según la teoría de Hertz	169
Tabla 9.6: Rugosidad de las superficies iniciales	172
Tabla 9.7: Espesor de película lubricante inicial y parámetro $\lambda$	172
Tabla 9.8: Ensayos realizados sobre CAMPLO 2005 T3 (Carga aplicada 1000 Kg)	173
Tabla 9.9: Resumen de resultados de ensayos realizados sobre acero AISI-SAE 4140	205
Tabla 9.10: Resumen de resultados de ensayos realizados sobre CAMPLO 2005 T3	205
Tabla 9.11: Partículas esféricas detectadas en ensayos realizados sobre acero AISI-SAE 4140	208
Tabla 9.12: Partículas esféricas detectadas en ensayos realizados sobre CAMPLO 2005 T3	208

---

## Capítulo 10 *Conclusiones*

---

## Capítulo 11 *Trabajos futuros*

---



# Capítulo 1

## *Introducción general*

---

El daño por fatiga de contacto que involucra la formación y desprendimiento de fragmentos de la superficie en forma de “escamas” es una de las principales causas de degradación y falla en elementos sometidos a movimiento relativo de rodadura, tales como dientes de engranajes, componentes de cojinetes rodantes, árboles de levas, rieles de ferrocarril, etc. Este modo de daño llamado “fatiga de contacto por rodadura” ó por sus siglas “FCR” (en inglés “rollingcontact fatigue” ó “RCF”) es fenomenológicamente complejo, por las numerosas variables involucradas, que además se desarrollan a escala tridimensional [1,2].

El mecanismo de daño se inicia por el aumento local de la densidad de dislocaciones causada por tensiones cíclicas repetidas. Esto puede producirse en la sub-superficie (bordes de grano, inclusiones, etc), dado que en esa región se producen las máximas tensiones de corte Hertzianas [2-3]. La concentración de dislocaciones localizadas produce la formación de microcavidades, que actúan como concentradores de tensión, promoviendo el desarrollo de microfisuras, las cuales crecen y se propagan en la dirección en las que las tensiones de corte son más altas. Posteriormente, las micro-fisuras coalescen entre sí y con la superficie libre, creando una partícula libre y una cavidad en la superficie. Finalmente el daño se propaga a otras porciones de la superficie.

Para su óptimo desempeño, muchos componentes con movimiento de rodadura requieren un régimen de lubricación mixto o elastohidrodinámica, durante el cual las superficies son separadas por una delgada película de lubricante, que debido a las altas presiones de contacto generadas, se transforma en fluido extremadamente viscoso [4,5]. Como las tensiones elásticas de contacto se transmiten a través del fluido, es posible que por la acumulación de ciclos repetidos se promueva la nucleación y crecimiento de fisuras, aún cuando las

superficies no hayan estado en contacto entre sí. Sin embargo, cuando la fisura interseca con la superficie libre, se modifica la rugosidad superficial disminuyendo el espesor de la película lubricante y permitiendo que fluido penetre en la fisura abierta bajo determinadas condiciones.

El fluido, de acuerdo con observaciones previas y resultados de trabajos teóricos [6-10], posee un rol fundamental en el crecimiento de una fisura producida por fatiga de contacto por rodadura. El líquido afecta el estado de tensiones en la punta de la grieta durante el contacto cíclico e influye en el crecimiento de la misma. Además, el líquido produce reducción de la fricción entre las paredes de la fisura y ejerce presión sobre las mismas en el instante en que el lubricante penetra, como así también cuando la fisura se cierra, a causa de la presión hidrostática generada. Es decir, la interacción entre el líquido y el sólido resulta importante debido al efecto de canalización del flujo del fluido entre las paredes de la fisura. Este fenómeno es un proceso dinámico, dado que es continuamente alterado por los desplazamientos causados por la presión interna, ejercida por el flujo interno, y por la presión externa, inducida por la carga de contacto.

Por otro lado, en componentes tales como el par rueda-riel de ferrocarril, el contacto entre las piezas sólidas es muchas veces directo, es decir, en ausencia de lubricación continua. Aunque no se aprecie a simple vista, en esta condición la interacción líquido sólido también ocurre debido a las condiciones ambientales (lluvia, rocío, humedad, etc.) y representa un serio problema que causa fallas catastróficas y también enormes pérdidas económicas en función de las tareas de mantenimiento involucradas.

La fatiga superficial es un problema bien conocido en ingeniería y existen en la literatura varios modelos (bi- y tri-dimensionales) e hipótesis que han sido propuestas para estudiar el proceso de fisurado [8-10]. Sin embargo, las hipótesis simplificadoras usadas en estos modelos son muchas, y ninguno de ellos ha sido validado experimentalmente. Así, por ejemplo, varios investigadores han analizado fisuras bi- y tri-dimensionales generadas por fatiga de contacto por rodadura utilizando modelado numérico, aplicando elementos finitos, en base a principios de la mecánica de fractura lineal elástica combinados con velocidades de crecimiento de fisuras por fatiga, y teniendo en cuenta la presencia del fluido atrapado en la fisura [9-13]. De esta manera, ellos determinaron niveles de tensiones para predecir velocidades de crecimiento de la fisura modo I (esfuerzos principales de tracción normal al plano de la fisura) y algunos parámetros vinculados al modo II (esfuerzos de cizalladura en el plano de la fisura).

En este sentido, los trabajos realizados hasta la actualidad han permitido definir parámetros de mecánica de fractura empleando fisuras y geometrías de probetas correspondientes a mecánica de fractura lineal elástica (no se utilizan fisuras de fatiga de contacto), lo que permite determinar valores de factores de intensidad de tensiones  $K_{Ic}$ . Se destaca que todos estos enfoques corresponden al punto de vista de la mecánica de la fractura, y no han tenido en cuenta la influencia de la componente fluido dinámica en la zona de contacto de la superficie fisurada-elemento rodante. Por este motivo, se considera que la teoría para describir realísticamente el complicado mecanismo de daño por fatiga de contacto con líquido atrapado, aún debe ser establecida.

## OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El propósito de esta tesis se focaliza en dos tópicos relevantes:

- el estudio de la penetración de líquido en fisuras abiertas solicitadas por rodadura de contacto, y
  - la caracterización de las partículas esféricas, generadas en las diferentes etapas de degradación superficial producto de FCR,
- todo ello sumado a los análisis de las superficies de rodadura y el lubricante.

Respecto del primer objetivo, se estudian distintas micro-estructuras y diferentes líquidos lubricantes. Con ello se determina el grado de penetración para diferentes tamaños de fisuras. El estudio abarca etapas teóricas, en las que se modelan las presiones generadas sobre las superficies en contacto y se determina el espesor de película lubricante para las diferentes condiciones del ensayo. Desde el punto de vista experimental se diseñaron e implementaron sistemas que permitieron analizar la interacción líquido-fisura de diferentes tamaños de fisuras, bajo diversos niveles de carga y distintos líquidos lubricantes. Como parte de este trabajo se tomaron muestras de aceite en diferentes estadios de los ensayos tribológicos, y mediante ferrografía analítica, se caracterizan las partículas esféricas generadas en las distintas etapas de degradación superficial producto de FCR. Se determinan así los elementos que componen las partículas, a la vez que se caracterizan los óxidos presentes. Estos resultados se contrastan con el análisis morfológico superficial y el análisis IR del lubricante.

Como se comentará, para llevar a cabo este estudio, se desarrollaron dos tribómetros, uno de contacto lineal, y otro de contacto puntual. Si bien los dos ensayos tienen la misma

finalidad, el de contacto lineal fue focalizado en el análisis de la penetración del lubricante, y el de contacto puntual en la caracterización de las partículas esféricas de desgaste.

Desde el punto de vista científico, los resultados de este trabajo son un aporte a un área de investigación muy importante en la actualidad, que pretende avanzar en el conocimiento y comprensión de los fundamentos del crecimiento de fisuras por fatiga de contacto por rodadura junto a la detección mediante el reconocimiento de las partículas de desgaste. Por otro lado, desde el punto de vista tecnológico, aún cuando este modo de falla no alcance niveles catastróficos, es una de las principales causas de fallas por desgaste que inducen a la realización de operaciones de mantenimiento no planificadas. En tal sentido, es necesario poder predecir el mecanismo de propagación inducida en componentes mecánicos, tales como rieles y ruedas de ferrocarril y componentes de rodamientos. En estos últimos, esta condición es particularmente importante, debido a que rodamientos de gran tamaño (mayores a 400 mm de diámetro exterior) a menudo suelen ser de compleja disponibilidad en el mercado.

El contenido de la tesis ha sido organizado en once capítulos. A este primero introductorio, le sigue uno en que se plantean los conceptos básicos sobre tribología, mecanismos principales de desgaste y lubricación. El Capítulo 3 está destinado al comportamiento tribológico de las superficies en contacto durante el proceso de rodadura y la generación de partículas de desgaste generadas por este mecanismo. Allí se enuncian conceptos básicos y parámetros que juegan un rol fundamental respecto de los resultados obtenidos.

En los Capítulos 4, 5 y 6 se presentan los materiales empleados, las técnicas y condiciones en las cuales se efectuaron los estudios, junto a los métodos de preparación de superficies y generación de fisuras abiertas.

Luego, el Capítulo 7 presenta los modelos teóricos termo-elastohidrodinámicos utilizados para caracterizar el tipo de comportamiento del contacto para los diferentes ensayos tribológicos. Los Capítulos 8 y 9 siguientes presentan los resultados obtenidos en los ensayos de contacto lineal y puntual, respectivamente. En los mismos se muestran los resultados del análisis experimental para determinar la penetración de fluido, el análisis de las partículas de desgaste y el análisis de la degradación del lubricante. Además se exponen los resultados obtenidos por los modelos descriptos en el Capítulo 7.

Para finalizar, en el Capítulo 10 se enumeran las conclusiones generales relevantes de la tesis y en el 11 se plantean las líneas de trabajo futuro.

## REFERENCIAS

- [1] Blau, P. J. (2008). Friction science and technology: from concepts to applications. CRC press.
- [2] Bhushan, B., & Gupta, B. K. (1991). Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments.
- [3] Budinski, K. G. (2013). Friction, Wear, and Erosion Atlas. CRC Press.
- [4] Darby R., (2001) Chemical Engineering Fluid Mechanics, Revised and Expanded. CRC Press
- [5] Totten, G. E. (2011). Handbook of hydraulic fluid technology. CRC Press.
- [6] Bogdański, S. (1997). Finite element modelling of surface fatigue crack in EHD contact. Tribology Series, 32, 325-336.
- [7] Kaneta M., Yatsuzuka H., Murakami Y., (1985) Mechanism of crack growth in lubricated rolling/sliding contact, ASLE Trans. 28 407–414.
- [8] Kaneta M., Murakami Y., (1991) Propagation of semi-elliptical surface cracks in lubricated rolling/sliding elliptical contacts, J. Tribol. ASME 113, 270–275.
- [9] Bogdański, S., Stupnicki, J., Brown, M. W., & Cannon, D. F. (1999). A two dimensional analysis of mixed-mode rolling contact fatigue crack growth in rails. European Structural Integrity Society, 25, 235-248.
- [10] Bogdański S., Brown W., (2002) Modelling the three dimensional behaviour of shallow rolling contact fatigue cracks in rails, Wear 253 (1/2) 17–25.
- [11] Bogdański S., (1997) The behaviour of surface breaking contact fatigue crack in EHL conditions, in: Proceedings of the Fifth Conference on Bi/Multi axial Fatigue and Fracture, vol. II, Cracow, September 8, , pp. 9–28.
- [12] Bogdański S., (2002) A rolling contact fatigue crack driven by squeeze fluid film, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 25 1061–1071.
- [13] Bogdański, S. (2005). Liquid–solid interaction at opening in rolling contact fatigue cracks. Wear, 258(7), 1273-1279

# Capítulo 2

## *Tribología*

---

La palabra tribología deriva del griego “τριβος” (tribos) que significa “frotamiento”. La tribología es la ciencia y tecnología de los fenómenos que tienen lugar en la interfase de contacto entre dos sólidos en movimiento, involucrando el estudio de la lubricación, fricción y desgaste de los materiales involucrados[1]. La palabra tribología fue acuñada y definida de forma oficial por H. Jost en 1966 [2]. De todas maneras, aunque la palabra “tribología” lleva sólo 50 años de vida, el área de conocimiento que abarca, es casi tan antigua como la historia de la humanidad misma. Por ello, este Capítulo, que está dedicado a presentar una reseña histórica y las bases de la tribología, sólo pretende abarcar aquellos hechos y fundamentos más directamente relacionados con esta tesis

### 2.1 RESEÑA HISTÓRICA

La fricción, la lubricación y el desgaste han jugado un papel fundamental desde los orígenes de la vida en la tierra. Un ejemplo de ello son los mecanismos de articulación de los vertebrados, o la capa de mucosidad de los peces para facilitar su movimiento dentro del océano, por mencionar algunos. Ellos forman sistemas tribológicos creados en los orígenes y desarrollados con la evolución. En la vida del hombre, ya en la Edad de Piedra se tenían conocimientos sobre la fricción. Se sabía que girando un pequeño palillo de madera sobre la cavidad de una rama se podía generar fuego. Más adelante, aparece el uso de carros y rodillos para reducir la fricción. En estos casos se utilizaba el fenómeno para un fin concreto.

Por otro lado, existen indicios que demuestran que el hombre ha querido influir sobre la fricción y el desgaste, con el fin de lograr objetivos específicos. Se sabe, por ejemplo, que la

búsqueda de lubricantes efectivos es muy diversa y tan antigua como la propia historia de la humanidad. Los egipcios, en el 1400 a.C., utilizaban agua, grasas animales y aceites para lubricar sus carros de guerra. Un dibujo donde esto se puede observar data de 1880 a.C., y fue encontrado en una gruta de El Bersheh, Egipto, en la tumba de Djehutihotep (ver Fig. 2.1). Allí se muestra una figura humana (tal vez uno de los primeros ingenieros de lubricación) suministrando un líquido (presumiblemente agua) sobre las superficies de un trineo de madera que traslada una gigantesca estatua del líder (aproximadamente 7 metros y unos 600 kN) sobre arena, mediante el esfuerzo de 172 esclavos [3]. El fluido servía para aumentar la rigidez de la arena y reducir la fuerza necesaria para mover la estatua, probablemente en un 50% (ver Fig. 2.2) [4,5].

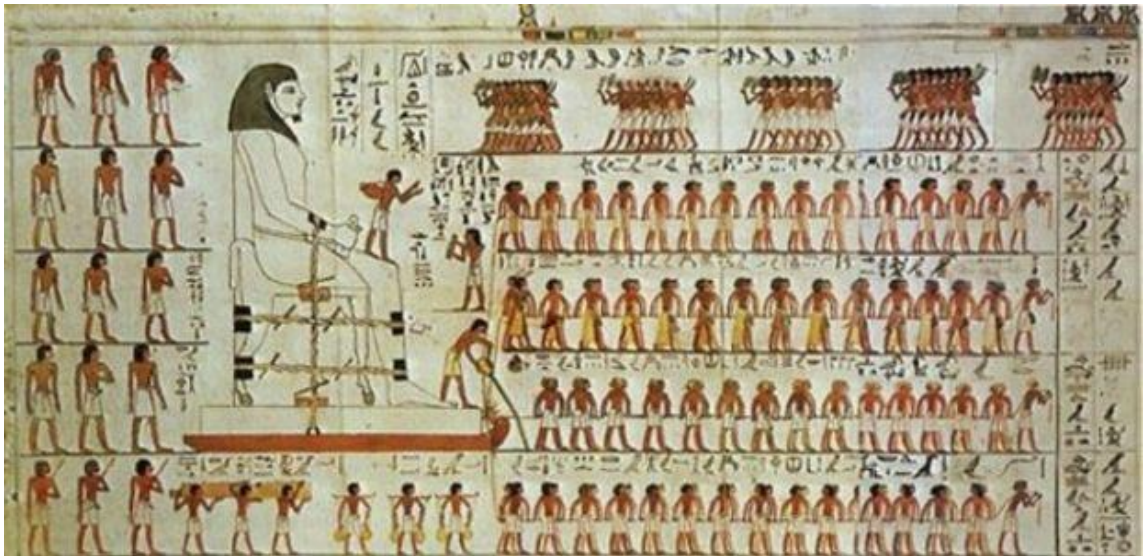


Figura 2.1: Dibujo egipcio en la tumba de Djehutihotep, 1880 a.C., y detalle ampliado [3].



Por otra parte, existen documentos de alrededor de 650 a.C., donde se aprecia el uso de las ruedas de fricción. Y existen indicios que indican que por los años 330 a.C., el ingeniero griego Diades probablemente haya desarrollado uno de los primeros rodamientos. El mismo se habría usado para el alojamiento de los arietes de los carros de guerra. De hecho, en 1930 se encontraron en el fondo del lago Nemi los restos de una plataforma giratoria procedente de una nave del emperador Calígula, dando muestra de que en la antigüedad ya se utilizaban cojinetes rudimentarios. Esta plataforma puede considerarse uno de los primeros ejemplos de rodamientos de presión, es decir, un cojinete diseñado para recibir cargas directas y que gira alrededor de su eje.

Leonardo da Vinci realizó en los años 1452-1519 los primeros estudios científicos relacionados con la fricción y el coeficiente de rozamiento (estático) en un plano inclinado. De hecho, Leonardo determinó el valor del coeficiente de rozamiento y formuló las leyes del rozamiento seco, aunque en sus numerosos trabajos nunca explicitó el término fuerza de fricción. La Fig. 2.2 muestra algunos de los bocetos de los dispositivos que Leonardo utilizó en sus estudios sobre la fricción.

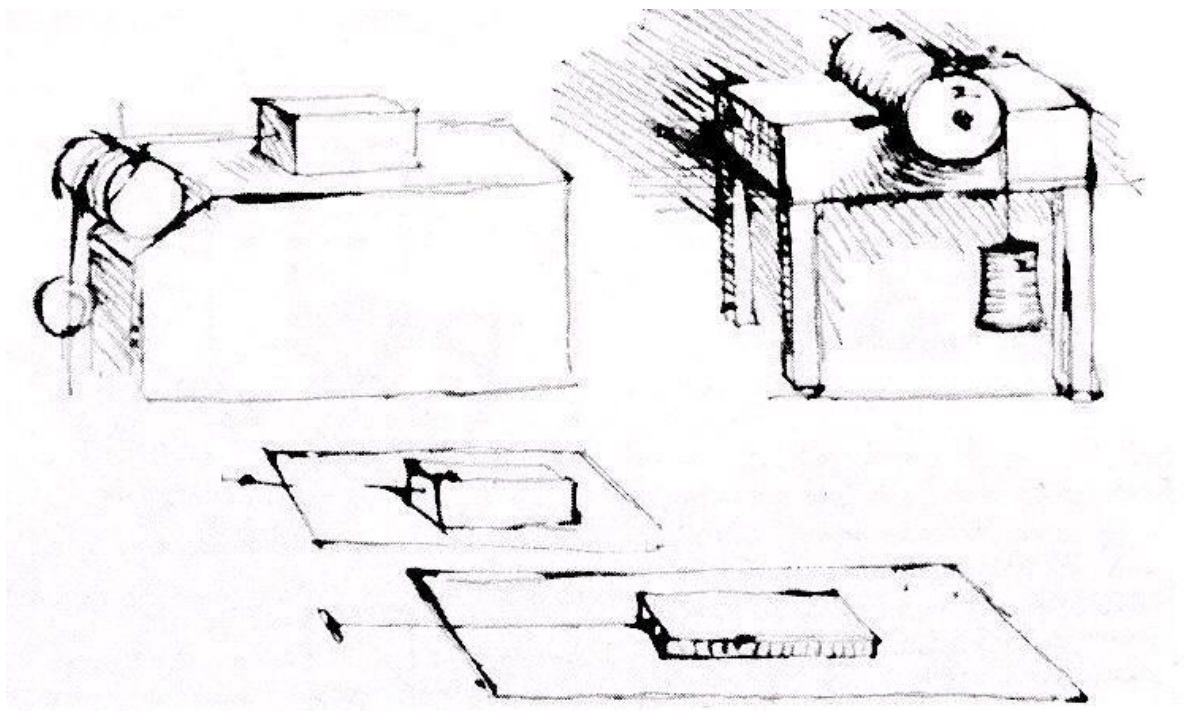


Figura 2.2: Dibujos de Leonardo Da Vinci sobre el rozamiento.



Estudios científicos posteriores llevados a cabo por G. Amontons (1699), C. Coulomb (1785) y A. Morin (1833) enfatizaron que la fricción se debe a las interconexiones de las protuberancias mecánicas o asperezas sobre la superficie de los materiales en contacto. Guillaume Amontons comprobó que la fuerza de rozamiento depende de la fuerza normal aplicada y que la rugosidad de la superficie debía tratarse como origen de la fricción. Asimismo, se atribuyen a él las primeras dos leyes clásicas de la fricción, las que establecen que la fuerza de rozamiento es proporcional a la fuerza normal e independiente del tamaño de la superficie de contacto aparente.

Por otro lado, John Desagulier, en su libro editado en 1734 introdujo un nuevo aspecto. Él señaló que con superficies más pulidas se produce una mayor fuerza de rozamiento, y desarrolló experimentos con superficies de plomo para demostrar esta teoría. Con ello estaba reconociendo la importancia tanto de la adhesión como de la cohesión en el proceso de fricción, aunque no pudo cuantificarlas.

Años después, mediante estudios con planos inclinados, Leonhard Euler determinó que el rozamiento estático es aproximadamente el doble que la fricción de deslizamiento. Él introdujo, además, el coeficiente de rozamiento " $\mu$ ".

Casi medio siglo después de Amontons, Charles Augustin Coulomb reconoció la importancia de la rugosidad de las superficies y trató la relación entre las fuerzas horizontales y la componente del peso. Él sugirió que la fricción se producía por el trabajo hecho en arrastrar una superficie sobre otra, siendo una de sus contribuciones más importantes el postulado que establece que el contacto entre las superficies sólo ocurre en puntos discretos de contacto de asperezas. La Figura 2.3 esquematiza el tribómetro usado por Coulomb en sus estudios de fricción.

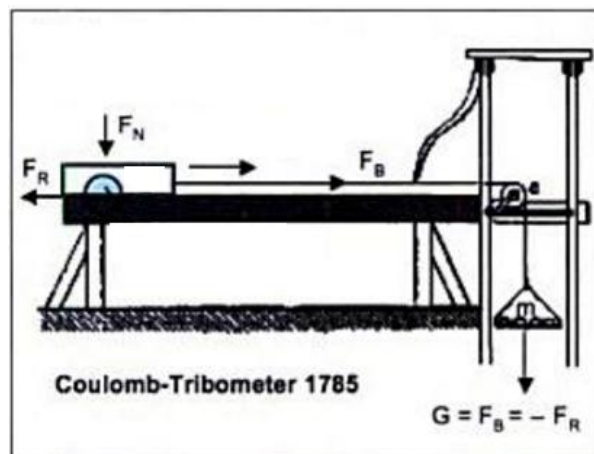


Figura 2.3: Esquema del tribómetro utilizado por Coulomb en 1785[6].

Otro hito de ese período es la primera patente conocida de un rodamiento de bolas. Esta se debe a P. Vaughan, en Inglaterra, quien fue un fundidor de hierro que inventó, en 1791, el rodamiento de bolas, patentándolo en 1794.

Más adelante, durante la revolución industrial se dieron grandes avances en el desarrollo de lubricantes. Esto se logró por los conocimientos en aspectos de mecánica de los fluidos sumado a la creciente demanda del desarrollo industrial en cuanto a volumen y calidad de los lubricantes. Esto llevó a la rápida sustitución de los aceites animales y vegetales por los aceites minerales que se obtienen de la destilación y refinación de petróleo, esquisto y carbón.

Aunque el desarrollo industrial dio lugar a un gran adelanto en concepto de lubricación, la verdadera era de la tribología comenzó tras la Primera Guerra Mundial. Las propiedades físicas de los lubricantes tuvieron que adaptarse a las condiciones más estrictas de carga, velocidad y temperatura requeridas por los equipos bélicos. Por otra parte, los conceptos modernos de aditivación de lubricantes comenzaron a partir de los años treinta. Se desarrollaron mejoradores del índice de viscosidad, mejoradores del punto de escurrimiento, inhibidores de la oxidación y la corrosión, etc. Paralelamente, comenzó el desarrollo de los aceites sintéticos, a causa de los desgastes generados en equipos solicitados a temperaturas elevadas. Sin embargo, y a pesar de su gran importancia, el consumo de lubricantes sintéticos sólo ha alcanzado en la actualidad un 5% de los lubricantes convencionales.

Los aceites lubricantes sintéticos se caracterizan por su elevada estabilidad térmica, su bajo coeficiente de rozamiento y su reducida volatilidad, con la desventaja de un costo más elevado en comparación con los aceites minerales. De igual manera ha aumentado el consumo de grasas lubricantes. Las grasas son materiales semifluidos que incorporan agentes espesantes al aceite y se usan en situaciones en las que el aceite se derramaría. Como espesante se utilizan, por ejemplo, jabones de litio, calcio o aluminio, o espesantes inorgánicos.

## 2.2 CONCEPTOS SOBRE TRIBOLOGIA

### 2.2.1 *Fricción*

La fricción se define como la resistencia al movimiento durante el deslizamiento que experimenta un cuerpo sólido al moverse sobre otro con el cual está en contacto. Esta resistencia al movimiento depende de las características de las superficies [7]. Normalmente se expresa mediante el coeficiente de fricción ( $\mu$ ), que es el cociente entre la fuerza de fricción

$F_f$  y la carga normal  $F_N$ , que presiona dos cuerpos entre sí. Se puede obtener de la siguiente ecuación.

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \text{ Ecuación 2.1}$$

donde:

$F_f$  Fuerza de fricción

$F_N$  Fuerza o carga normal

El coeficiente de rozamiento o coeficiente de fricción (en inglés “coefficient of friction” o COF) expresa la resistencia al movimiento relativo que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto.

La mayoría de las superficies, incluso las que se consideran pulidas son extremadamente rugosas si son observadas a una magnificación mayor. Cuando dos superficies son puestas en contacto, el movimiento de una respecto a la otra genera fuerzas tangenciales llamada fuerza de fricción, que tiene sentido contrario a la fuerza aplicada. El valor del coeficiente de rozamiento es característico de cada par de materiales en contacto y depende además de factores tales como la geometría de las superficies en contacto, sus propiedades, la velocidad relativa entre las mismas, la temperatura, el lubricante utilizado, etc.

Asociada con la fuerza de rozamiento se puede expresar la pérdida gradual de energía cinética de un cuerpo, donde parte de esta energía se disipa en forma de calor y otra parte interviene en los procesos de deformación, dando lugar al desgaste de las superficies en contacto. La fuerza de fricción es responsable por la disipación y pérdida de mucha energía en los procesos productivos industriales. Se ha estimado, por ejemplo que el 10% del uso del combustible de Estados Unidos es usado simplemente para vencer la fuerza de fricción[8]. La energía perdida en fricción debe ser continuamente aportada al sistema para mantener las piezas en movimiento. Además, sin fricción la mayoría de los procesos productivos no podría existir. De todas formas, la fricción también juega un rol principal en muchas de nuestras actividades diarias, no sólo en los procesos productivos. El solo hecho de poder caminar, correr, frenar, etc., se lo debemos a la fricción.

Es frecuente asociar los términos de fricción y desgaste pensando que existe una relación directa entre ellos, es decir, que una alta fricción equivalga a una alta velocidad de desgaste. Este, sin embargo, suele ser un concepto erróneo, ya que si bien es cierto que hay elementos comunes entre ambos conceptos, se trata de fenómenos diferentes, como se verá en la próxima Sección.

### 2.2.2 *Desgaste y dañado superficial*

El desgaste es la pérdida de masa de la superficie de un material sólido por la interacción mecánica con otro cuerpo en contacto. Es específicamente la eliminación o ganancia de material de una superficie como resultado de una acción mecánica [9]. Cabe destacar que cuando se habla de otro cuerpo, el mismo no necesariamente tiene que ser sólido. Se puede hablar, por ejemplo, de desgaste por erosión de algún tipo de fluido.

Junto con la corrosión, el desgaste genera las mayores pérdidas económicas en la industria [8]. Además, se puede combinar con otros tipos de fallas resultando una acción combinada.

### 2.2.3 *Etapas de desgaste*

En condiciones normales de funcionamiento, cuando se encuentran superficies con movimiento relativo, pueden producirse cambios en las superficies. Algunos de estos cambios afectan las propiedades tribológicas de las superficies e inducen cambios en la velocidad de desgaste. Normalmente se pueden identificar tres etapas en un proceso de desgaste:

- La etapa primaria, fase temprana, o de asentamiento (denominada también “running-in”, “breaking-in” o “wearing-in”), se caracteriza por una alta velocidad de cambio de la tasa de desgaste (cantidad de partículas de desgaste generadas por unidad de tiempo), grandes cambios en la morfología de las superficies, y un régimen inestable o transitorio.
- La segunda etapa, de mediana-edad o estacionaria (“steady-state”) es aquella en la que la tasa de desgaste se mantiene relativamente constante y la fuerza de fricción, y por consiguiente el coeficiente de fricción, tienden a estabilizarse. La mayoría de las vidas útiles de componentes se miden en esta fase. El pasaje de la primera fase a la segunda se asocia con cambios de la topografía superficial, interacción con nuevas partículas de desgaste, reactividad química entre las superficies y el entorno medioambiental, formación de tribo-capas, alteración del tipo de contacto, etc. [10].
- La fase terciaria, de edad-avanzada o de finalización de vida, se caracteriza por un alto grado de envejecimiento del contacto tribológico que deriva rápidamente en una falla.

Con el aumento de la severidad de las condiciones de contacto, tales como cambios en la temperatura, cargas de contacto y/o velocidades de deslizamiento, la duración de etapa secundaria se acorta y la etapa primaria tiende a fusionarse con la terciaria, lo que reduce drásticamente la vida útil de las superficies de contacto.

### 2.3 PRINCIPALES MECANISMOS DE DESGASTE

Existen diferentes mecanismos de desgaste en materiales metálicos. La mayoría de los investigadores del área tienden a dividir los mecanismos de desgaste en cinco categorías:

- *Adhesión*
- *Abrasión*
- *Fatiga de contacto*
- *Desgaste corrosivo*
- *Mecanismos combinados*
  - *Fretting*
  - *Erosión*
  - *Impacto*

#### 2.3.1 Desgaste por adhesión

El desgaste adhesivo es la forma más universal del desgaste, aunque no por ello la más peligrosa, debido a que en general la tasa de desgaste por este mecanismo suele ser muy baja [8]. Este mecanismo puede ocurrir cuando dos superficies metálicas son puestas en contacto bajo carga, ya que se pueden formar fuertes uniones adhesivas (soldaduras locales) en los puntos en los que las asperezas entran en contacto bajo presión (ver Fig. 2.4). El deslizamiento puede ser “con lubricación” o “en seco”. Se trata de un tipo de desgaste en el que se produce transferencia de material de una superficie a otra. Esta adhesión es de la misma naturaleza e intensidad que las fuerzas que existen entre moléculas del seno del material.

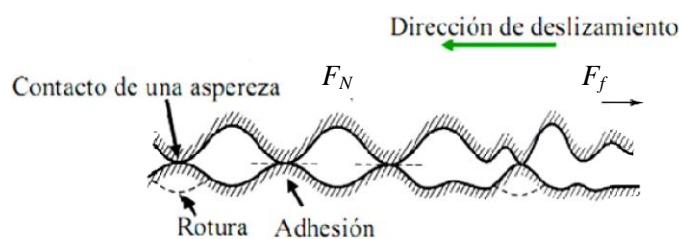


Figura 2.4: Adhesión durante el deslizamiento de dos superficies en contacto.

En general, cuando se tienen materiales de dureza diferente, la transferencia suele ser del material más blando al más duro (ver esquematización en Figura 2.5). Este proceso puede producirse de forma muy rápida, dando lugar incluso al gripado de piezas móviles en sistemas mecánicos.

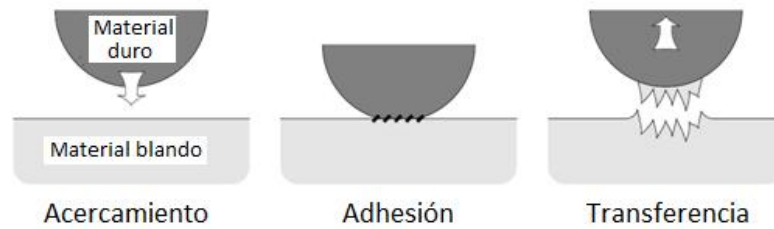


Figura 2.5: Proceso de transferencia de metal debido a adhesión (adaptado de [11]).

La Fig. 2.6 muestra dos modelos de desgaste adhesivo. Cuando las asperezas entran en contacto, estas pueden presentar una fractura prácticamente sin deformación plástica (comportamiento frágil), o adherirse y deformarse plásticamente (comportamiento ductil).

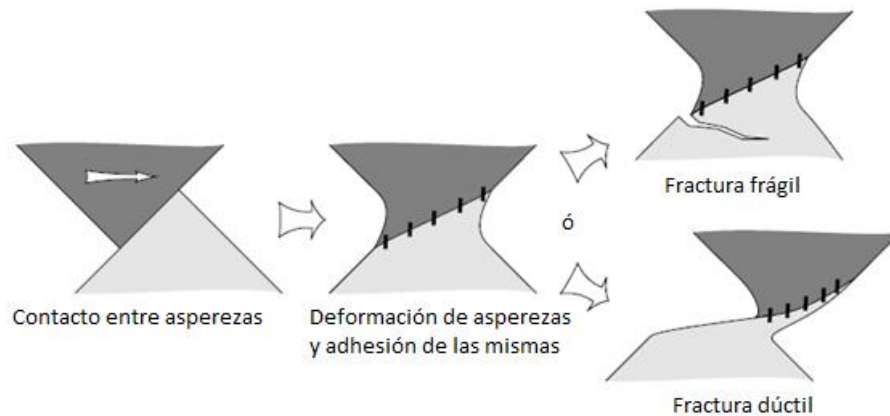


Figura 2.6: Modelo de deformación en el contacto de las asperezas de la superficie para materiales dúctiles y frágiles (adaptado de [12]).

En algunos casos la transferencia de materia de una superficie a otra puede producir un atascamiento en el deslizamiento generando un daño severo de las superficies. La Fig. 2.7 presenta imágenes de superficies dañadas por desgaste por adhesión. A la izquierda se observa una zona en la cual se ha perdido material, y la derecha presenta una zona en la cual se ha ganado material.

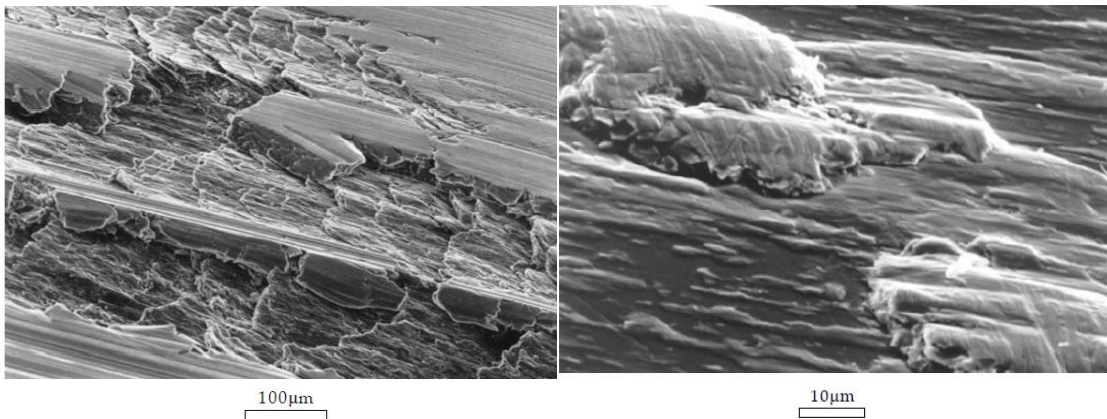


Figura 2.7: Superficie de una aleación de Al-Si dañada por desgaste adhesivo (izq.) y material transferido de latón sobre una superficie de aluminio (der.) [11].

Este mecanismo de desgaste puede generar fragmentos desprendidos de los materiales en contacto, llamados “debris”, que contribuyen a aumentar la fricción entre las superficies y en los materiales. Este es otro mecanismo de desgaste, por fricción por impurezas abrasivas.

### 2.3.2 Desgaste por abrasión

Este mecanismo de desgaste se da en presencia de una superficie o partículas duras sobre una superficie relativamente blanda. El mecanismo de desgaste abrasivo puede ser clasificado según la cantidad de cuerpos que estén involucrados.

*Abrasión de tres cuerpos:* en la que interviene un tercer elemento, a menudo elementos contaminantes, o bien piezas desprendidas (debris) de alguna de las superficies (ver Fig. 2.8).

*Abrasión de dos cuerpos:* cuando interactúan sólo las superficies de contacto. El desgaste por deslizamiento (adhesión) puede arrancar partículas que generan desgaste por abrasión.

En el desgaste abrasivo de dos cuerpos pueden desarrollarse distintos tipos de procesos tales como: corte (en inglés cutting), surcado (plowing), formación de cuña (wedge formation) y escamado (flaking) [11]. La Fig. 2.9 muestra imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de una superficie, ejemplificando los procesos de desgaste por abrasión con corte, formación de cuña y surcado.

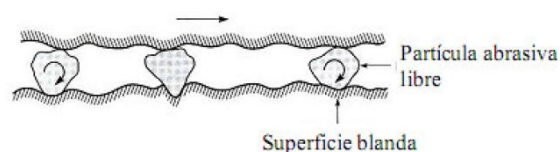




Figura 2.8: Ejemplificación de movimiento de partículas abrasivas en proceso de desgaste abrasivo de tres cuerpos.

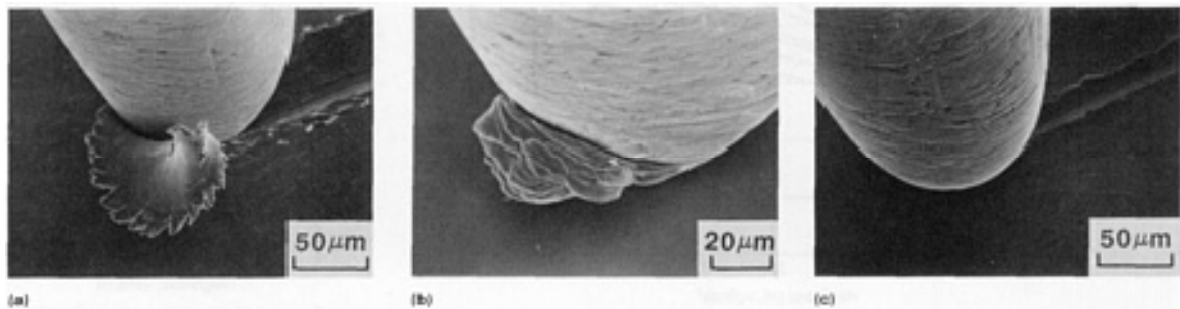


Figura 2.9: Imágenes SEM que muestran ejemplos de tres procesos de desgaste abrasivo: (a) corte; (b) formación de cuña; y (c) surcado[13].

### 2.3.3 Fatiga de contacto superficial

Si las superficies soportan cargas cíclicas, el material próximo a la superficie generará grietas, que con los sucesivos ciclos de carga se irán propagando y ramificando. Se pueden inducir la formación de fisuras sub-superficiales que se interceptan entre sí y con la superficie, generando fragmentos de gran tamaño, o promoviendo la formación de un daño superficial denominado picado superficial (“pitting superficial”) o pit (ver Fig. 2.10). Este entramado de grietas dará lugar a partículas libres que se desprenderán fácilmente de la superficie. Cuando este tipo de daño es generalizado, y por lo tanto el desgaste por fatiga superficial es severo, se denomina descamado ó “spalling”. Si el movimiento es repetitivo (ej. rodamientos), el desgaste por fatiga superficial es considerable, mientras que bajo otras formas de movimiento (deslizamiento por ejemplo) resulta de menor importancia [8]. En el Capítulo 3 se tratará el tema con mayor profundidad.

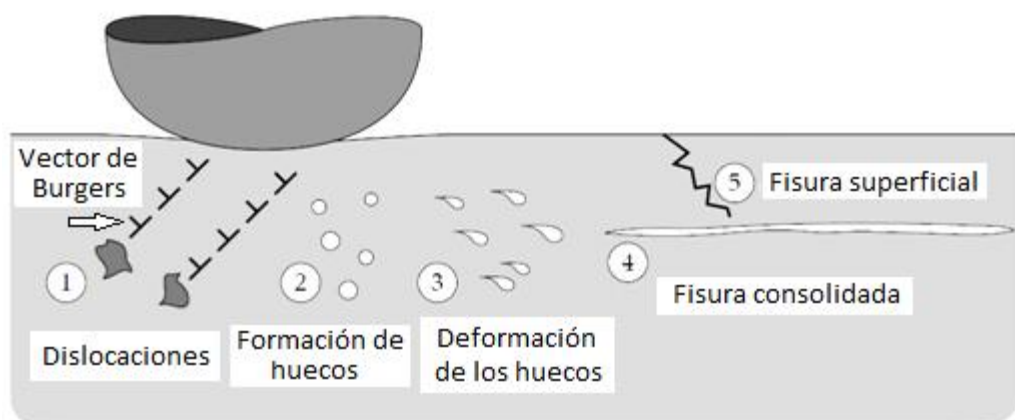
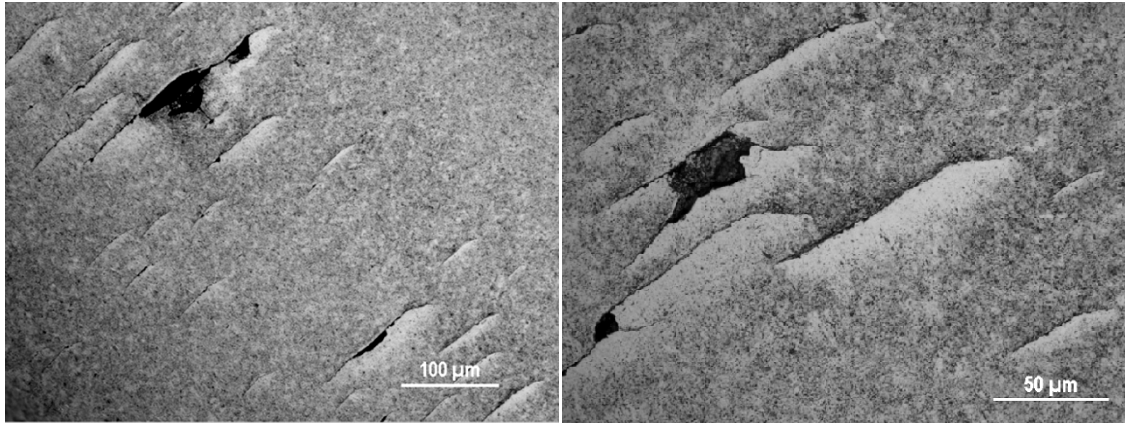


Figura 2.10: Esquema del proceso de formación de fisuras por rodadura de contacto (adaptado de[14]).



La figura 2.11 presenta fisuras típicas producidas en una pista de rodamiento de acero AISI-SAE 52100. Se observa además zonas donde se ha desprendido material a causa de la coalescencia de fisuras sub-superficiales.



*Figura 2.11: Superficie en la que se observa el descascarillado típico de degradación por fatiga de contacto por rodadura. Izq.: 100x; Der.: 200x.*

#### 2.3.4 *Desgaste corrosivo*

En los mecanismos enunciados anteriormente el factor de desgaste es puramente mecánico, en cambio cuando se habla de desgaste corrosivo, al desgaste mecánico se le suma el ataque químico. La combinación de efectos de desgaste y corrosión puede resultar en una pérdida muy importante de material, mucho mayor que si se presentan individualmente (efecto sinérgico). El desgaste por corrosión ocurre cuando el deslizamiento tiene lugar en un ambiente corrosivo (generalmente húmedo). En ausencia de movimiento relativo, los productos de la corrosión (generalmente óxidos) forman una capa superficial que tiende a disminuir, y en algún caso frenar, la velocidad del proceso corrosivo. Sin embargo, la acción deslizante de desgaste remueve la película y el ataque corrosivo continúa [8]. Se considera que el desgaste corrosivo ocurre en dos etapas (ver Fig. 2.12): a) formación de una película de óxido en la superficie (esta película puede operar como lubricante, aunque generalmente no es posible ya que es una capa muy frágil), y b) la capa de óxido, al ser frágil, queda expuesta a los fenómenos de deslizamiento del sistema, siendo, entonces, removida.

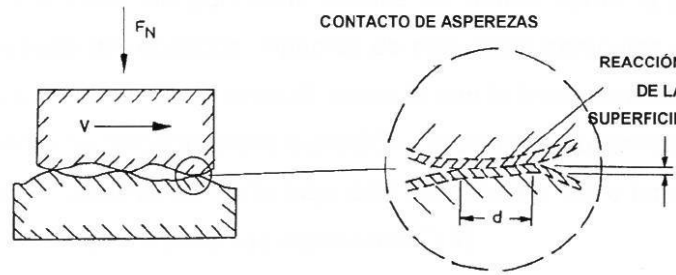


Figura 2.12: Representación de desgaste con formación de capa de óxido.

### 2.3.5 Desgaste Fretting (micro-oscilatorio)

Este es uno de los mecanismos de desgaste combinado. El fretting se produce cuando dos superficies sólidas en contacto están sometidas a movimiento relativo oscilatorio de pequeña amplitud, generalmente tangencial. El mecanismo se presenta cuando se mantiene el sistema sometido a un gran número de ciclos. Fretting ocurre generalmente entre componentes que tienen como función evitar el movimiento (como en bulones). El medio ambiente juega entonces un papel importante en este tipo de desgaste, ya que bajo condiciones húmedas puede ocurrir reacción química o electroquímica de la superficie con el entorno (por ej.: corrosión). En general, el fretting es iniciado por adhesión, amplificado por corrosión, y sus principales efectos son por abrasión. Cuando la remoción de óxido es el mecanismo predominante en el proceso, éste se denomina “corrosión-fretting” (ver Fig. 2.13).

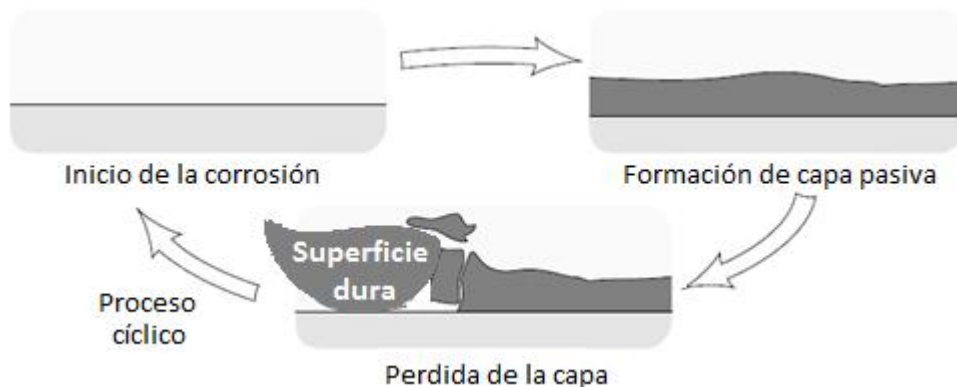


Figura 2.13: Ciclo de remoción de la película de óxido en corrosión-fretting (Adaptado de [15]).

### 2.3.6 Desgaste Erosivo

El desgaste por erosión se produce por el impacto de un chorro defluido o partículas sólidas pequeñas transportadas por un fluido, en general, aire o agua, o por gotas líquidas, incidentes (choque mecánico). En el caso de la erosión por el choque de partículas sólidas, el desgaste depende, entre otras variables, de la velocidad, dureza de las partículas incidentes, y el ángulo

de choque. La Fig. 2.14 representa los distintos mecanismos de desgaste por erosión de partículas incidentes. En materiales dúctiles, la máxima pérdida de material se da a ángulos bajos (por sustracción de material), sin embargo, en materiales frágiles se da a 90° (por propagación de grietas).

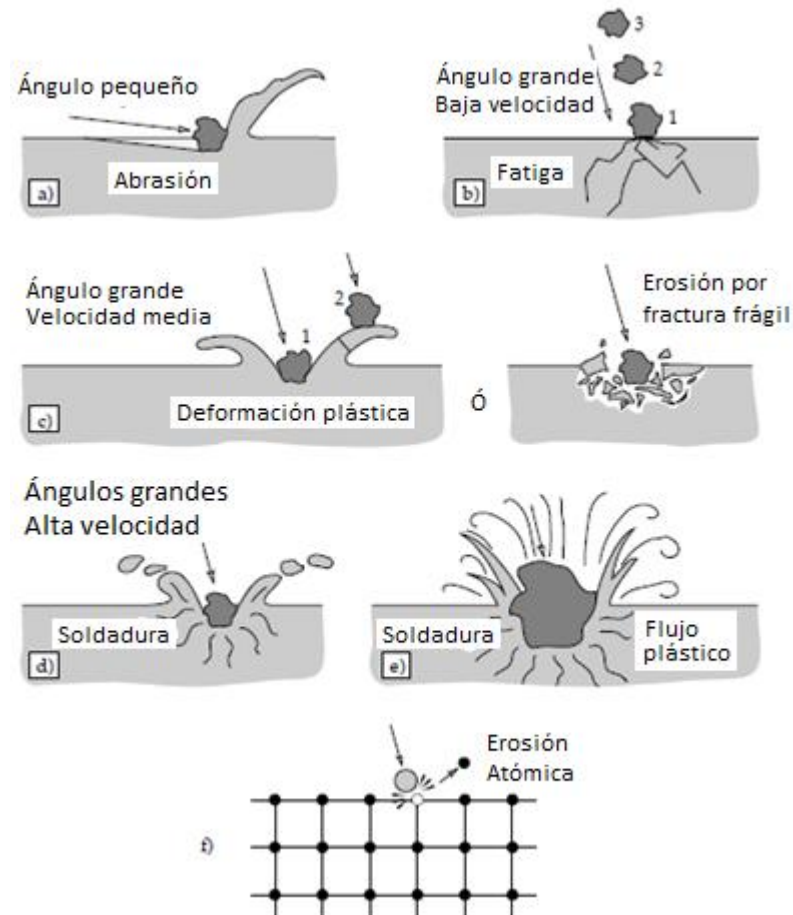


Figura 2.14: Posibles mecanismos de erosión a) Abrasión bajos a bajos ángulos de impacto, b) Fatiga superficial por baja velocidad y alto ángulo de impacto, c) deformación plástica múltiple o por velocidad moderada, y alto ángulo de impacto o fractura frágil d) soldadura con la superficie a altas velocidades de impacto, e) erosión macroscópica con efectos secundarios, f) degradación de la red cristalina por impacto con átomos (Adaptado de [11]).

### 2.3.7 Desgaste por Impacto

El desgaste por impacto es causado por la colisión repetitiva entre superficies de dos cuerpos. Un claro ejemplo de este tipo de desgaste se ve usualmente en la cabeza de los martillos de trabajado mecánico. Este mecanismo es marcadamente influenciado por las propiedades mecánicas de los materiales en contacto y las geometrías de las superficies de contacto. También tienen influencia el nivel de las cargas aplicadas (masa y velocidad de los componentes) y el coeficiente de fricción de las superficies en contacto. La Figura 2.15

muestra un esquema con algunos modelos de desgaste por impacto según sea la respuesta del material frágil o dúctil.

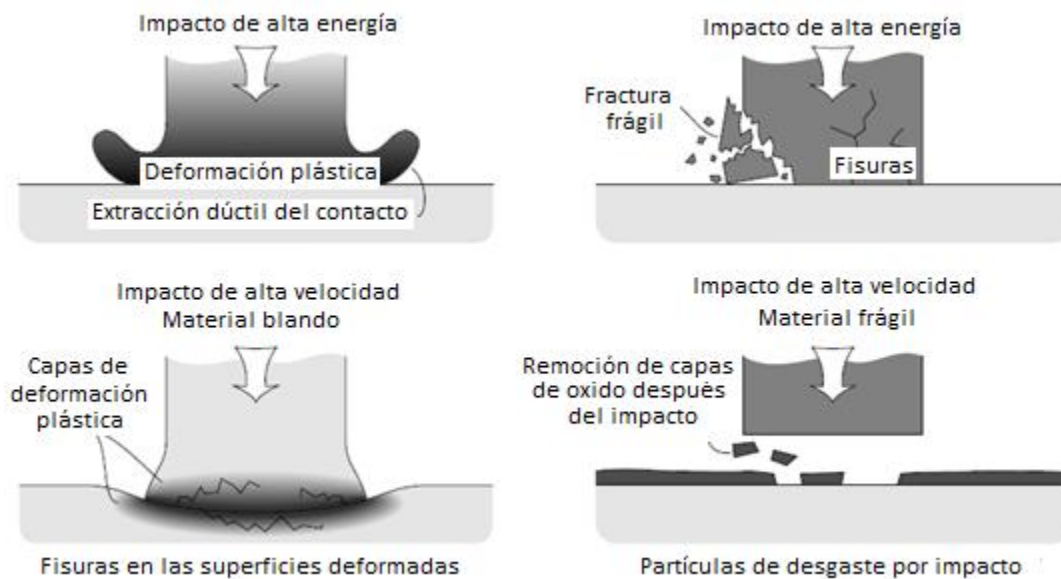


Figura 2.15: Ilustración esquemática de los mecanismos de desgaste por impacto (adaptado de [11]).

## 2.4 RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Las superficies presentan indefectiblemente un conjunto de irregularidades, es decir, no existen superficies perfectas. Estos defectos, o espaciamentos regulares o irregulares tienden a formar un patrón ó textura característica en su extensión. En este patrón superficial se distinguen dos componentes: rugosidad y ondulación.

La rugosidad, está formada por surcos o marcas dejadas por los agentes que atacan la superficie en el proceso de mecanizado y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación.

La ondulación es el conjunto de irregularidades repetidas en ondas de paso mucho mayor que la amplitud. Las mismas pueden ocurrir por diferencias en los movimientos de la máquina-herramienta, deformación por tratamiento térmico, tensiones residuales, etc.

La medición de textura superficial se realiza en forma geométrica, mediante la utilización de rugosímetros. Las definiciones geométricas son bastante abstractas ya que están basadas en una línea de referencia teórica. Además los resultados sufren ciertas distorsiones por la utilización de filtros para excluir la ondulación cuando se pretende definir la rugosidad. Sin embargo, ajustando correctamente los parámetros de medición según los requerimientos de la superficie, se pueden tomar mediciones con gran precisión.

En la Tabla 2.1 se pueden apreciar los diferentes parámetros geométricos ampliamente utilizados para la caracterización de la rugosidad superficial:

Tabla 2.1: Parámetros de caracterización de superficies

Parámetros superficiales		
Lineal	Superficial	Definición
Ra	Sa	Media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas del perfil de rugosidad en relación a la Línea Media
Rq	Sq	Raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las ordenadas del perfil efectivo en relación a la Línea Media
Rz	Sz	media aritmética de cinco módulos correspondientes a la distancia entre los puntos máximo y mínimo del perfil
Rt	St	Es la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo
Rp	Sp	Distancia entre el punto más alto del perfil y la línea media
Rv	Sv	Distancia entre el punto más bajo del perfil y la línea media

## 2.5 FUNDAMENTOS DE LUBRICACIÓN

Como ya se ha comentado, la lubricación cumple un papel muy importante en el mundo industrial, considerando que todas las partes móviles de las máquinas están sujetas a fricción y desgaste. La reducción y control de los dos fenómenos citados es uno de los principales objetivos de la lubricación ya que ello implica importantes reducciones de las pérdidas monetarias para el sector industrial. Las pérdidas provienen no sólo de los posibles costos de material y mano de obra de reparación, sino también de la pérdida de producción por falta de disponibilidad del equipo, que pueden llegar a ser aún más altos que los de la propia reparación.

La fricción y el desgaste se pueden reducir, o incluso eliminar casi enteramente, si se impide que las superficies en movimiento entren en contacto directo. Esta es la función esencial de la lubricación. En este sentido, un lubricante es toda sustancia (sólida, líquida o gaseosa) interpuesta entre dos superficies sólidas con movimiento relativo que evita el contacto directo.

Además, las temperaturas alcanzadas en muchas operaciones de piezas lubricadas, e inclusive por calentamiento viscoso, pueden ser muy altas, por lo que la estabilidad térmica del lubricante es esencial para minimizar su degradación durante el servicio y almacenamiento. De hecho, un buen lubricante debe poseer una conductividad térmica adecuada que le permita actuar también como refrigerante en el contacto. Por ello, las tecnologías actuales buscan disminuir la volatilidad de los lubricantes y aumentar su punto de inflamación. Dado, entonces, el papel que juega el aceite lubricante, sus propiedades más importantes son la viscosidad y la respuesta ante cambios de temperatura y presión. De hecho, la velocidad de deslizamiento relativo entre dos superficies, la carga aplicada y la viscosidad del lubricante, son los factores más importantes que influyen en el rendimiento de la lubricación.

Por otro lado, como ya se comentará, el contacto directo entre superficies produce desgaste y lleva a la formación de superficies activas químicamente, además de generar gran cantidad de calor. Estos factores pueden activar reacciones químicas en el lubricante (conocidas como reacciones tribo-químicas) que son generalmente perjudiciales, pero que, en determinadas condiciones, pueden favorecer la formación de una película protectora entre las superficies de contacto, y resultar favorables. En este sentido, otra característica indispensable de los lubricantes es evitar la corrosión de los materiales en contacto.

### *Regímenes de lubricación*

Existen varios regímenes de lubricación, principalmente definidos por la distancia de separación entre las paredes deslizantes. La clasificación de estos regímenes se ve facilitada por la definición del parámetro  $\lambda$ , que permite conocer la probabilidad de interacción de las crestas de las dos superficies. Este parámetro se calcula como:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde

$h_{min}$	<i>espesor de película mínima</i>
$R_{q1}$	<i>rugosidad RMS de la superficie 1</i>
$R_{q2}$	<i>rugosidad RMS de la superficie 2</i>

El valor de  $\lambda$  provee una medición que permite conocer la probabilidad de interacción de las crestas de las superficies.

$\lambda > 3$  *Régimen hidrodinámico (HDL)*

$\lambda$  *entre 1 y 3* *Existirá un régimen mixto o también conocido como régimen elasto-hidrodinámico (EHL).*

$\lambda < 1$  *Lubricación límite, prácticamente toda la carga la soportan los contactos sólido-sólido*

En la “lubricación límite” ó “lubricación por película delgada”, que se suele definir por un  $\lambda < 1$  [16], el espesor de lubricante es tan pequeño que, en ciertas zonas de las superficies de contacto, es de nivel molecular. En este régimen, la viscosidad del fluido juega un papel secundario. La efectividad de la lubricación en la minimización del desgaste se determina por algunas propiedades físicas de la película, como el módulo elástico transversal, el espesor de película, la adhesión a las superficies, la solubilidad, etc. El aspecto principal para lograr la lubricación es la formación de una capa superficial que protege los materiales al desgaste y daños en las superficies de contacto. La formación de esa película se regula por la química del lubricante y las superficies. Los compuestos polares del lubricante (con hidrocarburos en sus extremos) suelen verse atraídos por las cargas positivas de la superficie del metal, logrando la adherencia y reaccionando químicamente con las mismas.

En la “lubricación en régimen hidrodinámico” (HDL) o “de película gruesa”, no existe contacto entre asperezas. En este caso, la fricción se genera por el contacto entre las superficies y el lubricante. Las condiciones de lubricación serán óptimas cuando la película de lubricante entre las dos superficies en movimiento relativo resulte lo suficientemente gruesa como para impedir el contacto metal con metal, por lo que el espesor mínimo de la película debe ser algo superior a la suma de las rugosidades de ambas superficies. Esta película puede lograrse, por el arrastre de la superficie móvil, gracias a la viscosidad del lubricante en un régimen de flujo laminar. En este régimen, la viscosidad del fluido juega un papel fundamental.

Separaciones más grandes de las superficies, en el régimen que se conoce como “lubricación hidrostática”, se logran con películas de lubricante que se mantienen gracias a un sistema auxiliar de alimentación de lubricante bajo presión. La lubricación hidrostática es muy apropiada para velocidades relativas de deslizamiento bajas o, incluso, para los momentos de arranque en las diferentes máquinas o mecanismos. En este régimen de



lubricación, el nivel de rozamiento es muy bajo, pero existe la desventaja que se necesita del sistema auxiliar para lograr la película.

Finalmente, la “lubricación elasto-hidrodinámica” (EHL) es la que se da a espesores intermedios. Este régimen se genera en los contactos altamente cargados, que producen un aumento de viscosidad en el lubricante y deformaciones elásticas en los cuerpos. El aumento de la viscosidad debido a la alta presión, también hace que aumente la capacidad de carga. En consecuencia, el espesor mínimo de película depende de las propiedades del lubricante, de la velocidad relativa de las superficies y de la presión. Los parámetros críticos de este régimen son la viscosidad del lubricante y los coeficientes que miden la dependencia de la viscosidad con la presión. Un aumento de la presión, con consecuente disminución del espesor de la película, puede producir contacto metal-metal debido a las rugosidades de las superficies. Cuando se llega a ese punto, y el contacto entre las asperezas se convierte en el mecanismo dominante para soportar la carga, se está dentro de la “lubricación mixta”. En la misma coexisten el espesor de película lubricante logrado por el régimen EHL con la “lubricación por película delgada”.

Por último, se puede enunciar un tipo de lubricación denominado “lubricación sólida”, donde las superficies están separadas por un lubricante en estado sólido. Los lubricantes más utilizados en este caso son el bisulfuro de molibdeno y el grafito, que poseen una estructura molecular en forma de láminas superpuestas. Se los utiliza sobre todo en aplicaciones donde las temperaturas son elevadas, el acceso de un lubricante líquido a determinados puntos es dificultoso, las cargas son elevadas, y existen vibraciones o presencia de gases, disolventes, ácidos, etc.

En la Tabla 2.2 se puede observar los diferentes mecanismos de lubricación acompañados de sus características más representativas [16].

Tabla 2.2: Propiedades características de las películas lubricantes [16]

	Espesor de película lubricante	Coefficiente de espesor de película	Coefficiente de fricción
Mecanismos de lubricación	$h_{min}$ mm	$\lambda$ -	$m$ -
Lubricación limite "Boundary"	0.005 - 0.1	< 1	0.03 - 0.2
Lubricación en régimen mixto "Mixed"	0.01 - 1	1 - 4	0.02 - 0.15
Lubricación Elasto-hidrodinámica	0.01 - 10	3 - 10	0.01 - 0.1
Lubricación hidrodinámica	1 - 100	10 - 100	0.001 - 0.01



### Curva de Stribeck

La curva de Stribeck relaciona la variación del coeficiente de fricción ( $\mu$ ) en función de la relación ( $hN/p$ ) conocida como numero de Sommerfeld.

donde

$h$	<i>viscosidad del fluido lubricante</i>
$N$	<i>velocidad de rotación</i>
$p$	<i>carga proyectada en el área (<math>P \sim F_N</math>)</i>

Para valores elevados de  $hN/P$  se obtiene un espesor elevado de película lubricante y la fricción se debe al rozamiento interno del lubricante. Este tipo de película se logra en la lubricación hidrodinámica (típica de cojinetes de deslizamiento). Para valores intermedios de  $hN/P$ , como los observados en el contacto de cuerpos no-conformes, se entra en el régimen de lubricación conocido como elasto-hidrodinámico (EHD), con espesores de película típicos entre 0,01-10  $\mu\text{m}$ [16]. Si el espesor de película disminuye aún más, se produce el contacto ocasional de las asperezas superficiales, dando lugar al régimen conocido como de lubricación mixta o en un caso más extremo, llegando a la lubricación límite. La Fig. 2.16 presenta el comportamiento cualitativo del coeficiente de fricción en función de la relación  $\eta N/P$  (curva de Stribeck). Como se puede observar la curva pasa de un máximo de coeficiente de fricción para la “lubricación límite”, a un mínimo en la lubricación “elasto-hidrodinámica”. Además, se observa que para el tipo de lubricación hidrodinámica, el coeficiente de fricción aumenta con el incremento de  $hN/P$ .

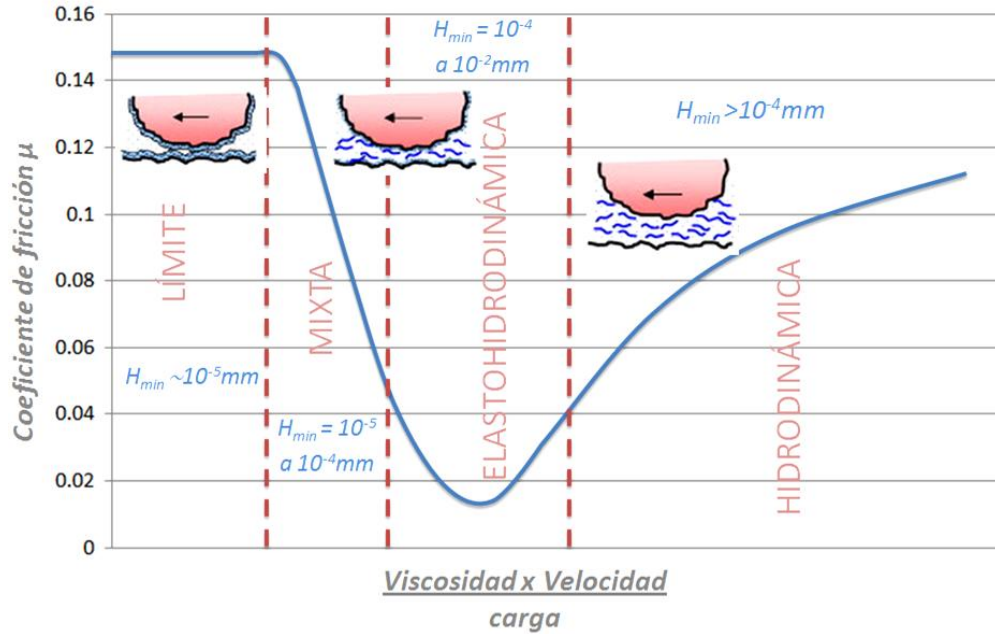


Figura 2.16: Curva de Stribeck mostrando el coeficiente de fricción en función de  $hN/P$  para los diferentes regímenes de lubricación.

## 2.6 PARTÍCULAS DE DESGASTE Y FERROGRAFÍA ANALÍTICA

El daño superficial de un elemento debido al desgaste puede producirse de dos formas. Una es la deformación plástica y, la otra, el desprendimiento de partículas de desgaste. Estas partículas, dispersas en el lubricante, son, además, una amenaza para los sistemas tribológicos, ya que pueden actuar como elementos abrasivos entre las superficies participando en la degradación de las superficies. El estudio de las partículas desprendidas permite conocer el mecanismo de desgaste operativo y, de acuerdo a la concentración de fragmentos, establecer la velocidad de desgaste, con el objeto de prevenir fallas catastróficas [17].

A comienzos de los años 70 se desarrolló un método analítico conocido como “ferrografía”, usado originalmente por la fuerza aérea de Estados Unidos, que hoy tiene su aplicación mayoritaria en el sector industrial. La ferrografía consiste en el análisis de partículas de desgaste, principalmente ferrosas, de una muestra de fluido mediante la precipitación de las mismas en un film de vidrio a causa de un fuerte campo magnético. Esta técnica, combinada con estudios EDS (“energy-dispersive X-rays spectroscopy”) sobre las partículas y espectroscopía IR (infra-rojo) sobre el aceite, tiene el potencial de permitir determinar la cantidad, tipo y fuente de desgaste [18].

Los estudios ferrográficos son muy utilizados para detectar condiciones anormales de desgaste o monitorear el desgaste normal que ocurre durante la operación estable de una máquina. También permite monitorear el régimen inestable de desgaste que ocurre cuando una máquina se pone en funcionamiento por primera vez. Durante este período, se desprenden partículas irregulares de gran tamaño, las cuales pueden provenir de operaciones de maquinado, hasta que se formen regiones de contacto “suaves”.

## 2.7 IMPORTANCIA INDUSTRIAL DE LA TRIBOLOGÍA Y ASPECTOS ECONÓMICOS

Como ya se comentará, la tribología es una ciencia que, entre sus objetivos, pretende mejorar la eficiencia energética y el ciclo de vida de componentes de máquinas. Por ello, y en relación con este objetivo, se viene investigando intensamente desde hace décadas los complejos fenómenos que intervienen en el contacto de piezas operando bajo ciertos regímenes de lubricación. Si se evalúan las pérdidas debidas a fricción y desgaste sobre la base de un solo equipo, éstas podrían parecer pequeñas. Sin embargo, cuando esas pérdidas se ven multiplicadas sobre la base de miles de equipos, los costos comienzan a ser grandes.

Estudios realizados hace décadas ya exponían la importancia del campo de la tribología sobre la base del ahorro para un país. P. Pacholke y K. Marshek, por ejemplo, demostraron que suministrando un lubricante con un 5% más de eficiencia a todas las cajas de engranajes de EEUU se lograría un ahorro de aproximadamente 600 millones de dólares al año [19]. En otro estudio del año 1966, P. Jost reveló que mediante la aplicación de principios básicos de tribología, podría ahorrarse aproximadamente 515 millones de libras por año a valores de 1965 en la economía de Inglaterra [20]. Un informe similar publicado en Alemania Occidental en 1976 mostró que las pérdidas económicas causadas por la fricción y el desgaste eran equivalentes al 1% del Producto Interno Bruto del país [21]. También se estimó que en EEUU alrededor del 11% de la energía total anual podía ser ahorrada a través de los avances en la tribología [22]. Para este análisis se consideraron cuatro grandes áreas: transporte, turbo-grupos, generación de energía y procesos industriales. En particular, se ha calculado que las mejoras tribológicas aplicadas sólo al transporte automotriz podrían ahorrar alrededor de 18,6% de la energía total anual consumida en ese rubro, lo que equivale a alrededor de 14300 millones de dólares por año [23].

E. Rabinowicz publicó en 1995 [8], en su libro “Friction and wear of materials”, el esquema que se muestra en la Fig. 2.17, que resume las diferentes pérdidas de utilidad de equipos, y donde se muestra que el 55% de los mismos se debe a desgaste. Esta es una más de las razones por las que resulta tan importante la inversión de recursos en I+D en el campo de la Tribología.

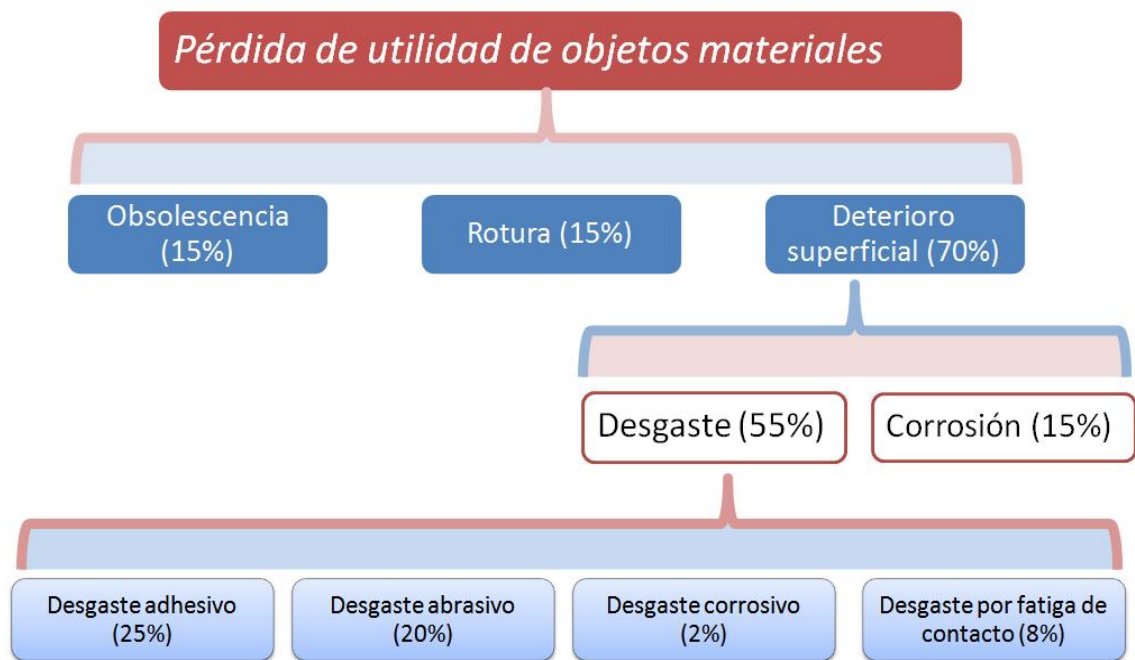


Figura 2.17: Esquema donde se observa la pérdida de utilidad de piezas con el porcentaje estimado de la importancia económica de cada una [8].

## 2.8 REFERENCIAS

- [1] Blau, P. J. (1992). Glossary of terms. ASM handbook: lubrication and wear technology, 18, 1-21.
- [2] Jost, H. P. (1966). Lubrication (tribology) education and research. A Report on the Present Position and Industry Needs, Department of Education and Science, HM Stationary Office, London.
- [3] Newberry P. E. (1985), El Bersheh, “The Tomb of Tehuti-Hetep”, Vol. 1.
- [4] Michael R., (1999) “Who is who in Ancient Egypt”, Routledge, London, ISBN 0-203-44328-4, p. 48.
- [5] Bhushan B., (2013), Introduction to Tribology, Ed John Wiley & Sons, Feb 14, - 744 pages ISBN 1118403223, 9781118403228
- [6] Czichos, H., & Habig, K. H. (2010). Tribologie-Handbuch. Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, ISBN 978-3-8348-0017-6. Vieweg+ Teubner Verlag| GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010, 1.
- [7] Ludema K.C., (1996) “Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology”, CRC Press, ISBN: 0-8493-2685-0.

- [8] Rabinowicz, E., & Tanner, R. I. (1966). Friction and wear of materials. *Journal of Applied Mechanics*, 33, 479.
- [9] Bayer R., (1994), *Mechanical wear prediction and prevention*, Ed. Marcel Dekker, NY, USA.
- [10] Blau, P. J. (2008). *Friction science and technology: from concepts to applications*. CRC press.
- [11] Stachowiak, G., & Batchelor, A. W. (2013). *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann.-
- [12] Vingsbo O., (1979), "Wear and Wear Mechanisms", *Proc. Int. Conf. on Wear of Materials*, Dearborn, Michigan, 16-18 April NY USA, pp. 620-635
- [13] Kato, K. (1990). Wear mode transitions. *Scripta metallurgica et materialia*, 24(5), 815-820.
- [14] Suh N.P., (1973), The Delamination Theory of Wear, *Wear*, Vol. 25, pp. 111-124.
- [15] Batchelor, A. W., & Stachowiak, G. W. (1988). Predicting synergism between corrosion and abrasive wear. *Wear*, 123(3), 281-291.
- [16] Holmberg K., Matthews A., (2009), *Coatings Tribology*, Ed Elsevier Science, 15 Apr - 576 pages ISBN : 9780080931463, 9780444527509
- [17] Anderson D., (1982), *Wear Particle Atlas (Revised)*. Report NAEC. Naval Air Engineering Center, Advanced Technology Office, Support Equipment Engineering Department 92-163.
- [18] Scott D., (1975), Debris Examination - A Prognostic Approach To Failure Prevention, *Wear*, 34 15 - 22.
- [19] Pacholke P.A. y Marshek K.M, (1986) Improved Worm Gear Performance With Colloidal Molybdenum Disulfide Containing Lubricants, *Lubrication Engineering*, Vol. 43, , pp. 623-628.
- [20] Jost, H. P. (1966). *Lubrication: Tribology; Education and Research; Report on the Present Position and Industry's Needs* (submitted to the Department of Education and Science by the Lubrication Engineering and Research) Working Group. HM Stationery Office.
- [21] Research Report, (1976). (T76-38) "Tribologie" (Code BMFT-FBT76-38), Bundesministerium Fur Forschung und Technologie (Federal Ministry for Research and Technology), West Germany
- [22] Pinkus, O., & Wilcock, D. F. (1977). *Strategy for energy conservation through tribology* (No. TID-28175). American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [23] Dake, L. S., Russell, J. A., & Debrodt, D. C. (1986). A review of DOE ECUT tribology surveys. *Journal of tribology*, 108(4), 497-501.

## Capítulo 3

### *Fatiga de contacto por rodadura*

---

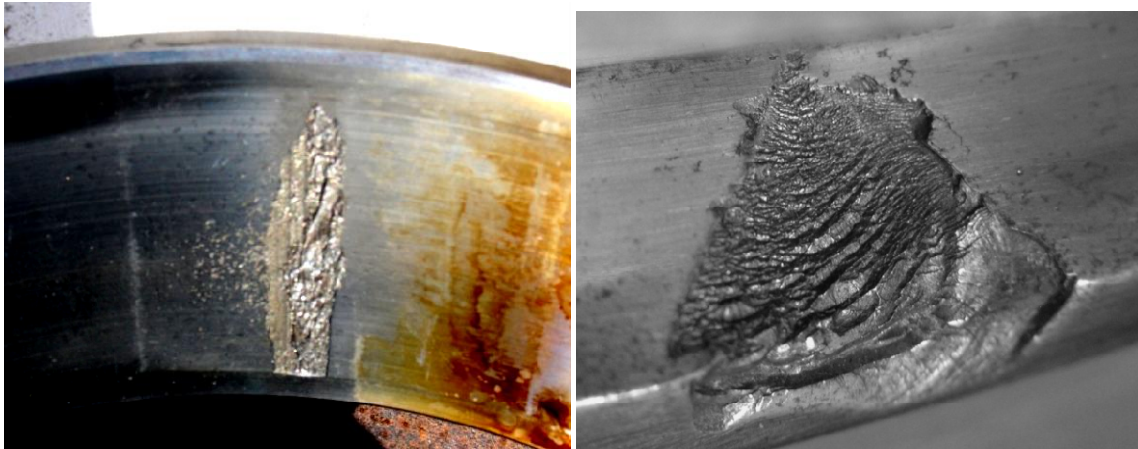
El desgaste por “Fatiga de Contacto por Rodadura” (FCR), conocido en inglés como “Rolling Contact Fatigue” (RCF), es el resultado de la aplicación repetida de tensiones cíclicas sobre las superficies de contacto, por la rodadura de un cuerpo sobre otro. Es muy normal en aplicaciones industriales y es causa de frecuentes fallas en elementos mecánicos como rodamientos, engranajes, sistema de levas, sistema rueda/riel, entre otros, como se ilustra en la Figura 3.1[1].



*Figura 3.1. Los elementos mecánicos más comunes sometidos a FCR,  
Izq.: Engranajes; Der.: Rodamientos.*

En general una falla se presenta en forma repentina y resulta difícil localizarla durante las etapas de nucleación o crecimiento. Recién se manifiesta claramente una vez que ha avanzado,

produciendo el desprendimiento de material y dejando micro-cavidades en la superficie de rodadura, conocidas como pit, cráter o spall (ver Fig 3.2).



*Figura 3.2: Degradación superficial producto de FCR,*

*Izq.: Vía de ferrocarril; Der.: Pista exterior dañada perteneciente a un rodamiento de rodillos.*

La FCR presenta los siguientes síntomas:

- *Aumento del ruido*
- *Calentamiento progresivo*
- *Incremento de las vibraciones*
- *Incremento repentino de partículas de desgaste en el lubricante:*
  - *Partículas esféricas*
  - *Partículas planas de gran tamaño*
- *Aparición de defectos periódicos en productos laminados, etc.*

Los síntomas mencionados involucran magnitudes medibles, que pueden ser utilizadas para implementar planes de mantenimiento, en los casos donde se justifique económicamente.

La magnitud de los efectos de la FCR varía de un sistema tribológico a otro. Muchas veces, un componente puede sufrir daños apreciables por FCR antes de que su función se vea afectada; en cambio, otras veces, la pérdida de funcionalidad se observa instantáneamente con la aparición de la primera partícula de desgaste producto de FCR. Por ejemplo, un rodillo guía en un sistema de conformado de barras puede sostener daños considerables producto de FCR, pero este desgaste puede ser poco importante, siempre y cuando el componente continúe funcionando adecuadamente. Sin embargo, para el caso de rodamientos de bolas de ultra alta

precisión utilizados para el sistema de guiado de misiles, un pequeño daño superficial, o incluso una pequeña partícula desprendida producto de FRC puede ocasionar errores significativos de orientación [1].

### 3.1 DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN EL CONTACTO “IDEAL”

La distribución de tensiones en el contacto de cuerpos no conformes fue descrita por Heinrich Hertz en 1881 [1]. Esta teoría formulada con hipótesis simplificadas, continúa siendo relevante hoy en día como solución clásica para problemas de la mecánica de contacto. Se define como el “contacto de Hertz o hertziano” entre dos cuerpos, a aquel en el cual sus superficies son sometidas a un estado de tensión compresiva y se comportan elásticamente con una pequeña deformación [2]. En la práctica, la solución de Hertz puede aplicarse considerando que las superficies son ideales, o en forma semejante, cuando las superficies son separadas por una película de lubricante con un espesor tal que las micro-asperezas superficiales no tienen contacto.

Las tensiones resultantes y el área de contacto entre las superficies posee una geometría particular, que depende de la forma de los cuerpos. Por ejemplo, para cuerpos infinitamente rígidos, el contacto entre dos esferas se produce en un punto, mientras que el contacto entre dos cilindros con ejes paralelos se produce según una línea. Debido a la elasticidad de los cuerpos, los contactos puntuales o lineales generan áreas de contacto circulares o rectangulares, respectivamente. Además, se define contacto conforme y no-conforme, como aquellos producidos entre superficies con radios de curvatura del mismo signo y radios de signo opuesto.

La Figura 3.3 y 3.4 muestran el contacto entre dos esferas de radios  $R_1$  y  $R_2$  en un punto  $O$  y dos cilindros de radios  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente. Si existe entre las esferas una carga  $P$ , entonces se produce en ambas esferas una deformación elástica que genera un área de contacto circular de radio  $a$ . Asimismo, un área rectangular en el caso de los cilindros.



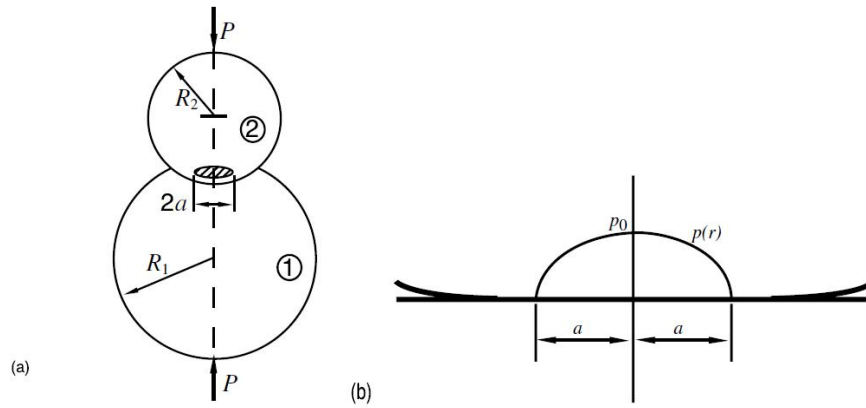


Figura 3.3:a) Esquematización tridimensional del contacto entre dos esferas de radios  $R_1$  y  $R_2$ , bajo un esfuerzo  $P$ , con área de contacto circular de radio  $a$ ; b) distribución de presión de contacto semi-elíptica resultante [3].

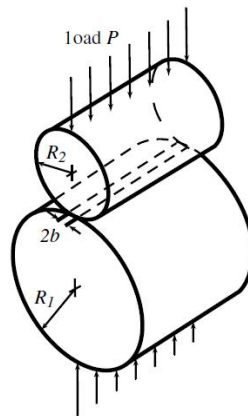


Figura 3.4:a) Geometría de contacto entre dos cilindros  $R_1$  y  $R_2$ , bajo un esfuerzo  $P$ , con área de contacto rectangular [3].

Basado en el principio de la elasticidad, Hertz consideró las siguientes idealizaciones para obtener su solución [1]:

- Las superficies son continuas, no-conformes y sin fricción.
- El área de contacto es pequeña en comparación con el tamaño de los cuerpos.
- Cada cuerpo puede considerarse elástico en una semi-área cercana a la de contacto.

Si se analizan dos esferas en contacto de radio  $R_1$  y  $R_2$ , sometidas a una fuerza  $P$  (ver Fig. 3.3) se aprecia que la carga es máxima según el eje de la dirección de la carga (llámese eje  $z$ )

en el centro y cero en los bordes del contacto. La deformación en la región de contacto tiene un radio definido por la ecuación 3.1.

$$a = \left( \frac{3PR}{4E} \right)^{1/3} \text{ Ecuación 3.1}$$

donde:

$P$  carga aplicada

$R$  radio de curvatura equivalente

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ Ecuación 3.2}$$

$E$  módulo de Young equivalente

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \text{ Ecuación 3.3}$$

La presión de contacto en función del radio resulta entonces:

$$p(r) = \frac{3P}{2\pi a^2} \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \text{ Ecuación 3.4}$$

que define la presión máxima en el centro del radio:

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} \text{ Ecuación 3.5}$$

Conociendo el tamaño del área de contacto y la presión que actúa sobre ella, es posible calcular la distribución de tensiones por debajo de la superficie a lo largo del eje Z. En la Figura 3.5 se puede ver la distribución de tensiones para el contacto puntual y lineal. El esquema representa la presión máxima en el centro del contacto ( $p_0$ ) como una unidad y el radio del área de contacto ( $a$ ) como unidad, en la dirección Z. Se presenta la distribución de tensiones normales  $\sigma_{XX}$ ,  $\sigma_{YY}$  y  $\sigma_{ZZ}$  y la tensión de corte unidireccional  $\tau_1$ .

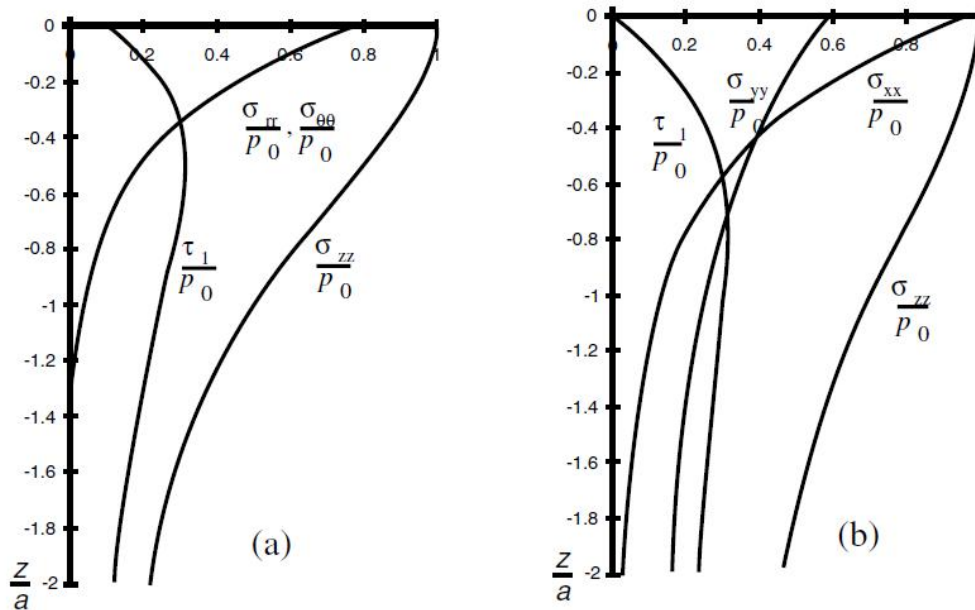


Figura 3.5: Distribución de tensiones normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  y  $\sigma_{zz}$  y la tensión de corte unidireccional  $\tau_1$  debajo del punto central del área de contacto para el contacto puntual (a) y lineal (b) [3].

Se observa en el ejemplo de contacto puntual, que la tensión máxima de corte ( $\tau_1$ ) según el eje  $Z$ , se localiza a una profundidad de  $0,48a$  y, por lo tanto, esta región debe considerarse como la de mayor probabilidad para que se produzca la degradación del material, cuando este posea plasticidad. En materiales frágiles, los cuales rompen por tensión, la zona de mayor probabilidad de falla se ubica en el círculo límite del área de contacto, donde la tensión normal es cero y se produce corte puro de un valor igual a  $0.133p_0$  para un material con módulo  $\nu=0.3$  [3].

Para el caso de dos esferas en contacto las tensiones superficiales están dadas por las siguientes ecuaciones [3]:

$$\frac{\sigma_{rr}}{p_0} = \frac{1 - 2\nu}{3} \left(\frac{a^2}{r^2}\right) \left\{ 1 - \left(\frac{1 - r^2}{a^2}\right)^{3/2} \right\} - \left(\frac{1 - r^2}{a^2}\right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$\frac{\sigma_{\theta\theta}}{p_0} = -\frac{1 - 2\nu}{3} \left(\frac{a^2}{r^2}\right) \left\{ 1 - \left(\frac{1 - r^2}{a^2}\right)^{3/2} \right\} - 2\nu \left(\frac{1 - r^2}{a^2}\right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$\frac{\sigma_{zz}}{p_0} = -\frac{p(r)}{p_0} = -\left(\frac{1 - r^2}{a^2}\right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8 son ampliamente utilizadas y permiten calcular la distribución de tensiones en un contacto circular.

Como producto de la deformación elástica en torno al punto de contacto, existe una tensión de corte en la dirección ortogonal que tiene diferente signo a un lado y al otro del eje Z. El paso repetido de un elemento rodante, produce sobre un punto cualquiera por debajo de la superficie de rodadura, una tensión de corte alternativa que da origen a la falla por fatiga [4,5]. Sabemos que el mecanismo de degradación o daño de la microestructura y nucleación de la falla en la FCR, tiene que ver con el valor y ubicación de la tensión de corte. Sin embargo, no se ha demostrado aún cuál de las dos tensiones de corte es la principal responsable del daño sub-superficial. Se considera al corte alternativo como el más perjudicial, ya que si bien la tensión de corte alternativo es menor que la máxima tensión de corte en la dirección principal z ( $\tau_{alt} < \tau_1$ ), a los fines prácticos debe considerarse que el mismo varía desde  $-\tau_{alt}$  hasta  $+\tau_{alt}$  y en cambio para el corte en la dirección z, solo varía desde 0 hasta  $+\tau_1$ .

### 3.2 DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN EL CONTACTO “NO IDEAL”

Un elemento particularmente importante en la resistencia a la FCR, es el acabado de las superficies de rodadura [6,7]. Si bien en los cálculos de la presión Hertziana se obtiene un área que se llama “área aparente de contacto” ( $A_a$ ) o bien, “área de diseño”, es importante conocer el área real de contacto ( $A_r$ ), la cual es determinada por el contacto de las micro-asperezas generadas en las operaciones de maquinado. En general, el área real de contacto es mucho menor que el área aparente, con lo cual, la tensión de contacto aumenta más allá del valor calculado con Hertz, produciendo, en algunos casos, la plasticidad suficiente como para alcanzar la nucleación de fisuras y posterior aparición del picado. Una forma de caracterizar la rugosidad es mediante la rugosidad media aritmética o  $R_a$ , pero este valor no tiene en cuenta otras características geométricas importantes de la superficie. Algunos ejemplos de lo mencionado se puede observar en la Figura 3.6.

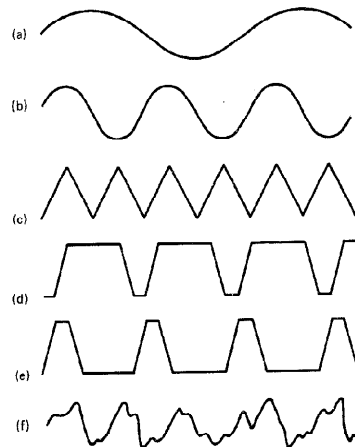


Figura 3.6: Diferentes perfiles de superficies con el mismo valor de  $R_a$  [1].

La influencia de la rugosidad de la superficie en contacto y la tensión sub-superficial es considerable cuando las superficies se comportan elásticamente [8]. Estudios demuestran esta influencia por medio de modelos computacionales de la presión de contacto y la tensión de Von Mises para un cilindro elástico rugoso y un cuerpo elástico suave. Un ejemplo de ello se puede observar en la Figura 3.7 donde la distribución de la presión de Hertz se ve perturbada considerablemente por la rugosidad de un cilindro con  $R_a = 0.44 \mu\text{m}$  [8]. La geometría de contacto genera presiones superficiales que son tres veces más altas que la presión calculada por Hertz.

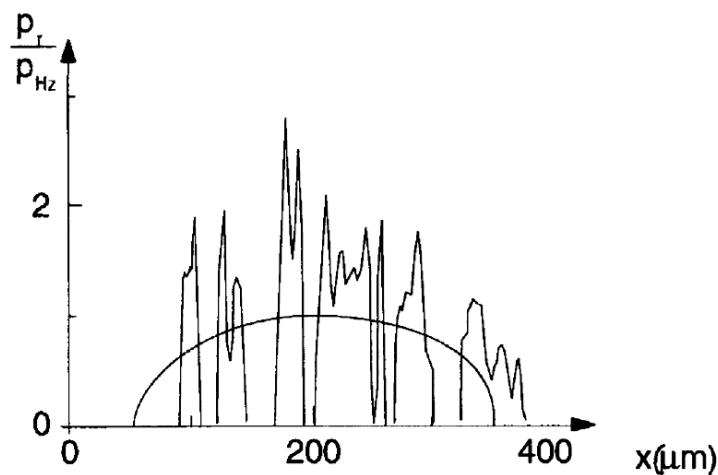
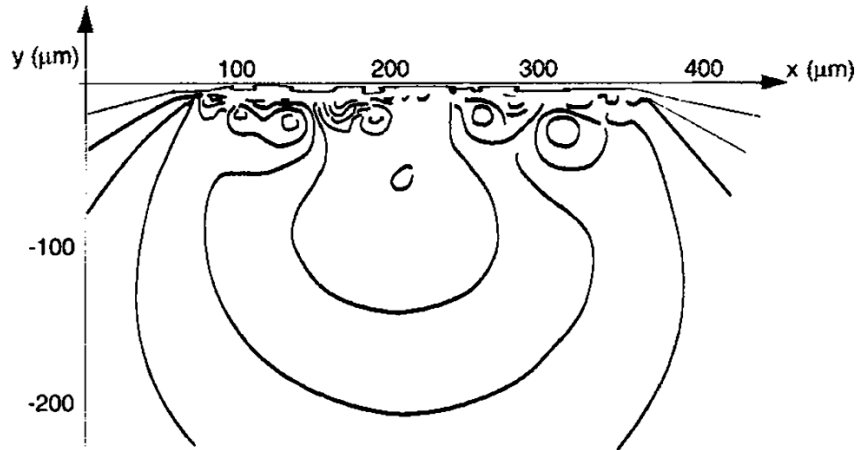


Figura 3.7: Distribución de presión de contacto para un cilindro y una superficie plana sin rugosidad (distribución hertziana) y con una rugosidad del cilindro  $R_a = 0.44 \mu\text{m}$  y  $P_z = 2.2 \text{ GPa}$  [8].

Conociendo la distribución de carga, se pueden calcular las tensiones de Von Mises [9]. La distribución de las tensiones de contacto del ejemplo anteriormente presentado, se pueden observar en la Figura 3.8 [8]. La rugosidad de la superficie genera perturbaciones en la tensión cercanas a las superficies de contacto sobre la zona de carga.



*Figura 3.8: Tensiones de contacto de Von Mises para una superficie plana y un cilindro con una rugosidad  $R_a = 0.44 \text{ mm}$  y  $p_H = 2.2 \text{ GPa}$  [8].*

En general, el contacto real entre elementos rodantes, está acompañado por algún grado de fricción o deslizamiento entre las superficies [1,10]. Una de las razones por las cuales existe deslizamiento tiene que ver con la deformación producida en la región de contacto. Existen mecanismos donde el responsable principalmente del deslizamiento son las geometrías de contacto, como es el caso de los engranajes, donde a medida que se aleja de la circunferencia primitiva, aumenta el deslizamiento. Para el caso de algunos rodamientos también existe un deslizamiento producto del spin de los elementos rodantes. La fricción afecta la distribución de tensiones en el contacto, haciendo que la máxima tensión de corte se aproxime a la superficie. La Figura 3.9 muestra el acercamiento de la tensión de corte máxima hacia la superficie con el incremento de la fricción. Asimismo, la Figura 3.10 muestra la distribución de tensiones para el caso de un coeficiente de fricción  $\mu = 0.2$ .

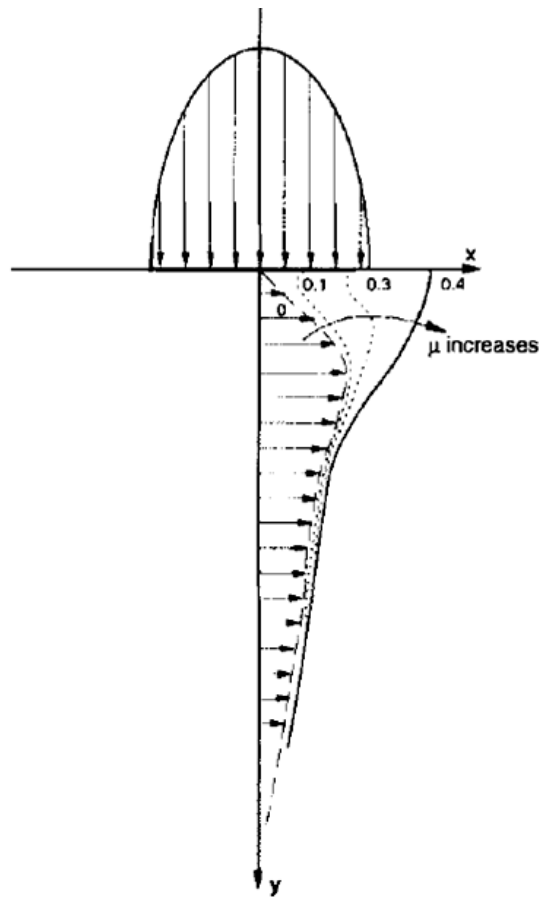


Figura 3.9: Movimiento de la distribución de la tensión de corte debido al incremento de los valores del coeficiente de fricción [11].

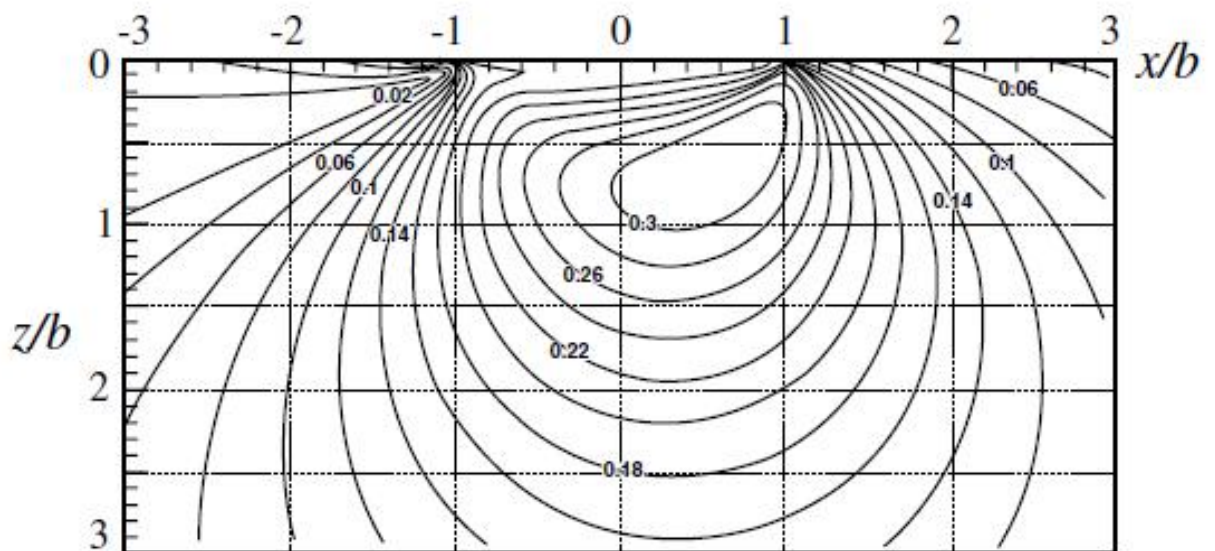


Figura 3.10: Distribución de la tensión de corte máxima en la dirección principal para el deslizamiento de dos cuerpos con  $\mu = 0.2$  [3].

Si además se suma que la fricción en contactos EHD es una de las responsables del aumento de temperatura, la misma juega un papel fundamental para el resultado de las tensiones de contacto por rodadura. El aumento de la temperatura incide directamente sobre el comportamiento del lubricante, si lo hubiese, disminuyendo su viscosidad. Esto afecta directamente sobre la película lubricante, disminuyéndola (disminución de parámetro Lambda).

Estudios realizados por C. Moyer[12] mostraron la influencia del parámetro Lambda sobre las tensiones de contacto mediante modelos de contacto numéricos. Para un caso realizado de una presión  $p_z=2300$  MPa y un contacto bajo una condición de servicio con buena lubricación ( $\lambda > 3$ ), la tensión de corte máxima resultó 620 MPa a 338  $\mu\text{m}$  de profundidad (0.78a). Mientras que para una condición de servicio donde existe contacto de las micro-asperezas ( $\lambda < 0.33$ ), la tensión de corte máxima resultante fue de 1480 MPa a 40  $\mu\text{m}$  de la superficie (0.09a) [12]. Se observa que no sólo se incrementa la tensión de corte máxima a más del doble, sino que también se desplaza hacia la superficie.

### 3.3 ROL DE LA LUBRICACIÓN EHD EN LA FATIGA DE CONTACTO

La película lubricante entre las superficies de rodadura puede describirse con ayuda de la teoría de la lubricación elasto-hidrodinámica (lubricación EHD) ya descrita en el Capítulo 2. Como se vio, la lubricación afecta de manera notable la vida de los elementos sometidos a rodadura, por lo tanto es importante conocer las variables que afectan a la película lubricante. Durante muchos años se pensó que el contacto por rodadura estaba acompañado por la interacción de las superficies. Sin embargo, los estudios realizados mostraron que los elementos en movimiento relativo se encuentran separados por una película lubricante de muy pequeño espesor. Uno de los primeros estudios para obtener un modelo teórico del espesor de película lubricante fue desarrollado por Hamrock y Dowson en 1977 [13]. La Figura 3.11 muestra la distribución de presión generada en un contacto EHD, sumado al perfil del espesor de película lubricante. También se representa la deformación elástica producida en la superficie de contacto.



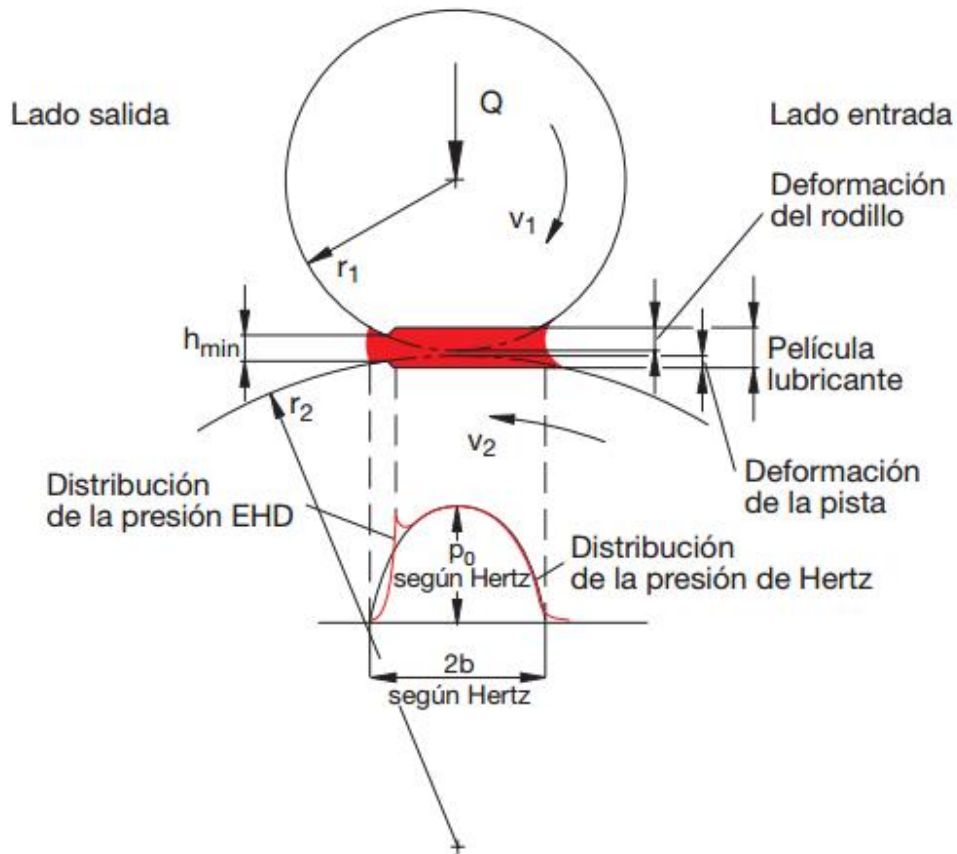


Figura 3.11 Distribución del espesor de la película lubricante y la presión de contacto en la lubricación EHD [14].

Los estudios teórico-experimentales desarrollados por Hamrock y Dowson permiten un cálculo aproximado del espesor de película lubricante (ver Ecuaciones 3.9 y 3.10). Básicamente las ecuaciones dependen de tres variables generales  $U$  (Parámetro de velocidad),  $G$  (Parámetro del material) y  $W$  (Parámetro de carga).

- Contacto puntual según Hamrock y Dowson [13]:

$$h_{min}[m] = 3.63 U^{0.68} G^{0.49} W^{-0.73} (1 - e^{-0.68 x k}) R_r \text{ Ecuación 3.9}$$

- Contacto lineal según Dowson [13]:

$$h_{min}[m] = 2.65 U^{0.7} G^{0.54} W'^{-0.13} R_r \text{ Ecuación 3.10}$$

Con:

$$U = \eta_0 v / (E' R_r)$$

$$G = \alpha E' \text{ (Parámetro adimensional del material)}$$

$$W = Q / (E' R_r^2) \text{ para contacto puntual}$$

$$W' = Q / (E' R_r L) \text{ para contacto lineal}$$

donde:

$h_{\min}$  [m]      Espesor mínimo de la película lubricante en el contacto de rodadura

$U$                       Parámetro de velocidad

$G$                       Parámetro del material

$W$                       Parámetro de la carga habiendo contacto puntual

$W'$                     Parámetro de la carga habiendo contacto lineal

$e$                        $e = 2.71828\dots$ , base de los logaritmos naturales

$k$                        $k = a/b$ , razón de los semiejes de las superficies de presión

$\alpha$                     [ $\text{m}^2/\text{N}$ ] Coeficiente de presión-viscosidad

$\eta_0$                     [ $\text{Pa s}$ ] Viscosidad dinámica  $v$  [m/s]

$v$  [m/s]  $v = (v_1 + v_2)/2$ , velocidad media de rodadura

$v_1$  = velocidad del cuerpo rodante

$v_2$  = velocidad en el contacto interior o exterior

$E'$  [N/m<sup>2</sup>]       $E' = E/[1 - (\nu)^2]$ , módulo de elasticidad efectivo

$E$  = módulo de elasticidad =  $2.08 \times 10^{11}$  [N/m<sup>2</sup>] para acero

$\nu$  = Constante de Poisson = 0.3 para acero

$R_r$  [m] Radio reducido de curvatura

$R_r = r_1 \cdot r_2 / (r_1 + r_2)$  para contacto interior

$R_r = r_1 \cdot r_2 / (r_1 - r_2)$  para contacto exterior

$r_1$  = radio del cuerpo rodante [m]

$r_2$  = radio del camino de rodadura interior o exterior [m]

$Q$  [N] Carga sobre el cuerpo rodante

$L$  [m] Longitud del intersticio, es decir, longitud efectiva del rodillo

Las ecuaciones muestran la gran influencia de la velocidad de rodadura  $v$ , de la viscosidad dinámica  $\eta_0$  y del coeficiente de presión-viscosidad  $\alpha$  sobre el espesor de película lubricante.

La carga  $Q$  tiene poca influencia. Esto es debido a que, al aumentar la carga aumenta la viscosidad y que las superficies de contacto se hacen mayores debido a las deformaciones elásticas.

El comportamiento presión-viscosidad de algunos lubricantes se muestra en la Figura 3.10 donde se presenta el coeficiente en función de la viscosidad de los lubricantes más conocidos.

- |     |                        |      |                         |
|-----|------------------------|------|-------------------------|
| a-b | Aceites minerales      | h    | Hidrocarburos fluorados |
| e   | Diésteres              | i    | Poliglicoles            |
| g   | Triarilofosfatoésteres | k, l | Siliconas               |

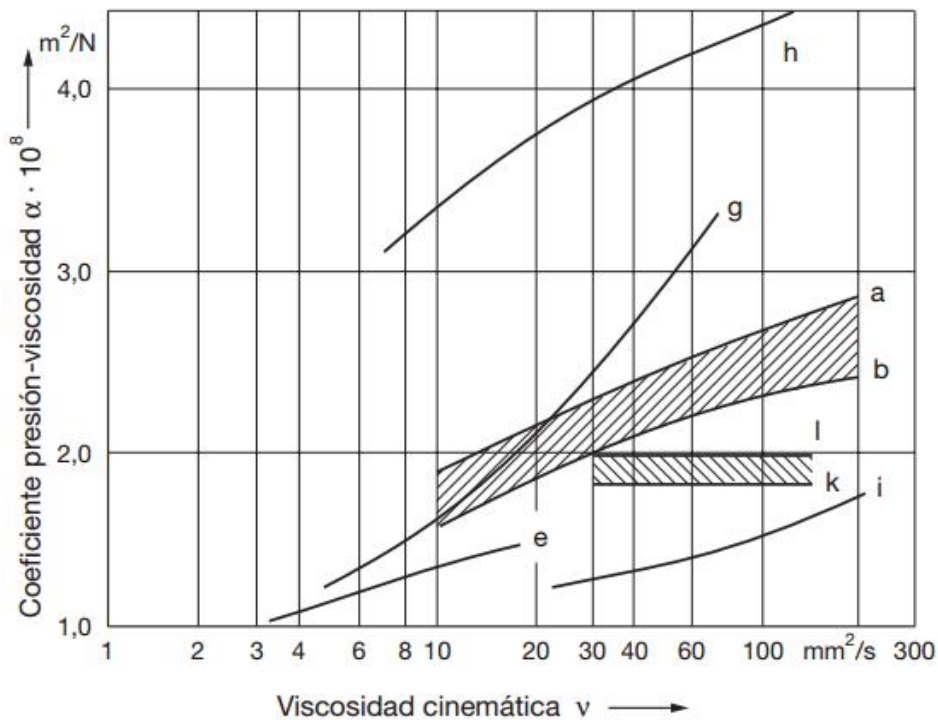


Figura 3.12: Coeficiente presión-viscosidad en función de la viscosidad cinemática para distintos aceites [12].

En la actualidad existe un gran número de soluciones para el cálculo del espesor de película lubricante, y además considerando que algunas son aproximaciones, la mayoría son apropiadas para fines prácticos. En esta tesis se presenta la teoría termo-elastohidrodinámica, en la cual se combinan las ecuaciones de la teoría elasto-hidrodinámica con las teorías de distribución de energía con el fin de tener una mejor aproximación del espesor de película lubricante en función de las temperaturas generadas por la interacción de las superficies con el fluido (Capítulo 7).

### 3.4 MODOS DE FALLA EN FATIGA DE CONTACTO POR RODADURA

Los elementos mecánicos sometidos a fatiga de contacto, pueden desarrollar tres tipos de falla dependiendo de la calidad de los materiales empleados y los parámetros operativos:

#### 3.4.1 *Falla sub-superficial temprana*

Cuando la sollicitación (carga, velocidad, temperatura) se encuentra en niveles moderados se promueve el funcionamiento en condiciones ideales, es decir, con separación completa de las superficies, y por efecto de la lubricación elasto-hidrodinámica, sin contacto entre las superficies. Debido a que el estado de tensiones más desfavorable se encuentra, por debajo de la superficie y puede actuar sobre las discontinuidades metalúrgicas (inclusiones) presentes en esta región, produciendo la nucleación sub-superficial y posterior propagación de una fisura. Esta avanza hasta que se provoca la fractura y el desprendimiento de una partícula, formándose un cráter o “spall” [1,15].

#### 3.4.2 *Falla Sub-Superficial Tardía*

Los procesos modernos de fabricación han disminuido la cantidad y el tamaño de inclusiones permitiendo controlar la falla del tipo sub-superficial temprano. Esto da origen a un nuevo tipo de falla, denominado sub-superficial tardía. Este tipo de falla se debe a alteraciones micro-estructurales de los aceros, luego de períodos prolongados de servicio, conocidas como “efectos de ataque químico” [16].

#### 3.4.3 *Falla Superficial Temprana*

Esta falla es muy común en la actualidad cuando se requiere una mayor eficiencia de la maquinaria, lograda a través de un incremento de la potencia específica transmitida. Esto significa, mayor carga, velocidad y temperatura entre los cuerpos que ruedan y/o deslizan, haciendo que la película de aceite se vuelva más fina, llegando a producir su colapso y, por lo tanto, el contacto de las micro-asperezas superficiales. De hecho, no sólo las micro asperezas entran en contacto, sino también las partículas en suspensión en el aceite pueden quedar atrapadas en el reducido huelgo entre las superficies (ver Fig.3.13). Estas partículas pueden rayar, indentar o quedar embebidas en la superficie, generando discontinuidades que se convierten en un lugar propicio para la nucleación de la falla según el modo superficial temprano.

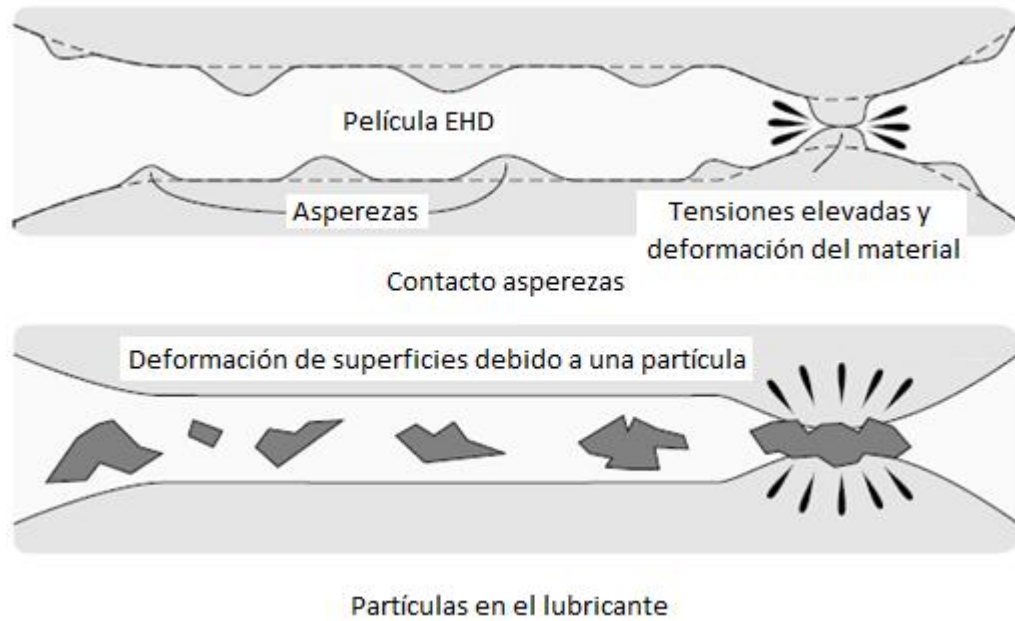


Figura 3.13: Contacto entre las asperezas superficiales (Sup.) y por causa de partículas en el aceite produciendo la nucleación de daño por FCR (Inf.). Adaptado de [3].

### 3.5 EFECTO DEL LUBRICANTE EN LA FATIGA DE CONTACTO

Como ya se ha mencionado, la lubricación tiene un rol crítico en la naturaleza del desgaste y la fatiga de contacto por rodadura. Además de separar las superficies en contacto, el lubricante, con sus aditivos, puede influir sobre el desgaste y la fatiga en contactos de rodadura. Películas elasto-hidrodinámicas (EHL) modifican la presión Hertziana y la distribución de las tensiones de tracción. También la fatiga de contacto se ve influenciada por el número y la severidad de las interacciones entre las asperezas y como éstas afectan a los concentradores de tensiones en la región de los defectos superficiales [17]. Sin embargo la pregunta que se genera es si la película EHL es totalmente beneficiosa en la prevención de la fatiga de contacto o si exhibe algunas limitaciones. Una de las razones de esta duda puede ser a causa del pico que se genera en la distribución de presión por película EHD, el cual genera presiones de contacto puntuales mucho mayores que las máximas propuesta por la teoría de Hertz, en algunas condiciones (ver Fig. 3.14). De hecho, existe mucha especulación sobre si este pico de presión no induce fatiga de contacto y reduce la vida de rodamientos [18]. El papel de la micro película EHL generada en el contacto entre asperezas y su efecto de disminución o, a veces, de aceleración de la fatiga de contacto, es otro aspecto que todavía es

poco conocido. Por otra parte, el rol del lubricante sobre el crecimiento de fisuras abiertas es otro aspecto con muchos interrogantes.

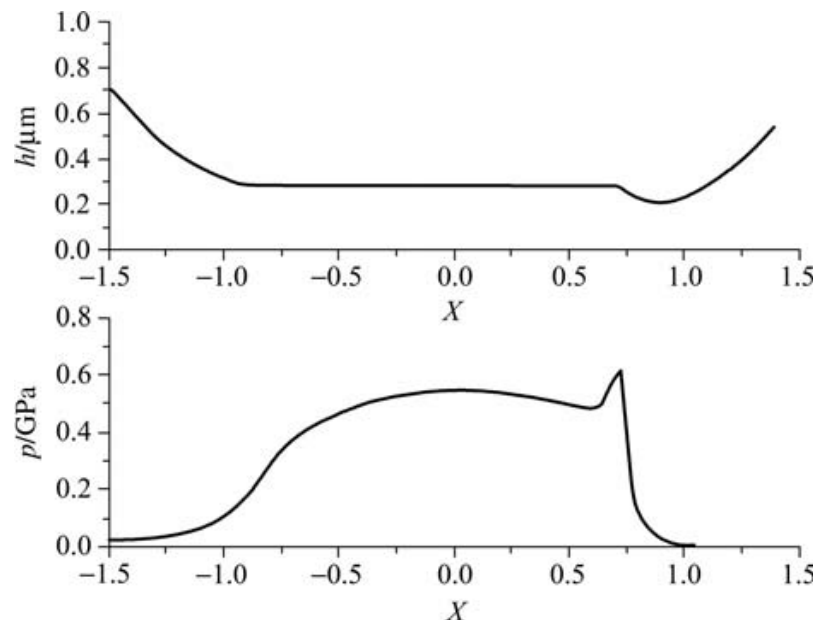
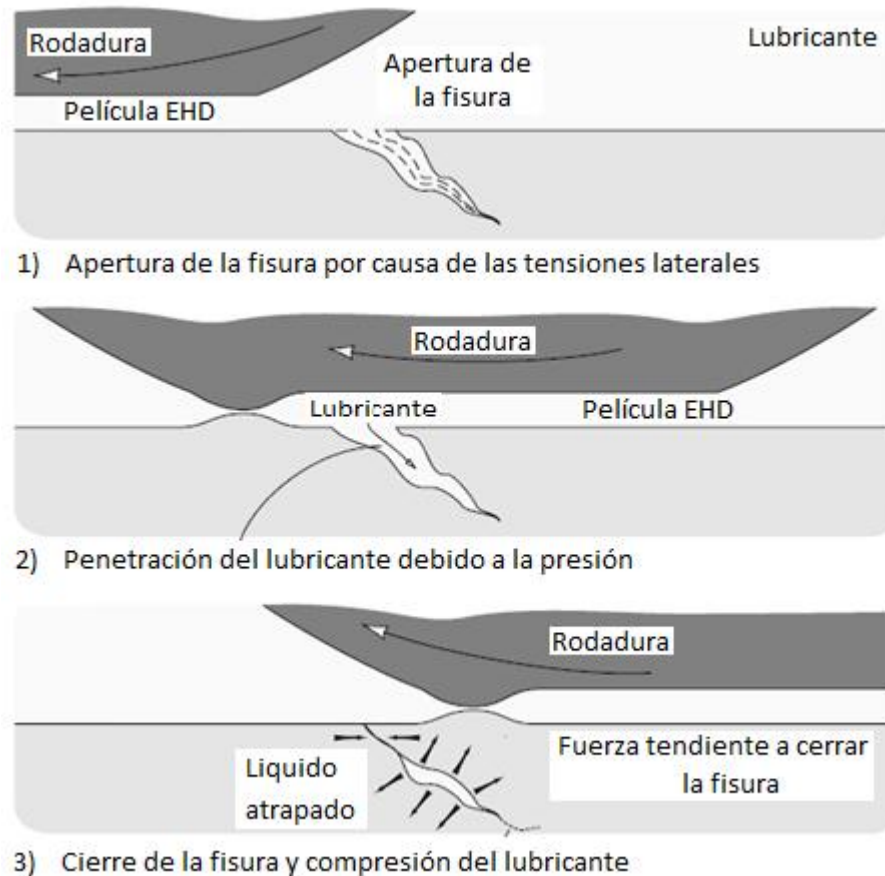


Figura 3.14: Simulación del espesor de película lubricante y presión de contacto para una lubricación con grasa (Velocidad 0,87 m/s y carga 100 KN) [19].

El crecimiento de fisuras superficiales abiertas puede verse incrementado por un mecanismo llamado "propagación de fisuras por presión hidráulica". Una ilustración de lo mencionado puede verse en la Figura 3.15. Como se observa, el proceso puede dividirse en 3 etapas. En la primera etapa se observa que la acción de la presión de contacto tiende a abrir la fisura, logrando el llenado de la misma, en la etapa siguiente. Por último, y a causa de la presión de contacto sobre la grieta, se produce el cierre de la fisura con líquido en su interior provocando una presión hidráulica que incrementa las tensiones en la punta de la fisura [20]. Este mecanismo es generalmente aceptado, pero existen aún muchos interrogantes sobre la penetración del fluido dentro de la fisura, y el rol del mismo sobre la apertura y cierre de la misma.



*Figura 3.15: Ilustración esquemática del mecanismo de presión hidráulica en las superficies de la fisura [3].*

La influencia de la presencia de líquido en la propagación de grietas abiertas durante el proceso de fatiga de contacto es un tema de gran interés. La mayoría de los estudios que involucran simulación computacional sobre este proceso suponen que el líquido entra en la grieta durante la primera parte del ciclo de carga, en el que la grieta se abre. La posibilidad de la presencia de líquido en el interior de las grietas y el importante papel de este líquido en la propagación de las mismas es comúnmente estudiado en elementos como cojinetes, engranajes y rieles [21 - 24]. En general, se ha observado que el complejo estado de la carga que actúa en la zona de contacto induce la propagación de grietas a lo largo de trayectorias curvilíneas. Las grietas son generadas por defectos en la superficie que normalmente crecen en un ángulo de poca profundidad a la dirección de desplazamiento [25]. Una fisura o un número de fisuras, que crecen, dependiendo de las condiciones de servicio, forman diferentes tipos de daños en los caminos de rodadura superficiales del cuerpo de rodadura. Estos daños

causan a menudo el crecimiento de las principales fisuras, lo que conduce a la fractura del cuerpo.

El papel del líquido en la propagación de grietas por FRC se ha considerado y analizado mayormente mediante modelos teóricos, los cuales engloban principalmente cuatro mecanismos. Dos de ellos, el modelo de la "presión hidráulica" y la "reducción de la fricción" discutidos por Bower [24], Bogdanski [26] y otros autores [23,27,28], enuncian que los criterios de máxima tensión tangencial en la dirección de propagación de la fisura se modifican a causa de la influencia de la presión interna a lo largo de las superficies de la fisura debido al líquido atrapado, como así también existe un cambio en la densidad de energía de deformación. Las fuerzas de fricción entre ambas caras de la grieta y las superficies de contacto por rodadura también se modificaron en esos mecanismos. El tercer mecanismo, llamado "fluido atrapado", también ha sido discutido por Bower [24], así como Kaneta y colaboradores [27-29] y otros autores [30-32]. En este caso, el proceso de "atrapado" proporciona altos niveles de KI (factor de intensidad de tensiones en modo I) debido a la presión hidráulica que tiende a abrir la grieta cuando el elemento rodante pasa por la superficie de la fisura. Estos tres mecanismos son bastante restringidos a los fenómenos cuasi-estáticos. El cuarto modelo, considera la "compresión" de la capa de fluido, y además incluye algunos efectos transitorios que tienen lugar dentro de la grieta. Este mecanismo fue propuesto por Bogdanski [33,34].

Los avances en la predicción de la propagación de las grietas abiertas durante el proceso de FRC son importantes y muy relevantes, y hasta el momento existen muy pocos estudios experimentales que analicen el comportamiento del líquido bajo condiciones diferentes [21-23]. Aún así, todavía hay muchas incertidumbres y comportamientos que deben ser verificados y entendidos. Con esto en mente, en esta tesis doctoral se desarrolló un método para la preparación de muestras pre-fisuradas, para luego ser utilizadas en ensayos experimentales de rodadura de contacto bajo condiciones de laboratorio totalmente controladas. Además, se elabora un procedimiento para la creación de superficies fisuradas a diferentes ángulos para estudios de FRC. Las muestras preparadas con este método son luego utilizadas en el estudio de la penetración de diferentes líquidos en condiciones de rodadura de contacto bajo diferentes condiciones dinámicas.

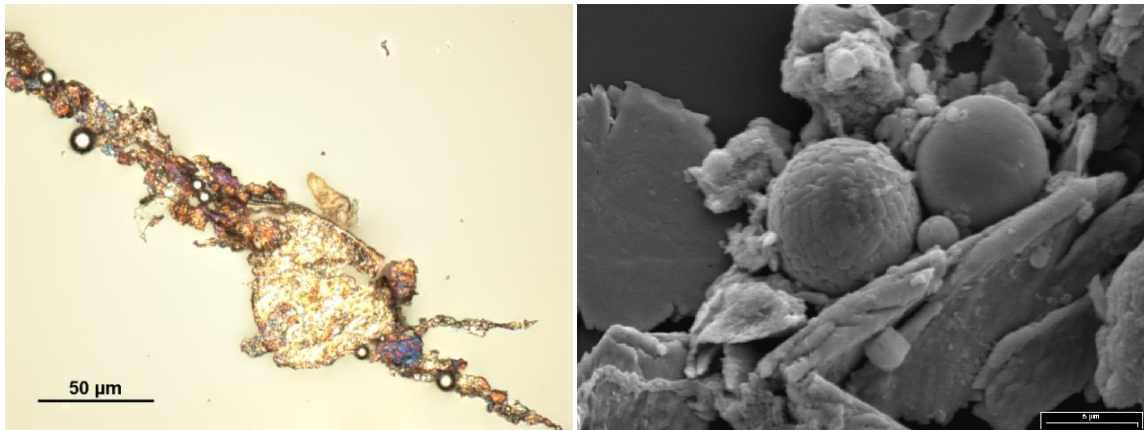


### 3.6 GENERACIÓN DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS DE DESGASTE POR RODADURA

El monitoreo periódico de lubricantes de maquinarias, es empleado para detectar cambios de tendencias y prevenir fallas catastróficas [35,36]. En este sentido, la presencia de partículas de desgaste en un lubricante pueden ser reveladas mediante técnicas ferrográficas y analizadas a través de microscopía óptica y electrónica [37,38]. Además, sus elementos composicionales pueden ser determinados mediante un microanálisis químico puntual (EDS). En particular, la experiencia tribológica empírica ha llevado a considerar la presencia de partículas esféricas de diámetro menor a 10-12  $\mu\text{m}$ , como un indicio característico de daño de superficies por fatiga por rodadura de contacto, como asítambiélnla existencia de partículas planas de gran tamaño, que son características de descascarillado de la superficie. De hecho, la detección de las mismas es muy importante para el diagnóstico prematuro de fallas en equipos con componentes sometidos a rodadura de contacto. Sin embargo, existen importantes discrepancias en la bibliografía en cuanto a la composición de partículas esféricas generadas durante el contacto por rodadura.

La identificación de los elementos composicionales de las partículas empleando ferrografía con EDS resulta vital en la determinación de los mecanismos operativos en sistemas que poseen múltiples componentes. Un ejemplo de esto son las grandes cajas reductoras de baja velocidad, las cuales disponen de varios rodamientos, diversas etapas de engrane y, en ciertos equipos, incluso cojinetes de fricción. Así, identificar el origen y el mecanismo operativo, cuando se detecta un cambio de tendencia en el nivel de desgaste, resulta de significativa importancia para reducir los tiempos de paradas y, prevenir fallas catastróficas de componentes.

La figura 3.16 muestra imágenes de un ferrograma de una caja reductora de 200 HP. En la misma se detectó una gran cantidad de partículas esféricas menor a 10-12  $\mu\text{m}$ , las cuales eran causadas por una falla por FCR en uno de los rodamientos.



*Figura 3.16: Imágenes de ferrograma obtenidas en microscopio óptico (izq., 200x) y microscopio electrónico (der., 6000x) con partículas esféricas de caja reductora 200 HP de potencia.*

Si bien las partículas esféricas han sido un tema que ha recibido mucha atención por investigadores en el campo de la tribología, el proceso físico de formación de las mismas tiene algunos interrogantes. Por ejemplo, algunas observaciones de estas partículas han sido asociadas con fallas en rodamientos de turbinas de gas [36,39] y por lo tanto se ha asociado a las mismas con el interior de las fisuras producidas por fatiga de contacto en rodamientos [40-42]. Por otro lado, tiempo atrás se encontró que pueden generarse partículas esféricas durante varios procesos tribológicos [36-56] y, por lo tanto, un gran número de hipótesis han sido planteadas a este respecto. En tal sentido, una teoría postula que la formación de partículas esféricas es el resultado de una interacción del lubricante con las superficies de las fisuras durante el período de apertura y cierre [43] o por causa de la alta energía producto de la cavitación en el interior de las fisuras [44]. Por otra parte, otros autores, han asociado la generación de las mismas con el producto de las uniones entre crestas superficiales alcanzando la soldadura, los cuales se desarrollan en la superficie de contacto, como resultado de las altas temperaturas durante el deslizamiento [45-48] sumado a las observaciones de otros autores en procesos de rectificado [49,50]. Una tercera teoría enuncia que se generan por el rolado de partículas planas de desgaste que quedan atrapadas entre las superficies de contacto [51], mientras que una cuarta teoría está relacionada con los mecanismos sub-superficiales mediante el rolado dinámico y sistemático de óxidos entre las caras de las fisuras abiertas [52]. Un concepto similar fue sugerido por otro autor, al considerar que las esferas se producen por el redondeado y pulido de partículas de desgaste adhesivo [53,54] o también en procesos de fretting [55,56].

Si bien, todas las propuestas pueden ser correctas en diferentes situaciones, parece poco probable que muchas causas diferentes puedan producir el mismo efecto. En la presente tesis doctoral, se estudian partículas esféricas generadas durante diferentes etapas de desgaste mediante ensayos tribológicos de rodadura de contacto, analizando su tamaño, forma y elementos composicionales presentes mediante EDS. Además se relacionan con el estado morfológico de la superficie y la degradación del lubricante.

### 3.7 REFERENCIAS

- [1] Blau, P. J. (1992). ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology. vol. 18. USA: ASM International Handbook Committee.
- [2] Hertz, H. (1986). *Miscellaneous Papers on the Contact of Elastic Solids*. Translation by Jones, De Millan.
- [3] Bhushan, B. (2000). *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*. Crc Press.
- [4] Lundberg, G. and Palmgren, A. (1947) Dynamic Capacity of Rolling Bearings. *Acta Polytechnica Mechanical Engineering Series*, Vol. 1, No. 3, Stockholm, Sweden.
- [5] Lundberg, G. and Palmgren, A., (1952) Dynamic Capacity of Rolling Bearings. *Acta Polytechnica Mechanical Engineering Series*, Vol. 2, No. 4, Stockholm, Sweden.
- [6] Handbook, A. S. M. (1992). ASM international. Materials Park, OH, 3, 1-23.
- [7] Merritt, H. E. (1971). *Gear engineering*. John Wiley and Sons.
- [8] Sainsot, P., Leroy, J. M. and Villechaise, B. (1990). Effect of surface coatings in a rough normally loaded contact. *Mechanics of coatings*, 151-156.
- [9] Holmberg, K., Ronkainen, H., and Matthews, A. (2000). Tribology of thin coatings. *Ceramics International*, 26(7), 787-795.
- [10] Holmberg, K., & Mathews, A. (1994). Coatings tribology: a concept, critical aspects and future directions. *Thin Solid Films*, 253(1), 173-178.
- [11] Schouten, M. J. W. (1973). *The Influence of an Elastohydrodynamic Lubrication on Friction, Wear and Durability of Gears* (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, Technical University of Eindhoven, Eindhoven, Netherlands (in German)).
- [12] Moyer, C. A. (1991, April). The Status and Future of Roller Bearing Life Prediction. In *Proceedings of the International Industrial Tribology Symposium at Northwestern University* (Aug 1990), STLE Special Publication SP-31, *Advances in Engineering Tribology*, Y. Chung and HS Cheng, Ed (pp. 89-99).
- [13] Hamrock, B. J., and Dowson, D. (1977). Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts: Part III—fully flooded results. *Journal of Tribology*, 99(2), 264-275.
- [14] *Lubricación de rodamientos*, Publ.-No. WL 81 115/4 SB, FAG Sales Europe Iberia, Ed TECFA@GROUP – España (1997)
- [15] Holmberg, K., Matthews, A., & Ronkainen, H. (1998). Coatings tribology—contact mechanisms and surface design. *Tribology International*, 31(1), 107-120.
- [16] Swahn, H. P. C. O., Becker, P. C., and Vingsbo, O. (1976). Martensite decay during rolling contact fatigue in ball bearings. *Metallurgical transactions A*, 7(8), 1099-1110.
- [17] Tallian, T. E. (1978, September). Elastohydrodynamic effects in rolling contact fatigue. In *Proceedings of the 5th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, D. Dowson, CM Taylor, M. Godet, and D. Berthe, eds., Elsevier, London (pp. 253-281).

- [18] Houpert, L. D. S. J. C., Ioannides, E., Kuypers, J. C., and Tripp, J. (1987). The effect of the EHD pressure spike on rolling bearing fatigue. *Journal of tribology*, 109(3), 444-450.
- [19] Huang, P. (2013). *Numerical Calculation of Lubrication: Methods and Programs*. John Wiley and Sons.
- [20] Kaneta, M., and Murakami, Y. (1987). Effects of oil hydraulic pressure on surface crack growth in rolling/sliding contact. *Tribology international*, 20(4), 210-217.
- [21] Bogdański, S., Lewicki, P., and Szymaniak, M. (2005). Experimental and theoretical investigation of the phenomenon of filling the RCF crack with liquid. *Wear*, 258(7), 1280-1287.
- [22] Fletcher, D. I., Hyde, P., and Kapoor, A. (2007). Investigating fluid penetration of rolling contact fatigue cracks in rails using a newly developed full-scale test facility. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(1), 35-44.
- [23] Kaneta M., Murakami Y. (1987), Effects of oil hydraulic pressure on surface crack growth in rolling/sliding contact, *Tribol. Int.* 20, 210–217.
- [24] Bower F. (1988), The influence of crack face friction and trapped fluid on surface initiated rolling contact fatigue cracks, *J. Tribol. ASME* 110, 704–711.
- [25] Johnson, K. L. (1966). A review of the theory of rolling contact stresses. *Wear*, 9(1), 4-19.
- [26] Bogdański, S. (1997). Finite element modelling of surface fatigue crack in EHD contact. *Tribology Series*, 32, 325-336.
- [27] Kaneta M., Yatsuzuka H., Murakami Y., (1985) Mechanism of crack growth in lubricated rolling/sliding contact, *ASLE Trans.* 28 407–414.
- [28] Kaneta M., Murakami Y., (1991) Propagation of semi-elliptical surface cracks in lubricated rolling/sliding elliptical contacts, *J. Tribol. ASME* 113, 270–275.
- [29] Kaneta M., Matsuda K., Murakami K., Nashikawa H., (1998) A possible mechanism for rail dark spot defects, *J. Tribol., Trans. ASME* 120 304–309.
- [30] Cannon D.F., Pradier H., (1996) Rail rolling contact fatigue research by the European Rail Research Institute, *Wear* 191 1–13.
- [31] Bogdański, S., Stupnicki, J., Brown, M. W., & Cannon, D. F. (1999). A two dimensional analysis of mixed-mode rolling contact fatigue crack growth in rails. *European Structural Integrity Society*, 25, 235-248.
- [32] Bogdański S., Brown W., (2002) Modelling the three dimensional behaviour of shallow rolling contact fatigue cracks in rails, *Wear* 253 (1/2) 17–25.
- [33] Bogdański S., (1997) The behaviour of surface breaking contact fatigue crack in EHL conditions, in: *Proceedings of the Fifth Conference on Bi/Multi axial Fatigue and Fracture*, vol. II, Cracow, September 8, , pp. 9–28.
- [34] Bogdański S., (2002) A rolling contact fatigue crack driven by squeeze fluid film, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 25 1061–1071.
- [35] Anderson D., (1982). "Wear Particle Atlas (Revised)". Report NAEC. Naval Air Engineering Center, Advanced Technology Office, Support Equipment Engineering Department 92-163.
- [36] Scott, D. (1975). Debris examination—a prognostic approach to failure prevention. *Wear*, 34(1), 15-22.
- [37] Seifert, W. W., and Westcott, V. C. (1972). A method for the study of wear particles in lubricating oil. *Wear*, 21(1), 27-42.
- [38] Westcott, V., and Seifert, W. W. (1973). Investigation of iron content of lubricating oil using a ferrograph and an emission spectrometer. *Wear*, 23(2), 239-249.
- [39] Scott, D., and Mills, G. H. (1970). A scanning electron microscope study of fracture phenomena associated with rolling contact surface fatigue failure. *Wear*, 16(3), 234-237.
- [40] Middleton, J. L., Westcott, V., and Wright, R. W. (1974). The number of spherical particles emitted by propagating fatigue cracks in rolling bearings. *Wear*, 30(2), 275-277.

- [41] Scott, D., and Mills, G. H. (1973). Spherical debris—its occurrence, formation and significance in rolling contact fatigue. *Wear*, 24(2), 235-242.
- [42] Loy, B., and McCallum, R. (1973). Mode of formation of spherical particles in rolling contact fatigue. *Wear*, 24(2), 219-228.
- [43] Scott, D., and Mills, G. H. (1970). A scanning electron microscope study of fracture phenomena associated with rolling contact surface fatigue failure. *Wear*, 16(3), 234-237.
- [44] Doroff, S. W., Miller, R. S., Thiruvengadam, A. P., and Westcott, V. C. (1974). Spheroidal particles produced by cavitation erosion. *Nature* 247, 363 - 364
- [45] Broszeit, E., and Hess, F. J. (1971). Diskussion zu "A scanning electron microscope study of fracture phenomena associated with rolling contact surface fatigue failure". *Wear*, 17(4), 314-315.
- [46] Jones, W. R. (1976). Spherical artifacts on ferrograms. *Wear*, 37(1), 193-195.
- [47] Hack, K., and Fellar, H. G. (1970). Friction and wear characteristics of gold single crystals subjected to low-pressure sliding contact. *Z metallkunde*, 61(5), 394-400.
- [48] Swain, M. V., and Jackson, R. E. (1976). Wear-like features on natural fault surfaces. *Wear*, 37(1), 63-68.
- [49] Stowers, I. F., and Rabinowicz, E. (1972). Spherical particles formed in the fretting of silver. *Journal of Applied Physics*, 43(5), 2485-2487.
- [50] Hurricks, P. L. (1974). The occurrence of spherical particles in fretting wear. *Wear*, 27(3), 319-328.
- [51] Scott, D., and Mills, G. H. (1973). Spherical debris—its occurrence, formation and significance in rolling contact fatigue. *Wear*, 24(2), 235-242.
- [52] Loy, B., and McCallum, R. (1973). Mode of formation of spherical particles in rolling contact fatigue. *Wear*, 24(2), 219-228.
- [53] Christensen, C. (1979). On the origin of spherical particles found on fatigue fracture surfaces and ferrograms. *Wear*, 53(1), 189-193.
- [54] R. Komanduri and M. C. Shaw, "Formation of spherical particles in grinding", *Philos. Mag.*, 32 (1975) 711 - 724.
- [55] Stowers, I. F., and Rabinowicz, E. (1972). Spherical particles formed in the fretting of silver. *Journal of Applied Physics*, 43(5), 2485-2487.
- [56] Hurricks, P. L. (1974). The occurrence of spherical particles in fretting wear. *Wear*, 27(3), 319-328.

# Capítulo 4

## *Materiales y métodos*

---

En este capítulo se describen en detalle los materiales de las probetas, elementos rodantes y lubricantes utilizados, además de todo el equipamiento utilizado para la caracterización física y química de los mismos en el desarrollo de la tesis.

### 4.1 MATERIALES USADOS EN ENSAYOS DE CONTACTO LINEAL

#### 4.1.1 *Pistas y elemento rodante*

Las piezas usadas en ensayos de contacto lineal se fabricaron básicamente sobre la base de dos materiales diferentes, ya que el acero proveniente de las vías de ferrocarril fue finalmente descartado, como se comentará más adelante.

- ***Rueda:*** *Acero AISI 4140*
- ***Pista de rodadura:***
  - *Acero AISI 4140*
  - *Aleación CAMPLO 2005 T3 (aleación de base aluminio)*
  - *Acero de vías de ferrocarril nacionales (Riel U50) [descartado]*

El material utilizado como elemento rodante es único, ya que el mismo sólo participa realizando la aplicación de carga.

La Tabla 4.1 muestra la composición química de los aceros utilizados en los ensayos, determinada mediante análisis espectrométrico. Por otro lado, la composición química de la aleación CAMPLO 2005 T3 (la sigla T3 corresponde al tratamiento térmico de la aleación) no

se pudo determinar mediante este análisis, por lo que la Tabla 4.2 muestra los límites de su composición según la detalla el fabricante.

En cuanto al acero proveniente de vías de ferrocarril, U50, el análisis espectrométrico permitió detectar un alto contenido de azufre. Esto lo convierte en un material no favorable para los estudios ya que la alta concentración de inclusiones de azufre conduce a un crecimiento de fisuras de forma heterogénea, agregando una variable adicional a los ensayos.

Tabla 4.1: Composición química nominal de los aceros usados en contacto lineal.

Material	Elemento (peso %)									
	C%	Cr%	Mn%	Si%	Mo%	Al%	W%	P%	S%	Fe%
Riel U50	0.57	0.063	0.86	0.273	-	0.026	0.056	0.065	0.04	Bal
AISI 4140	0.42	1	0.87	0.29	0.21	-	-	0.023	0.0085	Bal

C: carbono; Cr: cromo; Mn: manganeso; Si: silicio; Al: aluminio; W: wolframio; P: fósforo; S: azufre

Tabla 4.2: Composición química de la aleación de aluminio 2005 T3.

Material	Elemento (peso %)											
		Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ti%	Bi%	Pb%	Al%
CAMPLO 2005 T3	Min.	0.1	0.1	3.5	0.1	0.2					1	Bal
	Máx.	0.8	0.8	5	0.8	1	0.1	0.3	0.2	0.2	2	Bal

Fe: hierro; Cu: cobre; Mg: magnesio; Zn: zinc; Ti: titanio; Bi: Bismuto; Pb: plomo

La Figura 4.1 presenta una imagen obtenida por microscopía óptica de este material en la que se observa una gran concentración de puntos negros, los cuales, al ser examinados mediante la técnica EDS, denotan la presencia de sulfuros dispersos en el metal. Por otro lado, la Figura 4.2 presenta una imagen de microscopía electrónica, acompañada con uno de los espectros EDS realizado sobre la zona señalada. Las metalografías realizadas mostraron la gran cantidad de sulfuros dispersos sobre todas las áreas del acero (ataque con ácido nítrico “nital”) [1].



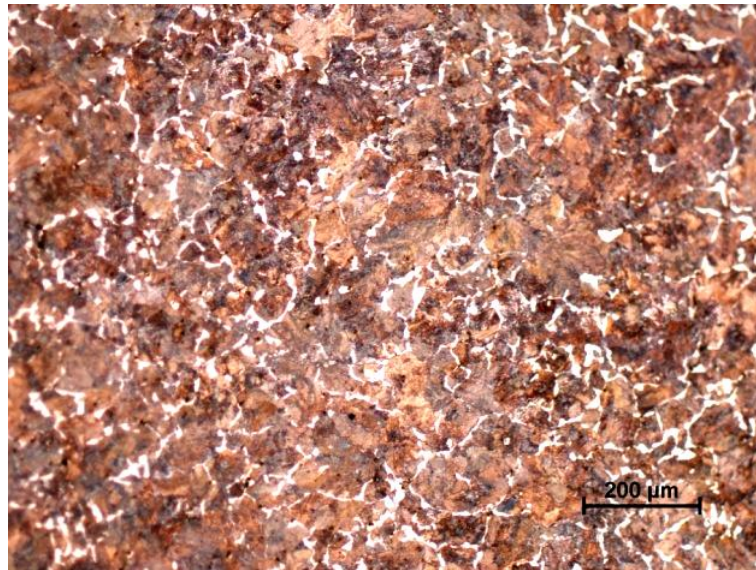


Figura 4.1: Imagen de microscopio óptico (100x) donde se observa ferrita aliotromorfa y perlita además de la gran cantidad de sulfuros (puntos negros).

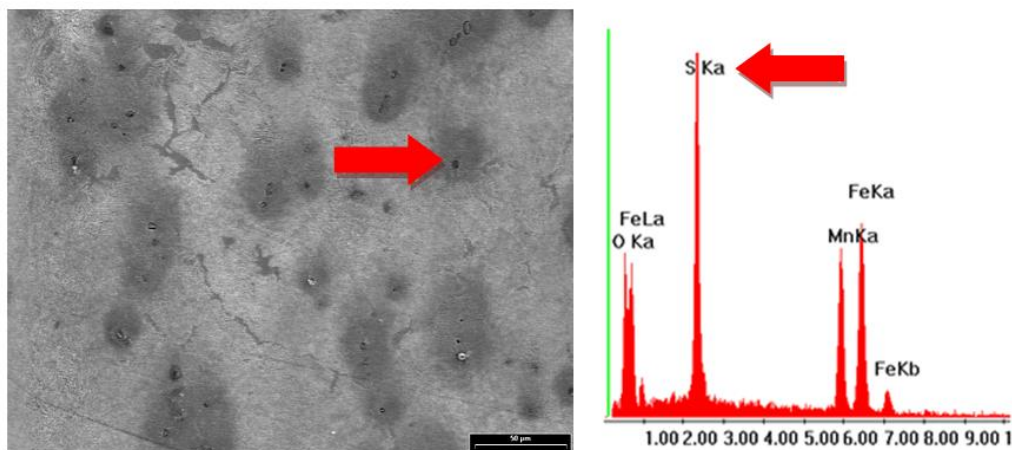


Figura 4.2: Izq.) Imagen de microscopio electrónico (500x) donde se observa gran cantidad de sulfuros. Der.) Espectro EDS donde se detecta la presencia de azufre.

Las Tablas 4.3 y 4.4 muestran las propiedades de los dos materiales finalmente utilizados.

Tabla 4.3: Propiedades del material AISI 4140.

<b>Acero AISI 4140</b>	
Material pista de rodadura/rueda	
Módulo de elasticidad [Pa]	$2.21 \times 10^{11}$
Coefficiente de Poisson	0.3
Conductividad térmica [WK m <sup>-1</sup> ]	46
Densidad [kg m <sup>-3</sup> ]	7850
Calor específico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	460



Tabla 4.4: Propiedades del Alum 2005 T3.

Aluminio 2005 T3 (CAMPLO)	
Material pista de rodadura	
Módulo de elasticidad [Pa]	7.50x10 <sup>9</sup>
Coefficiente de Poisson	0.33
Conductividad térmica [WK m <sup>-1</sup> ]	209
Densidad [kg m <sup>-3</sup> ]	2770
Calor específico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	909

#### 4.1.2 Lubricantes

Los ensayos de contacto lineal se realizaron usando cuatro lubricantes:

- *Glicerina (denominación en ensayos: 100%GL)*
- *Mezclas de glicerina y agua desmineralizada:*
  - *75% glicerina-25% agua (denominación en ensayos: 75%GL)*
  - *50% glicerina-50% agua (denominación en ensayos: 50%GL)*
- *Agua desmineralizada (denominación en ensayos: 100%AG)*

Los lubricantes fueron elegidos de manera de contar con fluidos de distintas viscosidades (desde ~0 a 0.6 Pa.s.) al evaluar la penetración de los mismos. Las Tablas 4.5 a 4.8 muestran las propiedades de los lubricantes utilizados.

Tabla 4.5: Propiedades del lubricante 100%GL.

Glicerina	
Lubricante contacto puntual	
Viscosidad a temperatura ambiente [Pa.s] [2-5]	0.597
Coef. visc. -presión ( $\alpha$ ) [m <sup>2</sup> N <sup>-1</sup> ] [6-9]	5.90x10 <sup>9</sup>
Coef. visc. -presión ( $z$ ) [6-9]	0.126
Densidad inicial [kg m <sup>-3</sup> ] [2-5]	1257
Conductividad térmica [W K m <sup>-1</sup> ] [2-5]	0.286
Calor específico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] [2-5]	2445

Tabla 4.6: Propiedades del lubricante 75%GL.

75% Glicerina / 25% Agua	
Lubricante contacto puntual	
Viscosidad a temperatura ambiente [Pa.s] [10-14]	0.022
Coef. visc. -presión ( $\alpha$ ) [ $m^2 N^{-1}$ ] [6-9]	$4.38 \times 10^9$
Coef. visc. -presión ( $z$ ) [6-9]	0.146
Densidad inicial [ $kg m^{-3}$ ] [10-14]	1061
Conductividad térmica [ $W K m^{-1}$ ] [10-14]	0.3
Calor específico [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ] [10-14]	3300

Tabla 4.7: Propiedades del lubricante 50%GL.

50% Glicerina / 50% Agua	
Lubricante contacto puntual	
Viscosidad a temperatura ambiente [Pa.s] [10-14]	0.0040
Coef. visc. -presión ( $\alpha$ ) [ $m^2 N^{-1}$ ] [6-9]	$4.22 \times 10^9$
Coef. visc. -presión ( $z$ ) [6-9]	0.198
Densidad inicial [ $kg m^{-3}$ ] [10-14]	1124
Conductividad térmica [ $W K m^{-1}$ ] [10-14]	0.24
Calor específico [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ] [10-14]	3412

Tabla 4.8: Propiedades del lubricante 100%AG.

Agua desmineralizada	
Lubricante contacto puntual	
Viscosidad a temperatura ambiente [Pa.s] [2-5]	0.0007
Coef. visc. -presión ( $\alpha$ ) [ $m^2 N^{-1}$ ] [10-14]	$7.50 \times 10^{10}$
Coef. visc. -presión ( $z$ ) [10-14]	0.057
Densidad inicial [ $kg m^{-3}$ ] [2-5]	1000
Conductividad térmica [ $W K m^{-1}$ ] [2-5]	0.58
Calor específico [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ] [2-5]	4183

Viscosidad a temperatura ambiente [Pa.s]			
Glicerina	75% Glicerina / 25% Agua	50% Glicerina / 50% Agua	Agua desmineralizada
0.597	0.022	0.004	0.0007

## 4.2 PREPARACIÓN DE LOS LUBRICANTES

La preparación de los lubricantes se realizó utilizando una balanza electrónica, *Precisa*, que permite pesar con una sensibilidad de  $1 \times 10^{-4}$  gramos. La misma puede observarse en la Figura 4.3.



Figura 4.3: Balanza de precisión utilizada para la preparación de mezclas lubricantes.

#### 4.2.1 Filtración

Los lubricantes usados en los ensayos de contacto puntual son previamente filtrados con membrana *Microclar N50025WPH* para garantizar la pureza total del mismo y la separación de contaminantes sólidos que pudiesen perjudicar los futuros estudios.

#### 4.2.2 Agregado de trazadores solubles

Con el fin de reconocer la penetración del lubricante en el interior de las fisuras, se agregaron trazadores a los lubricantes que fueran reconocibles mediante EDS. Los elementos utilizados son:

- *Trazador con base cloro*
- *Trazador con base titanio*
- *Trazador particulado de alúmina*

Para los ensayos de CAMPLO (aleación de aluminio), se descarta el uso de partículas de alúmina.

Las Figuras 4.4 a 4.6 muestran los espectros EDS que prueban la capacidad de reconocer restos de los tres trazadores sobre acero. Como se puede apreciar, las bandas características de los diferentes trazadores son fácilmente reconocibles mediante esta técnica.

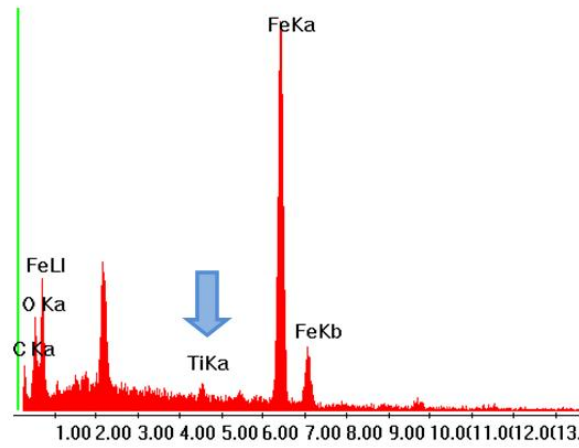


Figura 4.4: Espectro EDS del trazador con base titanio, sobre acero.

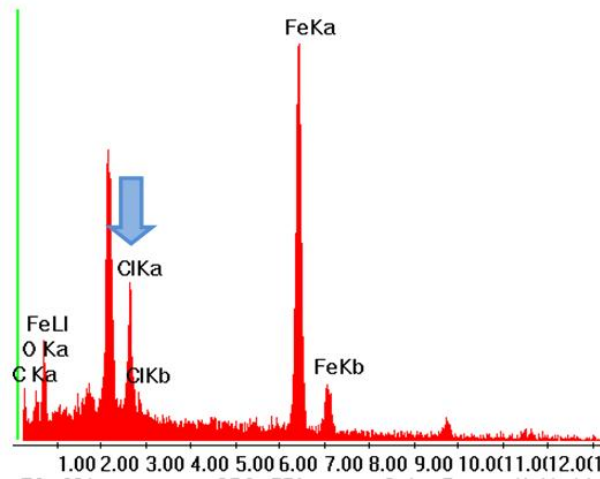


Figura 4.5: Espectro EDS del trazador con base cloro, sobre acero.

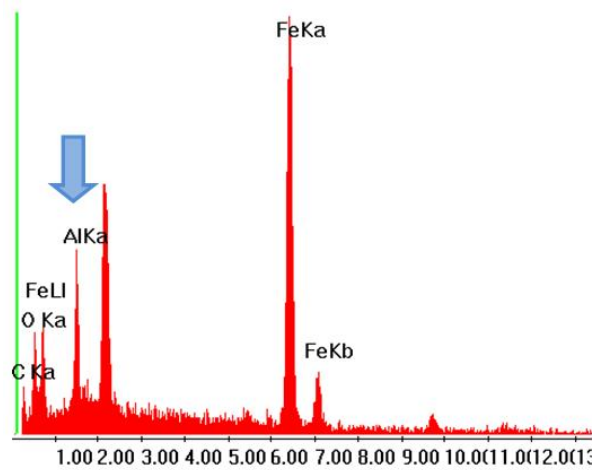


Figura 4.6: Espectro EDS del trazador con base aluminio, sobre acero.

### 4.3 MATERIALES USADOS EN ENSAYOS DE CONTACTO PUNTUAL

#### 4.3.1 Pista y elemento rodante

Los ensayos de contacto puntual se realizan con la combinación de dos materiales:

- **Pista de rodadura:** Acero AISI 52100
- **Elementos rodantes:** Nitruro de Silicio ( $Si_3N_4$ )

Estos materiales fueron elegidos para permitir el reconocimiento del origen de las partículas de desgaste en función de su composición. El acero detectado en las ferrogafías, claramente reconocido y diferenciado del material cerámico, asegura que las partículas provienen de los caminos de rodadura. Lo mismo vale para el material cerámico. Además, las esferas de nitruro de silicio provenientes de rodamientos “híbridos” tienen un acabado superficial de mejor calidad que las de acero. Esto permite tener mayor detalle en la detección de los cambios morfológicos generados en las etapas de desgaste. La Tabla 4.9 presenta la composición química del acero en estudio, mientras que las Tablas 4.10 y 4.11 listan las propiedades más significativas de los materiales utilizados para las pistas (acero AISI 52100) y elementos rodantes (nitruro de silicio  $Si_3N_4$ ).

Tabla 4.9: Composición química nominal del acero usado en ensayos de contacto puntual.

Material	Elemento (peso %)					
	C%	Cr%	Mn%	Si%	Cu%	S%
AISI 52100	0.98	1.5	0.3	0.15	0.02	< 0.011

Tabla 4.10: Propiedades del acero utilizado en ensayos de contacto puntual.

Acero AISI 52100	
Material pista de rodadura	
Módulo de elasticidad [Pa]	$2.10 \times 10^{11}$
Coefficiente de Poisson	0.3
Conductividad térmica [ $WK\ m^{-1}$ ]	46
Densidad [ $kg\ m^{-3}$ ]	7850
Calor específico [ $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]	464

Tabla 4.11: Propiedades del material cerámico.

Nitruro de Silicio Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	
Material elementos rodantes	
Módulo de elasticidad [Pa]	3.10x10 <sup>11</sup>
Coefficiente de Poisson	0.3
Conductividad térmica [WK m <sup>-1</sup> ]	12
Densidad [kg m <sup>-3</sup> ]	3210
Calor específico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	690

### 4.3.2 Lubricante

El lubricante utilizado para los ensayos puntuales es:

- *Vaselina 80 SSU*

La vaselina fue seleccionada porque tiene una viscosidad que permite obtener un  $\lambda < 3$  en las condiciones de los ensayos (como se verá en el Capítulo 6). La lubricación mixta que se obtiene, tiene una etapa estacionaria corta, que permite una rápida aparición de fisuras superficiales para su estudio. Además, este lubricante no tiene aditivos agregados ni elementos químicos que pudiesen generar alguna reacción externa a los tribo-procesos propios generados en el contacto. La tabla 4.12 muestra las propiedades de la vaselina utilizada en los ensayos.

Tabla 4.12: Propiedades del lubricante usado en los ensayos puntuales.

Vaselina (80 SSU)	
Lubricante contacto puntual	
Viscosidad a temperatura ambiente [Pa.s] [2-5]	0.015
Coef. visc. -presión ( $\alpha$ ) [m <sup>2</sup> N <sup>-1</sup> ] [6-9]	1.90x10 <sup>8</sup>
Coef. visc. -presión ( $z$ ) [6-9]	0.680
Densidad inicial [kg m <sup>-3</sup> ] [2-5]	858
Conductividad térmica [W K m <sup>-1</sup> ] [2-5]	0.17
Calor específico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] [2-5]	1800

## 4.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS METALES

### 4.4.1 Caracterización morfológica de superficies

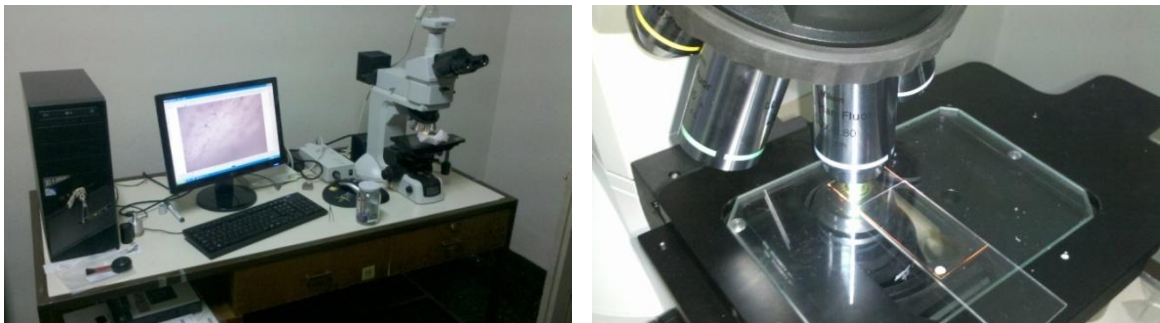
El análisis morfológico de las superficies fue realizado utilizando microscopía óptica, óptica confocal y electrónica. Estas técnicas permiten observar los cambios morfológicos

desarrollados en las diferentes etapas de desgaste, además de la morfología de las superficies fisuradas.

Los equipos utilizados son:

- *Microscopio óptico: Eclipse LV100 de Nikon (ver Figura 4.7)*

El microscopio óptico utilizado permite la observación, estudio e identificación de muestras sólidas mediante la transmisión de luz, hasta 1000 aumentos. Dispone de una cámara digital que permite la captura de imágenes para su análisis posterior y un software con capacidad de realizar imágenes en profundidad mediante un barrido de imágenes en dirección Z.



*Figura 4.7: Microscopio óptico Nikon. Detalle del equipo durante el análisis de las partículas obtenidas mediante ferrografía analítica (der.).*

- *Microscopios electrónicos de barrido, SEM, con detector de electrones secundarios: Jeol 35CF (CCT Bahía Blanca) y Jeol JSM-6460LV (U.N. de Mar del Plata) (ver Figura 4.8)*

La microscopía electrónica de barrido permite la observación y estudio de muestras sólidas y conductoras mediante la interacción de un haz de electrones con la superficie del material objeto de estudio, proporcionando imágenes de gran resolución de la topografía superficial de la muestra, que pueden ser tratadas y analizadas posteriormente. Para la preparación de muestras no conductoras, se utiliza un equipo de sputtering que deposita una fina capa de oro sobre la superficie. Los SEM usados, uno perteneciente al CCT-Bahía Blanca y otro al INTEMA, Mar del Plata, están dotados, además, de un espectrómetro de energía dispersiva de RX que permite el análisis químico semi-cuantitativo de las muestras.





Figura 4.8: Microscopios electrónicos de barrido con detector de electrones secundarios. Jeol 35CF (izq.) y Jeol JSM-6460LV(der.).

- *Microscopio óptico confocal: LEXT OLS4100 3D de Olympus (ver Figura 4.9)*

El microscopio confocal permite la caracterización de muestras sin o con una preparación previa moderada, hasta 5000 aumentos, realizando una superposición de imágenes obtenidas a diferentes distancias de enfoque para hacer una reconstrucción 3D. Todas las imágenes y medidas se pueden exportar en los formatos digitales más habituales. Este equipo permite la realización de medidas topográficas en tres dimensiones, sin contacto, con resolución nanométrica. La medida del campo de visión es de 8.45 mm (10.8 mm x 8.1 mm). La resolución del equipo en el eje vertical es inferior a 0.01 nm y el rango de medida vertical es de 0.1 nm hasta 10 mm.

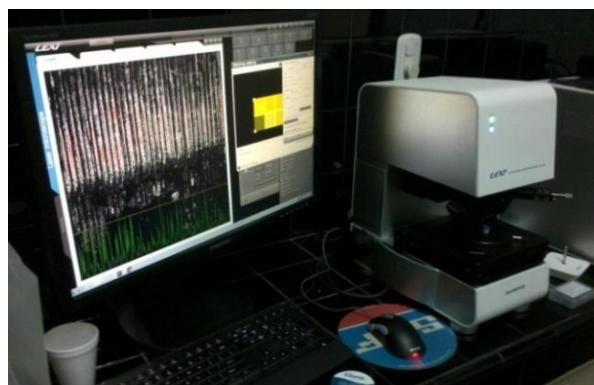


Figura 4.9: Microscopio óptico confocal Olympus Lext.

#### 4.4.2 *Rugosidad superficial*

En el caso de los ensayos de contacto puntual, las mediciones de rugosidad de superficie fueron realizadas mediante el microscopio confocal descrito anteriormente, mientras que en



los ensayos de contacto lineal se utilizó un rugosímetro marca *Jenoptik*, modelo *Hommeltester T500*, que se muestra en la Figura 4.10. El rugosímetro de contacto utilizado es portátil y de fácil utilización. Permite determinar los parámetros  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}/R_t$ ,  $R_q$ ,  $R_{3z}$  y  $R_{Sm}$  según normas DIN 4777e ISO 4287. Además, cumple estándares japoneses JIS B601. Debido al tipo de geometrías, en el caso de las pistas y elementos rodantes de contacto puntual fue imposible usar este equipo para medir la rugosidad superficial, por ello la elección de los diferentes dispositivos.



Figura 4.10: Rugosímetro *Jenoptik* realizando una medición sobre una probeta de contacto lineal.

## 4.5 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

### 4.5.1 *Espectrometría de emisión óptica*

La composición química de los aceros se determina con un espectrómetro de emisión óptica. Esta técnica permite la determinación de la composición química de metales, mediante la emisión de luz del mismo y el análisis de las chispas formadas [15]. Los átomos e iones que se desprenden durante este proceso son excitados y emiten una luz que se conduce hacia sistemas ópticos. En éstos, la luz se mide mediante un detector electrónico fotosensible CCD, que convierte la luz en cargas eléctricas. La Figura 4.11 muestra el espectrómetro *Spectromax X*, de *Spectro*, utilizado en esta tesis.

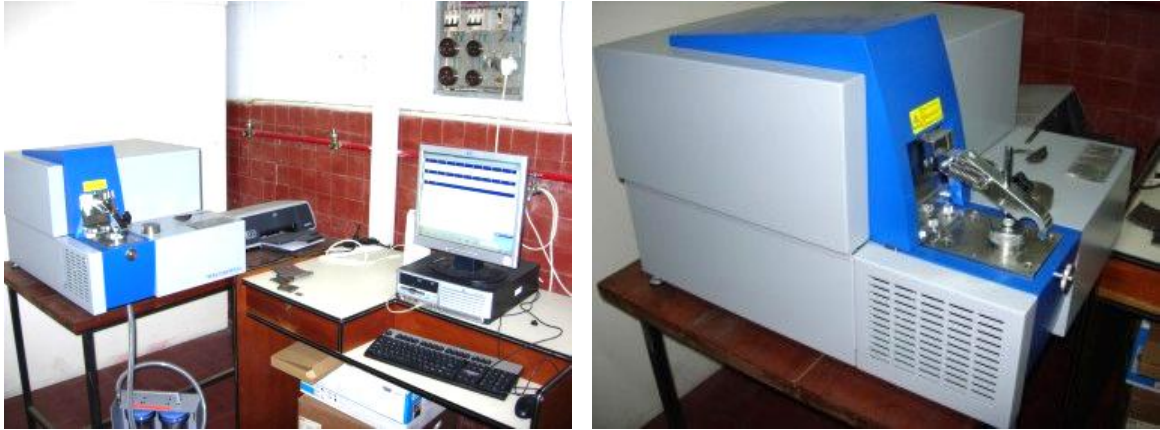


Figura 4.11: Espectrómetro usado para la caracterización química de los aceros.  
Detalle del equipo en la zona de emisión de chispa (der.).

#### 4.5.2 Espectroscopía de energía dispersiva, EDS

La caracterización química puntual se efectúa por microanálisis, con un detector de energía dispersiva de rayos-X (EDS) marca *EDAX*, montado en los microscopios electrónicos de barrido antes descritos. Esta técnica permite el análisis cualitativo de los constituyentes químicos del material bajo estudio. Cuando el haz de electrones colisiona con los electrones de las capas más internas de los átomos de la muestra, saca un electrón de su sitio, creando una vacancia; ésta es ocupada por un electrón de las capas más externas. La transición de la capa externa a una interna genera radiación X. El detector de rayos-X de dispersión de energías recoge un único espectro emitido por todos los elementos de la muestra a la vez; pero genera un impulso eléctrico para cada fotón de rayos-X incidente, cuya altura es equivalente a la energía del fotón. Cada impulso eléctrico generado es separado y almacenado de acuerdo a su valor correspondiente al elemento constituyente del material.

### 4.6 CARACTERIZACIÓN DE ÓXIDOS

#### 4.6.1 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos-X (XPS ó ESCA)

Los tribo-óxidos de la superficie de las pistas de rodadura fueron caracterizados mediante XPS. Esta técnica permite analizar la química superficial de un material proporcionando información cualitativa y cuantitativa de todos los elementos presentes, excepto H y He [16]. El gran potencial de esta herramienta de trabajo se vislumbra en el análisis de los primeros 10 nm de una superficie, identificando elementos presentes en concentraciones mayores al 0.1%. La energía de enlace que se mide por XPS se asocia a enlaces de tipo iónico o covalente entre

átomos. Esta técnica informa cualitativamente y cuantitativamente el estado de combinación del elemento (por ejemplo permite distinguir la presencia de  $\text{Fe}^0$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , así como el porcentaje elemental de cada una de esas especies. Esta información es fundamental en la caracterización de óxidos superficiales. La Figura 4.12 presenta el equipo utilizado, modelo PHI 5000 Versa Probe II, perteneciente al Centro Atómico Constituyente (CNEA).

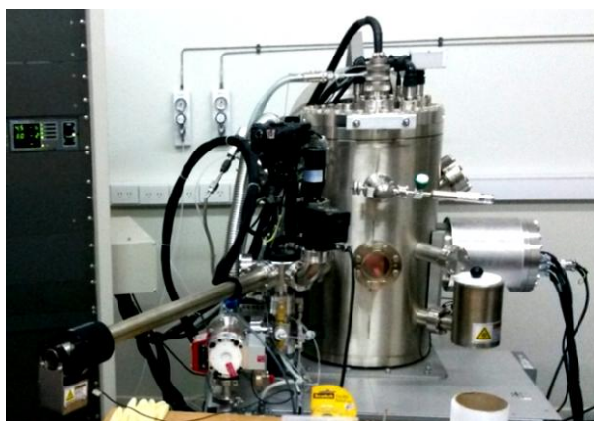


Figura 4.12: Equipo XPS usado en la caracterización de óxidos superficiales.

#### 4.6.2 Microscopía Raman

Los óxidos de las partículas de desgaste fueron analizados mediante microscopía Raman. Esta técnica espectroscópica permite estudiar modos de baja frecuencia de la materia como son los vibratorios, rotatorios, entre otros [17]. Se basa en los fenómenos de dispersión inelástica, o dispersión Raman, de la luz monocromática de un láser en el rango de luz visible, infrarrojo o ultravioleta. La luz láser interactúa con fotones u otras excitaciones en el sistema, provocando que la energía de los fotones del láser experimenten un desplazamiento hacia arriba o hacia abajo. El desplazamiento en energía da información sobre los modos vibracionales en el sistema. Esto permite reconocer los enlaces propios de los óxidos constituyentes del material. En la Figura 4.13 se observa el equipo utilizado, modelo *in-Via Reflex Raman* de *Renishaw*, perteneciente al INTEMA, Mar del Plata. El láser utilizado en los análisis, que tiene una potencia máxima de 300mW, tiene una longitud de onda de 785 nm a diferentes potencias de trabajo y tiempos de exposición.



Figura 4.13: Equipo RAMAN Renishaw, modelo in-Via Reflex.

## 4.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS LUBRICANTES

Los lubricantes empleados en los ensayos fueron caracterizados mediante espectroscopía FTIR, para determinar su estructura química, y reometría, para medir su viscosidad.

### 4.7.1 Estructura química

La técnica de espectrofotometría de infrarrojo con transformada de Fourier permite determinar la presencia de grupos funcionales en materiales poliméricos y determinadas estructuras de muestras sólidas y líquidas [17]. Los lubricantes fueron analizados mediante un espectrómetro infrarrojo (FTIR/ATR) *Nexus 520* de *Nicolet*, perteneciente a PLAPIQUI Bahía Blanca, que presenta un microscopio óptico acoplado, *Continum Nicolet*. El equipo, que se muestra en la Figura 4.14, cubre el rango espectral comprendido entre 400 y 4000  $\text{cm}^{-1}$  caracterizando micro-áreas de 10 x 10  $\mu\text{m}$ .



Figura 4.14: Espectrómetro de infrarrojo Nexus 520 con microscopio acoplado.

### 4.7.2 Viscosidad

La viscosidad de los lubricantes fue medida con un reómetro rotacional *AR-G2* de *TA Instruments*, perteneciente a PLAPIQUI, que permite evaluar propiedades dinámicas y de estado estacionario entre  $-150$  y  $300^{\circ}\text{C}$  [18]. Su imagen se puede observar en la Figura 4.15.



Figura 4.15: Reómetro AR-G2 de TA Instruments. Detalle de la geometría de medición con una muestra de lubricante (der.).

## 4.8 ANÁLISIS DE PARTÍCULAS DE DESGASTE

Las partículas de desgaste generadas en los ensayos tribológicos fueron analizadas mediante ferrografía analítica [19-21] para luego utilizar técnicas de microscopía óptica y electrónica SEM junto con EDS. La ferrografía permite el análisis de la concentración, el tamaño, la forma y la procedencia de las partículas metálicas y no metálicas presentes en el aceite. También permite analizar metales no ferrosos, como el aluminio, la plata, magnesio, aleaciones de cobre, plomo-estaño, etc. Consiste en la circulación de una muestra de lubricante sobre un vidrio plano sometido a la acción de un gran campo magnético, el cual frena la circulación de las partículas. El vidrio retiene en su superficie las partículas de desgaste para su posterior análisis. En este trabajo se utiliza un ferrógrafo *T2FM Q500* de *Spectro* (ver Figura 4.16).





Figura 4.16: Ferrógrafo para el análisis de las partículas de desgaste.

#### 4.9 GENERACIÓN DE FISURAS

Las fisuras fueron generadas utilizando dos equipos:

- *Un vibróforo de alta frecuencia AMSLER, modelo Type 10 HFP 422*

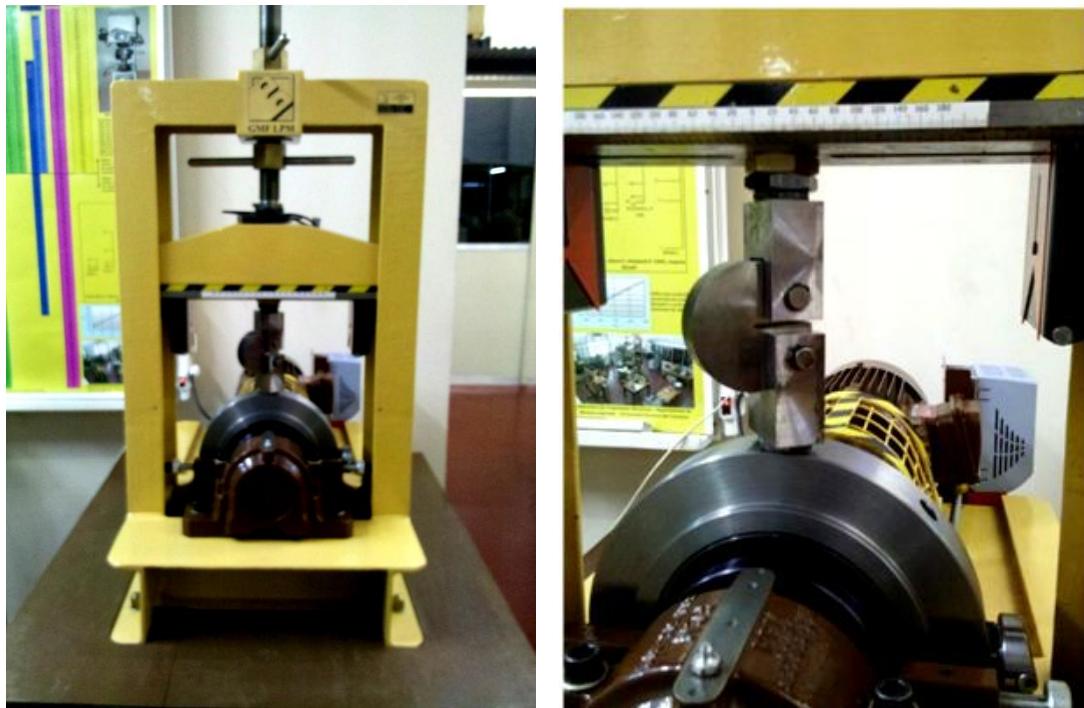
Este equipo, que pertenece al Laboratorio de Ensayos de Materiales de la UNS, cuenta con una capacidad máxima de carga de 10000 kg y permite aplicar cargas de compresión y/o tracción a altas frecuencias. La Figura 4.17 muestra este equipo.

- *Una máquina pre-fisuradora, con control de desplazamiento.*

Este equipo, que es propiedad de Laboratorio de Mecánica de la Fractura de la Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, permite aplicar un desplazamiento regulable desde 0 a 0.5 mm en un rango de frecuencias variable de 12.5 a 25 Hz. Su imagen se muestra en la Figura 4.18.



*Figura 4.17: Vibróforo de alta frecuencia AMSLER, modelo Type 10 HFP 422.  
Detalle de equipo operando (der.).*



*Figura 4.18: Máquina pre-fisuradora de desplazamiento.  
Detalle de equipo operando.*

#### 4.10 DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE LAS FISURAS GENERADAS

La detección y medición de las fisuras superficiales generadas en los ensayos de contacto lineal fue realizada usando un equipo de ultrasonido. Este método de detección se basa en la medición de la propagación del sonido en el medio que constituye la pieza a analizar y tiene aplicación en todo tipo de materiales. Esta metodología es muy usada en el área de mantenimiento predictivo ya que permite detectar pequeñas fisuras con una gran precisión tanto en ubicación y dimensionamiento. El equipo utilizado, que se puede observar en la Figura 4.19, es un *Omniscan MX2 Phased Array Ultrasonic Flaw Detector* de *Olympus*. El detector es de tipo *5L60* de 60 elementos (5 MHz de frecuencia).



Figura 4.19: Equipo de ultrasonido Olympus Omniscan. Detalle del detector 5L60 sobre una probeta pre-fisurada de contacto lineal (der.).

#### 4.11 MEDICIÓN DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS Y DE ENSAYOS

En todos los ensayos se midieron las condiciones de humedad y temperatura ambiente (ver Figura 4.20 Izq.), además de medir la temperatura localizada en diferentes puntos de los ensayos usando termocuplas tipo K (ver Figura 4.20 Der.).





Figura 4.20: Equipo para la medición de temperatura y humedad del ambiente (izq.), y equipo para monitoreo de temperatura en diferentes puntos del ensayo (der.).

#### 4.12 REFERENCIAS

- [1] Mills, K. (1985). Metals Handbook Vol. 9, Metallography and Microstructures. ASM, Metals Park, OH.
- [2] Darby R., (2001) Chemical Engineering Fluid Mechanics, Revised and Expanded. CRC Press
- [3] Chang, R. (2007). Química General, 9ª edición, Ed. McGraw-Hill Interamericana
- [4] Totten, G. E. (2011). Handbook of hydraulic fluid technology. CRC Press.
- [5] Han, F., Zhang, J., Chen, G., & Wei, X. (2008). Density, viscosity, and excess properties for aqueous poly (ethylene glycol) solutions from (298.15 to 323.15) K. Journal of Chemical & Engineering Data, 53(11), 2598-2601.
- [6] Roelands, C. J. A. (1966). Correlational aspects of the viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology).
- [7] Bair, S. (2000). Pressure-viscosity behavior of lubricants to 1.4 GPa and its relation to EHD traction. Tribology Transactions, 43(1), 91-99.
- [8] Leeuwen, H. (2009). The determination of the pressure—viscosity coefficient of a lubricant through an accurate film thickness formula and accurate film thickness measurements. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 223(8), 1143-1163.
- [9] Huang, P. (2013). Numerical Calculation of Lubrication: Methods and Programs. John Wiley & Sons.

- [10] Ghaedi, A. (2015). Simultaneous prediction of the thermodynamic properties of aqueous solution of ethylene glycol monoethyl ether using artificial neural network. *Journal of Molecular Liquids*, 207, 327-333.
- [11] Schmidt, R., Klingenberg, G., & Woydt, M. (2006). New lubrication concepts for environmental friendly machines (No. 277). BAM Research Report.
- [12] Begum, S. K., Clarke, R. J., Ahmed, M. S., Begum, S., & Saleh, M. A. (2011). Densities, viscosities, and surface tensions of the system water+ diethylene glycol. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 56(2), 303-306.
- [13] Begum, S. K., Clarke, R. J., Ahmed, M. S., Begum, S., & Saleh, M. A. (2013). Volumetric, viscosimetric and surface properties of aqueous solutions of triethylene glycol, tetraethylene glycol, and tetraethylene glycol dimethyl ether. *Journal of Molecular Liquids*, 177, 11-18.
- [14] Dalmaz, G., & Godet, M. (1978). Film thickness and effective viscosity of some fire resistant fluids in sliding point contacts. *Journal of Tribology*, 100(2), 304-307.
- [15] Zhou, Z., Zhou, K., Hou, X., & Luo, H. (2005). Arc/Spark optical emission spectrometry: principles, instrumentation, and recent applications. *Applied Spectroscopy Reviews*, 40(2), 165-185.
- [16] Chastain, J., & King, R. C. (Eds.). (1995). *Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy: a reference book of standard spectra for identification and interpretation of XPS data* (pp. 84-85). Eden Prairie, MN: Physical Electronics.
- [17] Graves, P. R., & Gardiner, D. J. (1989). *Practical Raman Spectroscopy*.
- [18] Dealy, J. M., & Wang, J. (2013). *Melt rheology and its applications in the plastics industry*, Ed. 2. Dordrecht: Springer.
- [19] Scott, D. (1975). Debris examination—a prognostic approach to failure prevention. *Wear*, 34(1), 15-22.
- [20] Seifert, W. W., & Westcott, V. C. (1972). A method for the study of wear particles in lubricating oil. *Wear*, 21(1), 27-42.
- [21] Westcott, V., & Seifert, W. W. (1973). Investigation of iron content of lubricating oil using a ferrograph and an emission spectrometer. *Wear*, 23(2), 239-249.

# Capítulo 5

## *Ensayos de contacto lineal: Procedimiento experimental*

---

Los ensayos de contacto lineal se realizaron en un tribómetro especialmente diseñado para estudiar la penetración de diferentes líquidos sobre fisuras abiertas sometidas a “Fatiga de Contacto por Rodadura” (FCR). Para el desarrollo de los ensayos, se fabricaron probetas con fisuras superficiales abiertas pasantes y no pasantes. En este Capítulo se describen el proceso de generación de las probetas, y el método de ensayo utilizados.

### 5.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS CON SUPERFICIE PRE-FISURADAS

#### 5.1.1 *Crecimiento de la fisura*

El método utilizado para desarrollar las probetas del ensayo de rodadura de contacto, es en parte, similar al utilizado para preparar las probetas "Disk-Shaped Compact" DC(T) empleado en los ensayos de mecánica de la fractura [1]. A diferencia de estas, el ligamento remanente es mayor. Para este propósito se utilizaron probetas de 75 mm de diámetro a partir de barras redondas macizas de acero AISI-SAE 4140 laminado en caliente y CAMPLO 2005 T3. Estos materiales han sido elegidos para analizar la interacción líquido-sólido. Cabe aclarar que la metodología aplicada para obtener las probetas es aplicable a otros materiales.

Las probetas son cortadas a partir de la barra maciza y, como ya se dijo, maquinadas similarmente a las probetas DC(T) con un ligamento remanente mayor. La Figura 5.1 esquematiza las piezas mecanizadas. Las dimensiones son:  $a = 34.00 \pm 0.25$  mm;  $B = 25.4 \pm 0.5$  mm;  $C = 12.70 \pm 0.75$  mm;  $D = 68.58 \pm 0.50$  mm;  $E = 50.80 \pm 0.25$  mm;  $F = 2.50 \pm 0.25$  mm, y  $\alpha^\circ = 40^\circ$ . Luego, mediante un vibróforo de alta frecuencia AMSLER (ver Capítulo 4),

se realiza la fisura sobre la probeta aplicando previamente una carga de compresión inicial. Ésta facilita el crecimiento de fisura debido a las tensiones de compresión generadas [2]. La Figura 5.2 muestra la zona donde creció la fisura sobre una probeta de acero AISI-SAE 4140.

Otras probetas se realizaron con una máquina pre-fisuradora, que permite regular el desplazamiento, la cual puede observarse en la Figura 5.3. Tiene la ventaja de tener un control más estricto del crecimiento de la fisura, al disminuir la tasa de crecimiento por fatiga con el incremento de la longitud de fisura. Para pre-fisurar acero se aplicó un desplazamiento de 0,5 mm (o una carga oscilante de +/- 400 Kg sobre una estática de 500 Kg). Son necesarios aproximadamente 400.000 ciclos para obtener la fisura con las características necesarias. Para aluminio se utilizó una carga oscilante de +/- 300 Kg sobre una estática de 400 Kg y fueron necesarios una cantidad aproximada de 150.000 ciclos para obtener la fisura.

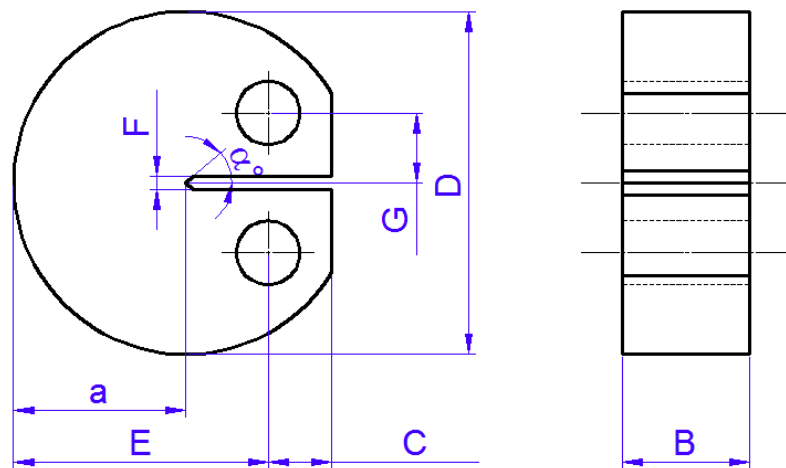


Figura 5.1: Ilustración esquemática de las probetas de mecánica de la fractura no estándar.

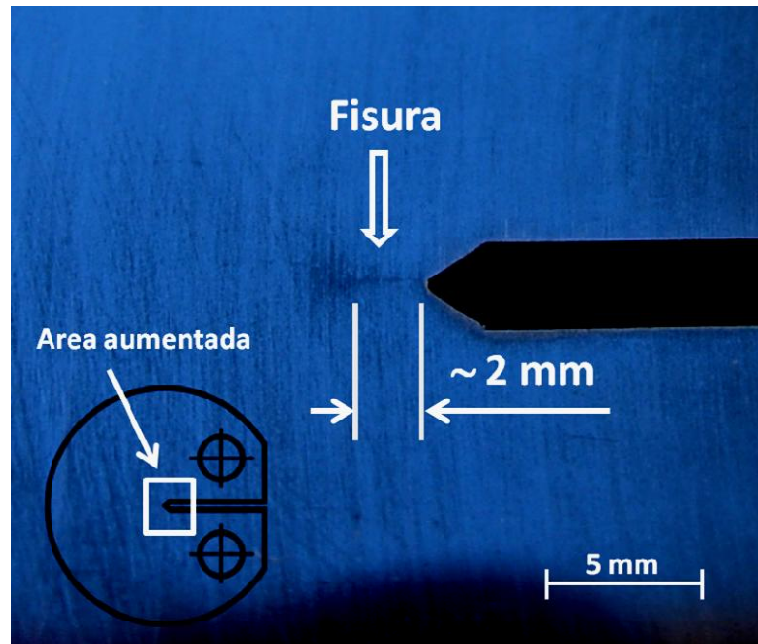


Figura 5.2: Imagen de la pre-fisura en una probeta de mecánica de la fractura no estándar.

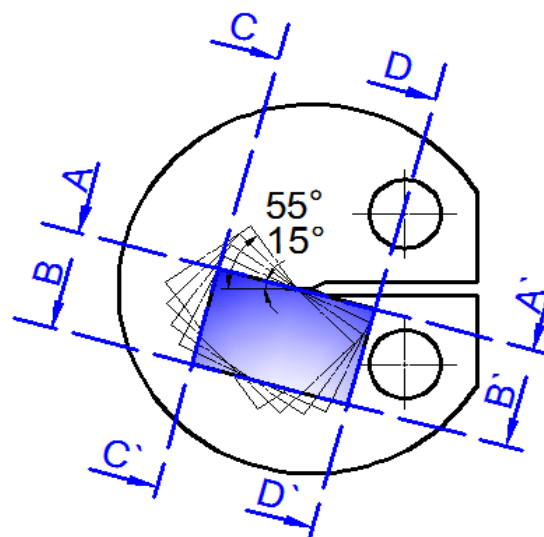


Figura 5.3: Ilustración esquemática de los cortes realizados en el maquinado de la probeta hasta obtener un prisma rectangular con fisura superficial.

El método de fabricación descrito produce fisuras con menor profundidad en sus extremos y mayor en la parte central. Esto se explica por causa de la triaxialidad heterogénea en el frente de fisura. Es decir, el frente de fisura tiene una forma semi-elíptica, ya que en los extremos, la misma está sometida a un estado plano de tensiones, mientras que en la parte central, está sometida a un estado plano de deformaciones [2,3]. Si bien analizando teóricamente se debería tener sobre las dos caras de la probeta la misma longitud de fisura siendo un poco mayor en la parte central, debido a ciertos factores (problemas de

desalineación del equipo, errores en maquinado de la pieza, etc.), es normal observar que el crecimiento de la fisura no es totalmente parejo en sus extremos.

### 5.1.2 Maquinado para obtener la fisura superficial abierta

Para obtener la fisura superficial abierta a un ángulo determinado, se procede al maquinado de las probetas. Se realizan varios cortes sobre la misma hasta obtener un prisma rectangular con una superficie fisurada. El esquema realizado en la Figura 5.3 puede facilitar la interpretación del maquinado. Inicialmente el corte A-A` se realiza cuidadosamente dejando un sobre-espesor de aproximadamente 2 mm para no dañar la fisura. Luego, los cortes B-B`, C-C` y D-D` culminan la geometría. El prisma rectangular obtenido finalmente tiene una superficie aproximada de 40 x 25 mm sobre el plano que contiene a la fisura y 25 mm entre los planos A-A` y B-B` aproximadamente. Como se observa, la inclinación dada por el plano A-A` permite obtener fisuras con ángulos entre 15 y 55°. La Figura 5.4 muestra dos probetas luego del proceso de mecanizado.

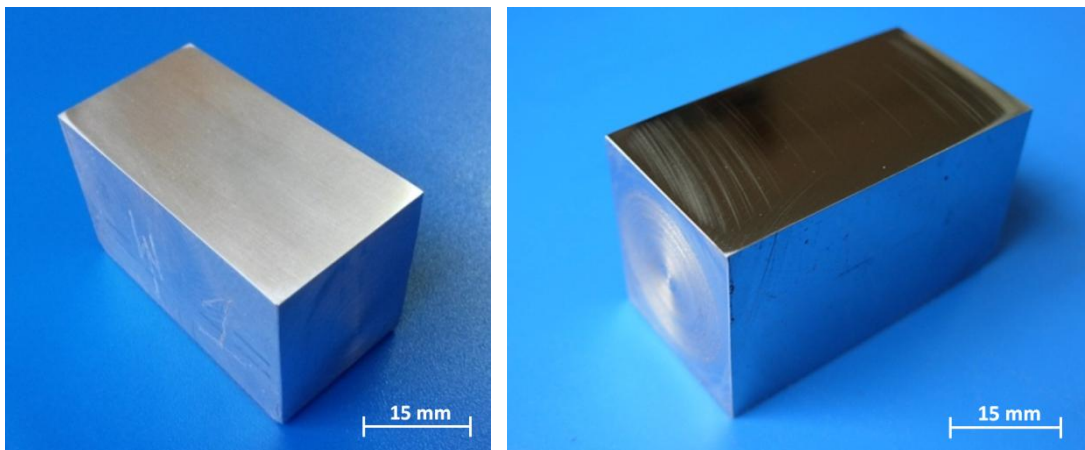


Figura 5.4: Imágenes de las probetas con fisura superficial. (Izq.) CAMPLO 2005 T3;

Der.) acero AISI 4140

### 5.1.3 Acabado superficial de las probetas

Las superficies de la probeta fueron rectificadas con el fin de obtener paralelismo entre las caras. Luego se efectuó el último desbaste sobre la cara donde se encuentra la fisura. Se prepararon dos tipos de fisuras, algunas cerradas en sus extremos y otras abiertas. Las cerradas se lograron rectificando la probeta hasta encontrar que la misma quede encerrada en el plano de la probeta (ver Figuras 5.5 y 5.6). El rectificado se realizó en etapas de desbastado de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  con refrigeración. Esta etapa es la que se realizó con mayor



cuidado. La Figura 5.5 muestra una fisura superficial abierta, la cual queda encerrada entre las superficies laterales (fisura denominada “no pasante”).

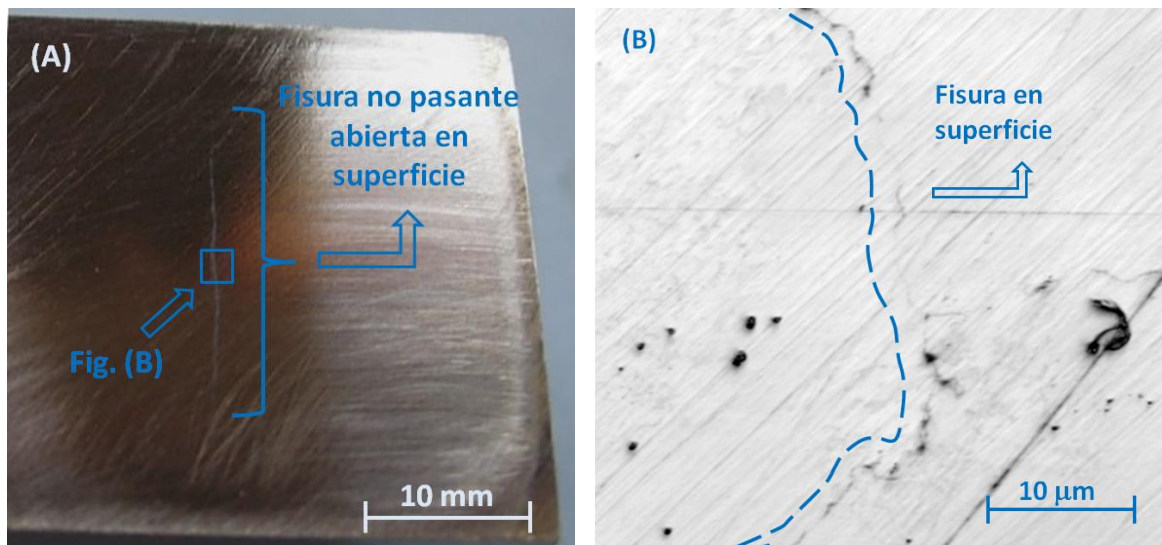


Figura 5.5: Imagen de una probeta con fisura superficial abierta antes del pulido final (etapa A).  
Detalle obtenido con microscopio Laser a 2000x (der.)

Para finalizar, la superficie donde se encuentra la fisura es pulida con papel de lijas hasta 1000 micro-granos. Luego se realiza la limpieza final mediante ultrasonido en baño de tolueno a 40°C. Mediante este proceso, se puede producir fisuras superficiales abiertas con superficies expuestas a la acción del líquido para ensayos de rodadura de contacto. En la Figura 5.6 se pueden observar algunas de las probetas preparadas, confeccionadas con fisuras superficiales.

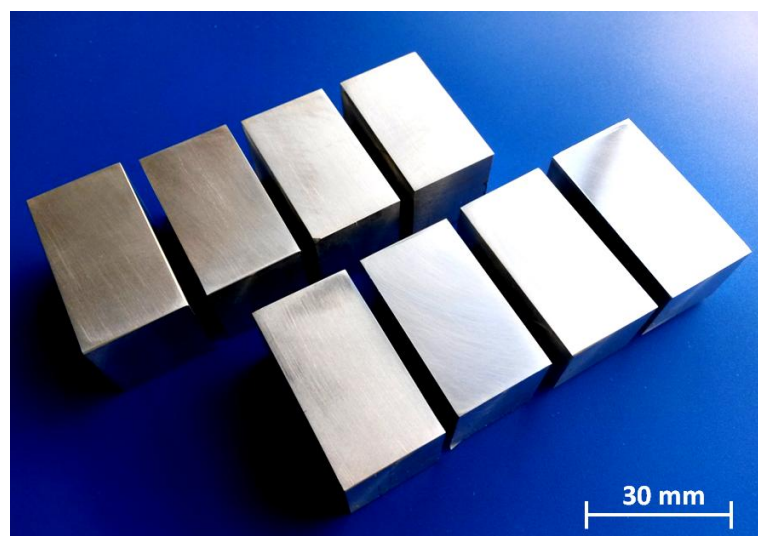


Figura 5.6: Imágenes de las probetas con fisura superficial antes del pulido final.

La caracterización de las superficies se efectuó con el rugosímetro descrito en el Capítulo 4. Los resultados se observan en la Tabla 5.1. Las mediciones de rugosidad se realizaron con un Cut-off  $\lambda_c$  0,8 mm y una longitud de 4.5 mm.

Tabla 5.1: Rugosidad inicial de las superficies de contacto.

Rugosidad	Rueda		
Parámetros	AISI 4140	AISI 4140	CAMPLO
$R_a$	2,74	0,36	0,18
$R_z$	11,47	3,05	1,4
$R_p$	7,39	2,03	0,92
$R_q$	3,44	0,65	0,23

#### 5.1.4 Sellado lateral de las fisuras abiertas

Como se mencionó anteriormente, se realizaron dos tipos de fisuras, unas pasantes y otras no pasantes en sus extremos. La Figura 5.7 muestra una representación de la fisura pasante y la no pasante para facilitar su interpretación. Las no pasantes tienen una limitación dimensional debida al método de fabricación. Las fisuras crecen en profundidad, con un frente semi-elíptico, por lo cual puede tener como máximo una profundidad de aproximadamente 0,3 mm para los tamaños de probetas utilizados en esta tesis. Por esta razón, y para obtener fisuras de mayor profundidad, se prepararon fisuras pasantes.

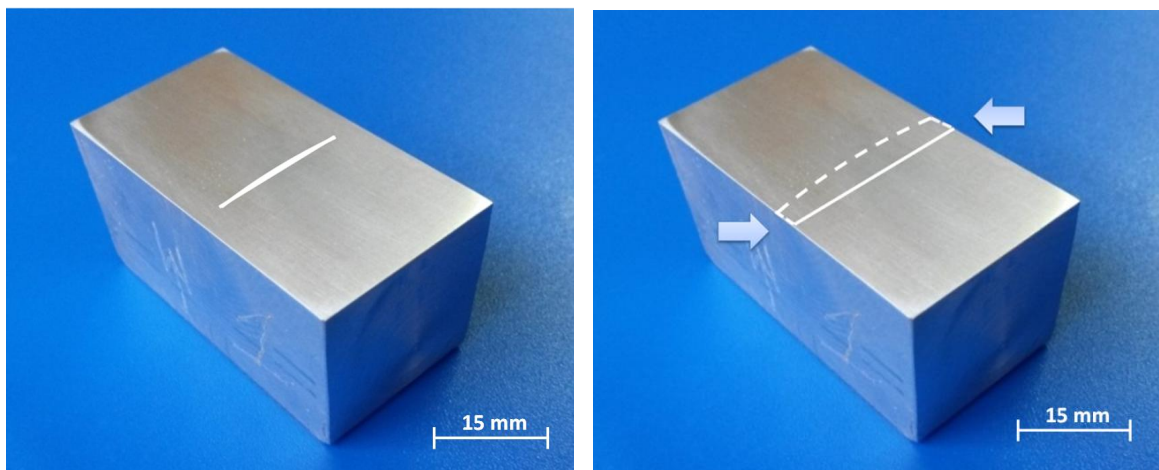


Figura 5.7: Dibujo de fisura no pasante (izq.) y pasante (der.).

El inconveniente que se da en las fisuras pasantes es que existe la posibilidad de penetración del fluido sobre las caras laterales a la de aplicación de carga. Esto se resolvió



diseñando un método que consiste en un sellado con adhesivo polimérico. Se utilizó un adhesivo del tipo epoxi, el cual cuenta con elasticidad suficiente para mantener el sellado con el movimiento de la fisura. El mismo fue adherido a las superficies laterales luego de realizar un acabado superficial con alta rugosidad para garantizar la correcta adherencia. La Figura 5.8 muestra el tratamiento superficial de rugosidad realizado para mejorar la adherencia. En la Figura 5.9 se puede ver algunas probetas con el sellado lateral finalizado.

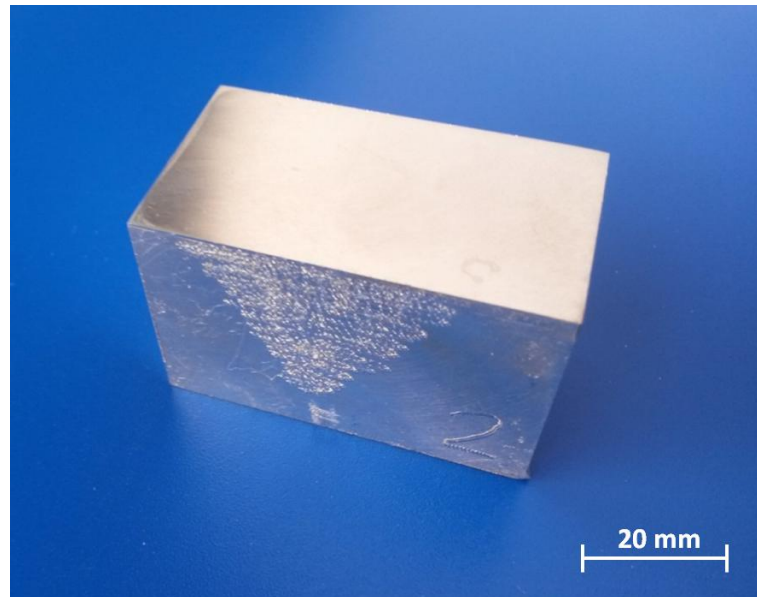


Figura 5.8: Acabado superficial de las paredes laterales antes del sellado con epoxi.

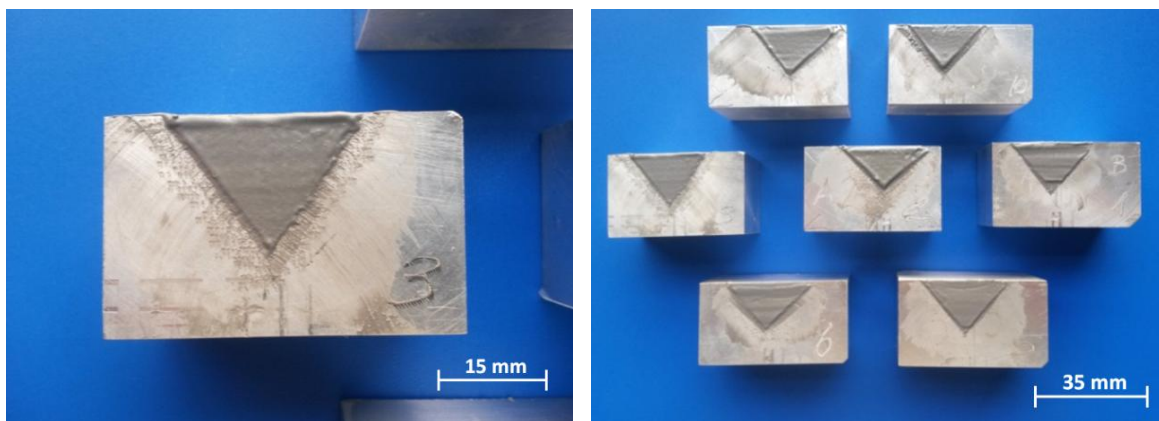


Figura 5.9: Sellado lateral de las fisuras pasantes

### 5.1.5 Medición de las fisuras

Las fisuras se miden mediante técnicas de ultrasonido. La Figura 5.10 presenta, a modo de ejemplo, el espectro perteneciente a una fisura de 0,25 mm de profundidad (parte central) y aproximadamente  $25^\circ$  (con respecto a la horizontal). La grieta produce un rebote de la onda

originando dos regiones claras. La señal superior corresponde al rebote producido por la punta de la grieta (marcada en la imagen) y la otra es producto de la distorsión propia de la grieta misma. La medición de la fisura se realiza mediante el análisis del espectro presentado.

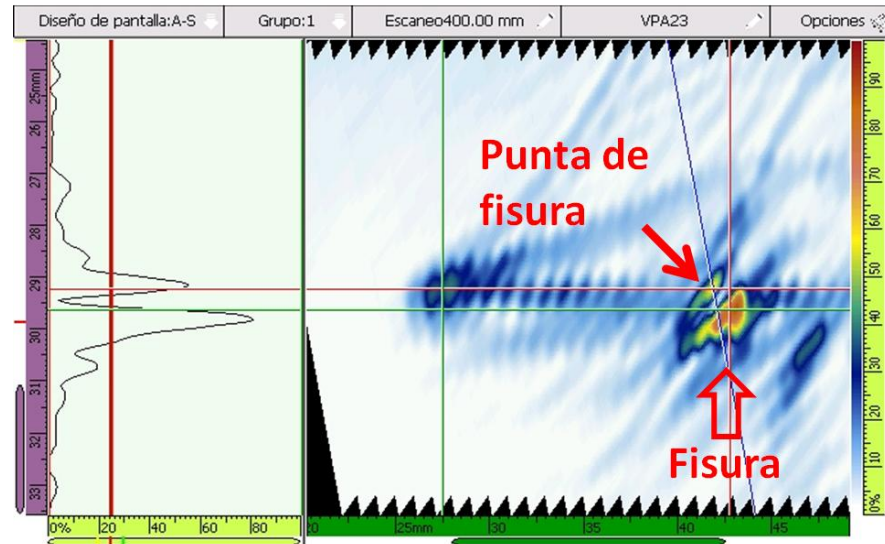


Figura 5.10: Espectro obtenido del equipo de ultrasonido donde se observa la fisura abierta en la superficie.

## 5.2 DENOMINACIÓN DE LAS PROBETAS

Para poder identificar los ensayos realizados se determinó un código de 4 siglas separadas por guiones. La primer sigla, identifica el material de la probeta (AC para las probetas de acero, y AL para las de aluminio 2005 T3); la segunda especifica el lubricante utilizado (100%GL, 75%GL, 50%GL o 100%AG); la tercera corresponde a la carga aplicada en el ensayo en kilogramos; y la cuarta representa el número de ensayo correspondiente a esa serie. Por ejemplo:

ENSAYO: AL-75%GL-1000-N02

es el ensayo que corresponde a:

- *AL:*            *Probeta de aluminio 2005 T3 CAMPLO*
- *75%GL:*      *Lubricante con composición 75% glicerina/25% agua*
- *1000:*        *Carga aplicada: 1000 kg*
- *N02:*         *Corresponde al ensayo n° 02 de esa serie*

### 5.3 TRIBÓMETRO DE CONTACTO POR RODADURA LINEAL

La Figura 5.11 presenta el tribómetro diseñado para estudiar la penetración de diferentes líquidos sobre fisuras sometidas a rodadura de contacto. Una representación esquemática del mismo se muestra en la Figura 5.12. La probeta es cuidadosamente posicionada con la superficie fisurada en la parte superior dentro del porta probeta realizado en acero, sobre el cual se puede aplicar un movimiento recíprocante por medio de un sistema biela manivela. El mismo es comandado por un motor de 2 HP/1500 RPM y una reductora sin fin corona con relación 1/20. La carga es aplicada por medio de una rueda de acero ANSI 4140 de 110 mm de diámetro. A su vez, sobre la rueda se puede aplicar un amplio rango de carga usando una máquina universal de ensayos *Emic LINHA DL-10000* (30 hasta 100 kN). De esta manera, la carga máxima aplicable sobre metal es 1600 MPa y sobre aleaciones de aluminio es 1200 MPa, según se calcula con la teoría de Hertz, con una velocidad máxima lineal de 0,07 m/s.

Los ensayos se realizan a temperatura ambiente, la cual es constantemente monitoreada, junto con la humedad. Como ya se comentara en el Capítulo 4, los lubricantes utilizados son libres de aditivos, y se les agrega diferentes sustancias trazadoras con el fin de identificar la penetración del fluido en la fisura al finalizar el ensayo. Se realizaron ensayos de 1.000.000 de ciclos para acero (222,2 horas), y 50.000 (11,1 horas) para la aleación de aluminio. Los intentos iniciales de usar las mismas condiciones en probetas de aluminio mostró que el crecimiento del frente de fisura (para las cargas aplicadas) era mucho mayor que en las probetas de acero, por lo que se decidió reducir la cantidad de ciclos, evitando el avance desmedido incluso hasta el desprendimiento del material (descascarillado superficial).



Figura 5.11: Tribómetro de rodadura de contacto lineal. Detalle de la rueda sobre la probeta sumergida en lubricante (der.).

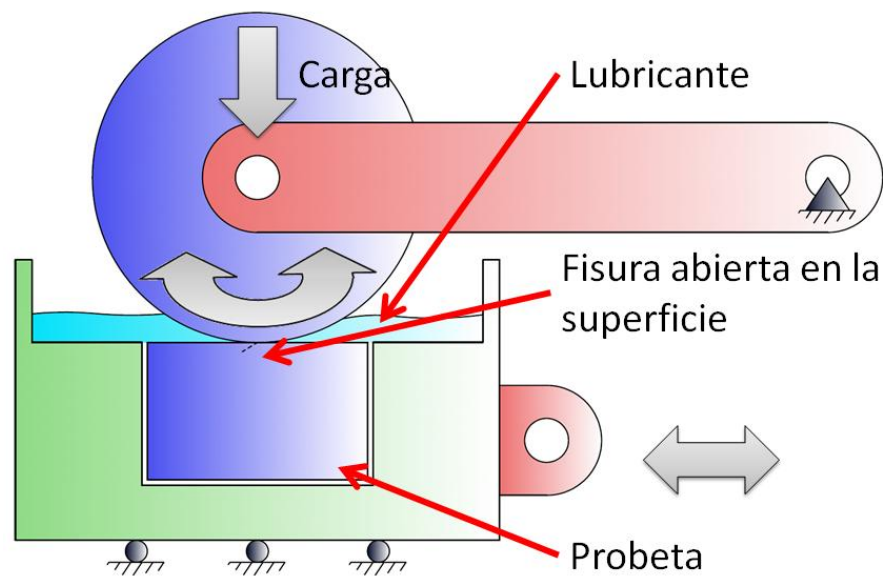


Figura 5.12: Esquema del tribómetro de rodadura de contacto lineal

#### 5.4 CARACTERIZACIÓN DEL LUBRICANTE

Durante los ensayos, muestras de 4 ml de lubricante son extraídas a diferentes intervalos de tiempo (ver Tabla 5.2). Las muestras son utilizadas para analizar la degradación que el lubricante pueda ir sufriendo durante el ensayo y para la detección y análisis de partículas de



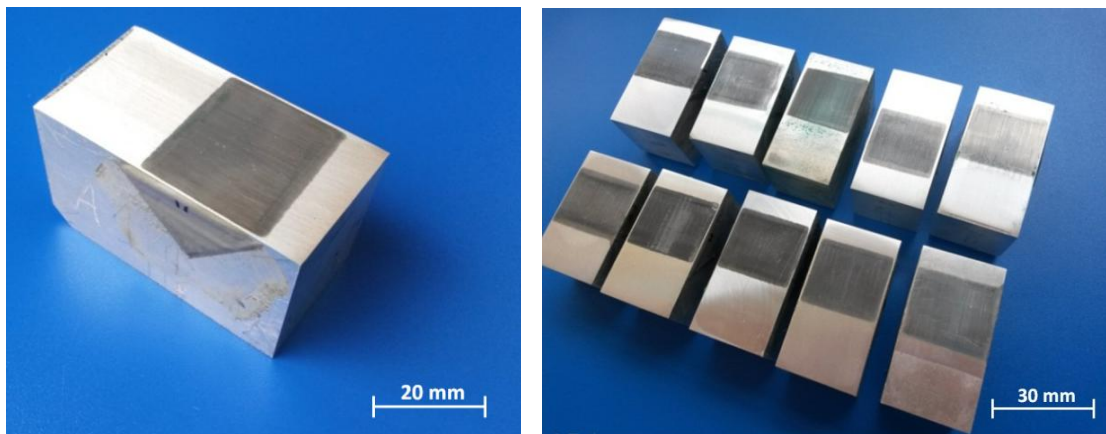
desgaste presentes en el fluido. La caracterización de degradación se realiza mediante espectroscopía FTIR, y la de las partículas de desgaste mediante técnicas ferrográficas. Además, se utilizan técnicas de microscopía óptica y electrónica (SEM) junto con EDS para reconocer elementos en composición de las partículas de desgaste.

*Tabla 5.2: Extracciones realizadas para monitoreo de lubricante y partículas de desgaste.*

Extracciones	
Campo	Acero
1 hora	1 hora
2 horas	2 horas
6 horas	111 horas
fin ensayo	fin ensayo

## 5.5 ANÁLISIS DE LA FISURA

Finalmente, concluido el ensayo, se extrae la probeta, y se la calienta hasta aproximadamente 250°C con el fin de quemar el lubricante en el interior de la fisura. Los restos, junto con los restos de los trazadores, quedan adheridos a la superficie del metal. La Figura 5.13 muestra varias probetas ensayadas listas para el proceso de calentamiento.



*Figura 5.13: Imágenes de las probetas luego de finalizado el ensayo en el tribómetro de contacto de rodadura lineal*

Finalizado el calentamiento, se cubre la probeta mediante una película de Nylon, manteniéndolo en su lugar con una cinta de papel para evitar la contaminación de la fisura con el maquinado posterior (ver Figura 5.14). Luego, se realiza un corte a aproximadamente 3 mm de la cara superior ensayada (corte E-E' en Figura 5.16izq. A)). La Figura 5.15 muestra dos

probetas de 3 mm de espesor listas para proceder a la apertura de la fisura. La probeta es ubicada en un dispositivo hidráulico y utilizando el método de flexión en 4 puntos se realiza la apertura final de la misma para su caracterización. La Figura 5.16 presenta un esquema del corte de la pieza final (izq. A)), un esquema del ensayo de flexión en 4 puntos (izq. B)) y el dispositivo utilizado (der.) y detalle de un ensayo (abajo).

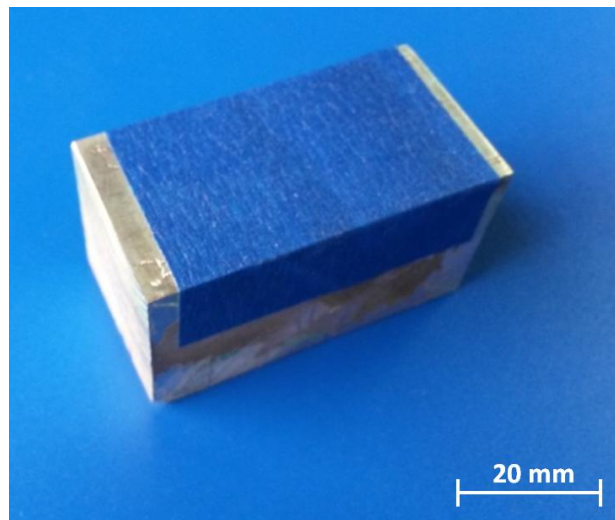


Figura 5.14: Imagen de la probeta con la superficie cubierta para evitar la contaminación del maquinado.

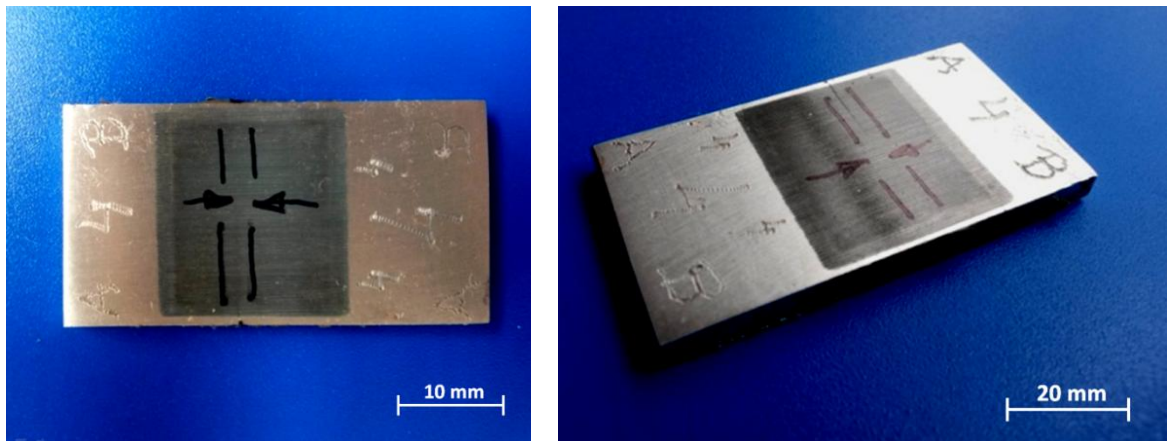


Figura 5.15: Probetas cortadas para proceder a la apertura de la fisura

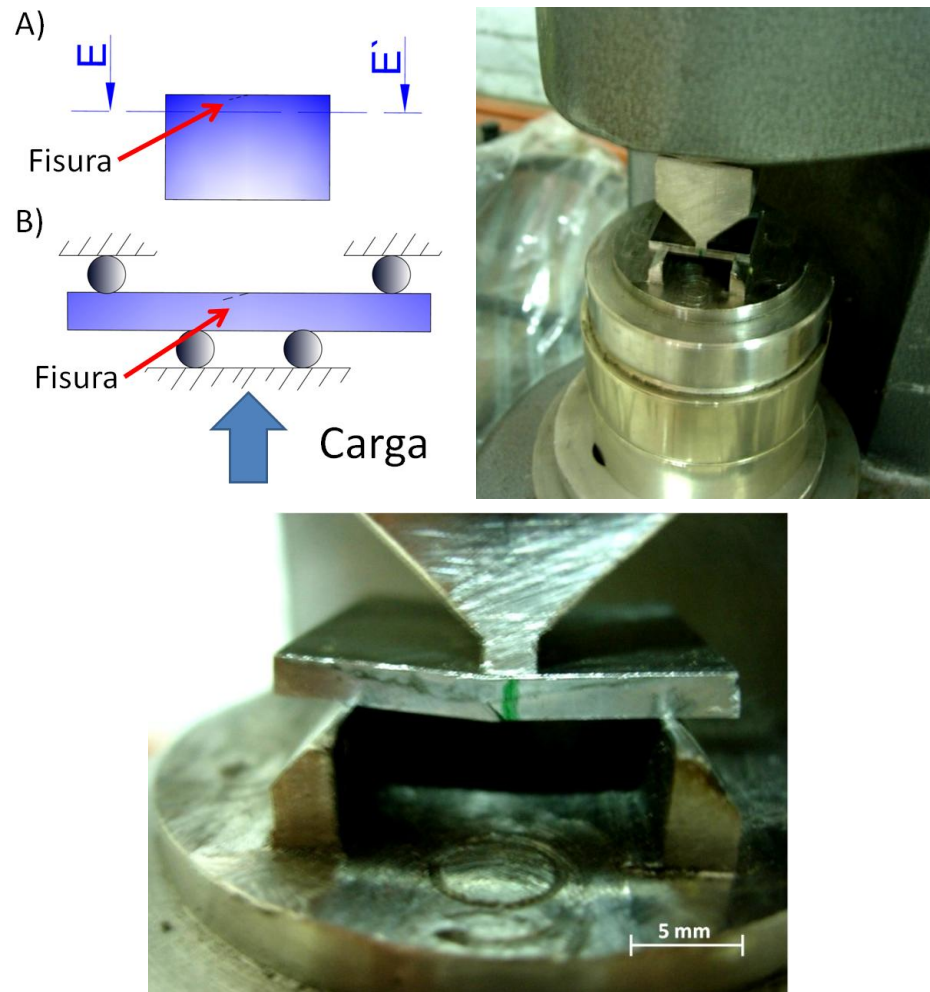


Figura 5.16: Izq.) Esquema del método de apertura de fisura para su observación microscópica posterior con dispositivo utilizado (arriba) y detalle de equipo operando (abajo).

La Figura 5.17 presenta una probeta con las superficies de fisura listas para ser analizadas

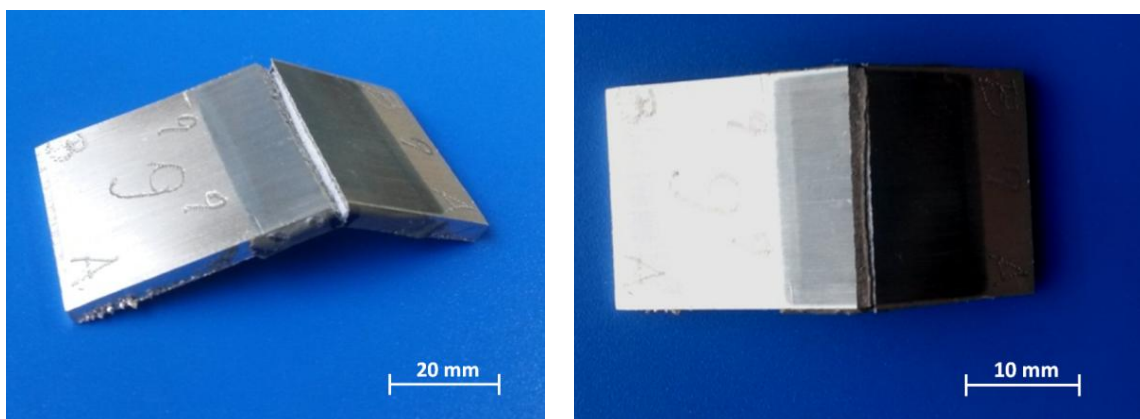


Figura 5.17: Imagen de una probeta con fisura abierta, lista para ser analizada

## 5.6 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LAS TRIBO-SUPERFICIES

Las caras de las superficies de la fisura, como se hace con las superficies de rodadura y las partículas de desgaste, son caracterizadas usando microscopía óptica y electrónica (SEM) sumado a microanálisis de composición química (EDS). La evaluación de las superficies se realiza principalmente en tres zonas. En primera instancia se determina la profundidad de la fisura realizando una medición sobre un plano paralelo a la superficie de crecimiento de fisura, ya que siempre existe un grado de irregularidad característica en las zonas laterales. Luego, se determina la presencia del trazador utilizado para determinar la penetración del líquido lubricante sobre esos sectores.

La Figura 5.18 presenta una probeta antes del ensayo en el tribómetro y luego de cortada y preparada para la caracterización. En ella se identifican las zonas estudiadas, dos laterales, (A) y (C), y una central, (B). Las laterales están ubicadas a 2 mm de los límites de la probeta. Como se puede apreciar, la zona lateral (C) tiene mucha menor profundidad de penetración de fisura que la zona (A). Esta asimetría característica del crecimiento del frente de fisura es más notoria sobre las probetas de aluminio 2005 en comparación con las de acero AISI-SAE 4140.

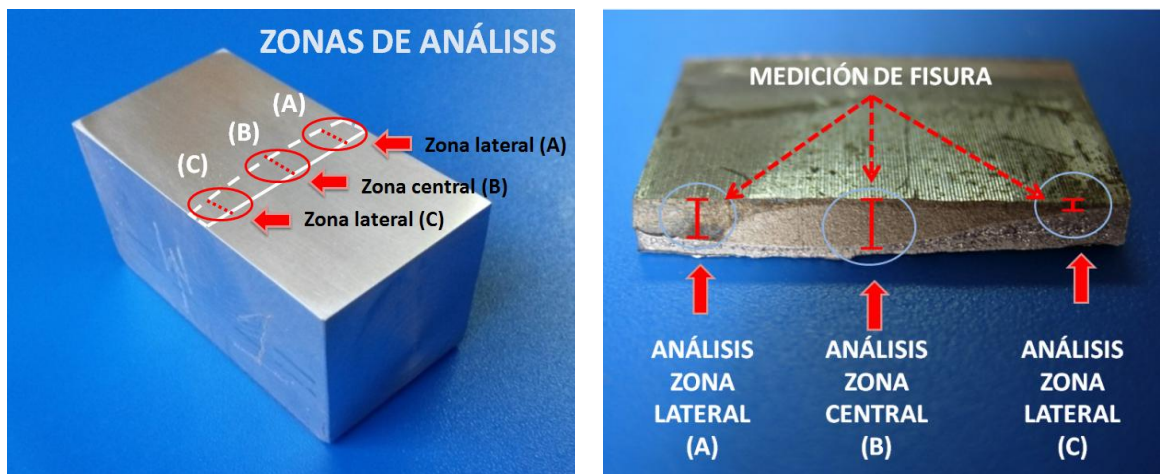


Figura 5.18: Identificación de zonas de análisis y determinación de profundidad de fisura.

## 5.7 REFERENCIAS

- [1] ASTM E399-05 (2005). Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Annual Book of Astm Standards. Philadelphia PA: American Society for Testing and Materials.
- [2] Ipiña, J. P. (2004). Mecánica de Fractura. Alsina, Buenos Aires.



- [3] Anderson, T. L., & Anderson, T. L. (2005). Fracture mechanics: fundamentals and applications. CRC press.

# Capítulo 6

## *Ensayos de contacto puntual: Procedimiento experimental*

---

Los ensayos de contacto puntual se realizaron en un tribómetro especialmente diseñado para estudiar la generación y caracterización de partículas esféricas producidas por rodadura de contacto. Como ya fue mencionado, los trabajos científicos relacionan las partículas planas de gran tamaño, junto con la aparición de gran cantidad de partículas de forma esférica (menores a 12 / 15  $\mu\text{m}$ ) con un indicio característico de degradación de superficies, producto de la rodadura de contacto. Si bien ello se ha sido verificado continuamente, aún quedan algunas dudas sobre el origen de las partículas esféricas. Además, se ha observado que cuando los elementos rodantes o las pistas de rodadura son de aleaciones con cromo en su composición, las partículas esféricas presentes en los ferrogramas revelan la presencia de partículas con y sin cromo en su composición, lo cual genera más interrogantes sobre su formación. En este capítulo se presenta el tribómetro de contacto puntual y la metodología empleada para el estudio.

### **6.1 SUPERFICIES DE RODADURA**

Para los ensayos se utilizaron rodamientos axiales 51101, provenientes de diferentes firmas comerciales, sin la jaula y con bolillas de Nitruro de Silicio. La Figura 6.1 muestra un esquema del rodamiento utilizado, y las Tablas 6.1 y 6.2 muestran las dimensiones y características del rodamiento respectivamente.

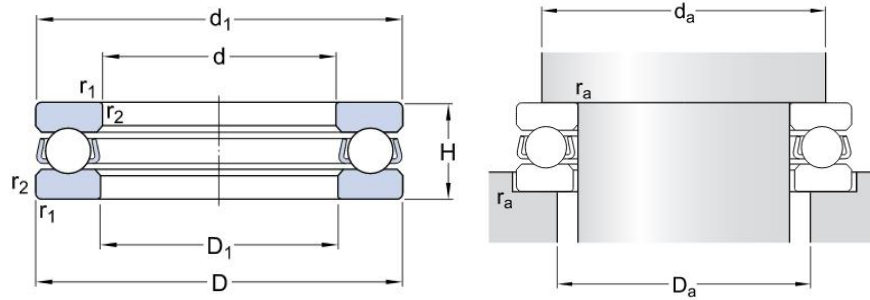


Figura 6.1: Dimensiones de rodamiento axial 51101 [1].

Tabla 6.1: Dimensiones del rodamiento [1].

d			12	mm
D			26	mm
H			9	mm
d <sub>1</sub>	≈		26	mm
D <sub>1</sub>	≈		13	mm
r <sub>1,2</sub>	min.	0.3		mm
d <sub>a</sub>	min.		21	mm
D <sub>a</sub>	max.		17	mm
r <sub>a</sub>	max.	0.3		mm

Tabla 6.2: Características del rodamiento 51101 [1].

Capacidad de carga dinámica	C	10.4	kN
Capacidad de carga estática	C <sub>0</sub>	16.6	kN
Carga limite de fatiga	P <sub>u</sub>	0.62	kN
Velocidad máxima		13000	r/min

Un requerimiento importante a la hora de comenzar los ensayos es tener superficies de contacto sin defectos, para poder realizar un análisis minucioso del origen de las partículas. Esto involucra tanto a las bolillas, como así también las pistas de rodadura, logrando contrastar la aparición de partículas de desgaste con la degradación de las superficies. Uno de los primero inconvenientes encontrados, en este sentido, es la existencia de defectos superficiales en las bolillas (ver Figuras 6.2 y 6.3). Explorando las pistas de rodadura, se notó algo similar, pequeños defectos superficiales del proceso de fabricación (ver Figuras 6.4 y 6.5). Además, se analizaron esferas para uso en rodamientos de diferentes fabricantes, sin obtener la terminación superficial que se deseaba (ver Figura 6.6).

### 6.1.1 Esferas de rodamientos comerciales

En la Figura 6.2 se presentan imágenes de las esferas de rodamientos convencionales del tipo 51101, donde se observa gran cantidad de defectos de fabricación. Sobre la imagen, se colocaron algunas flechas que marcan pits hallados en las esferas.

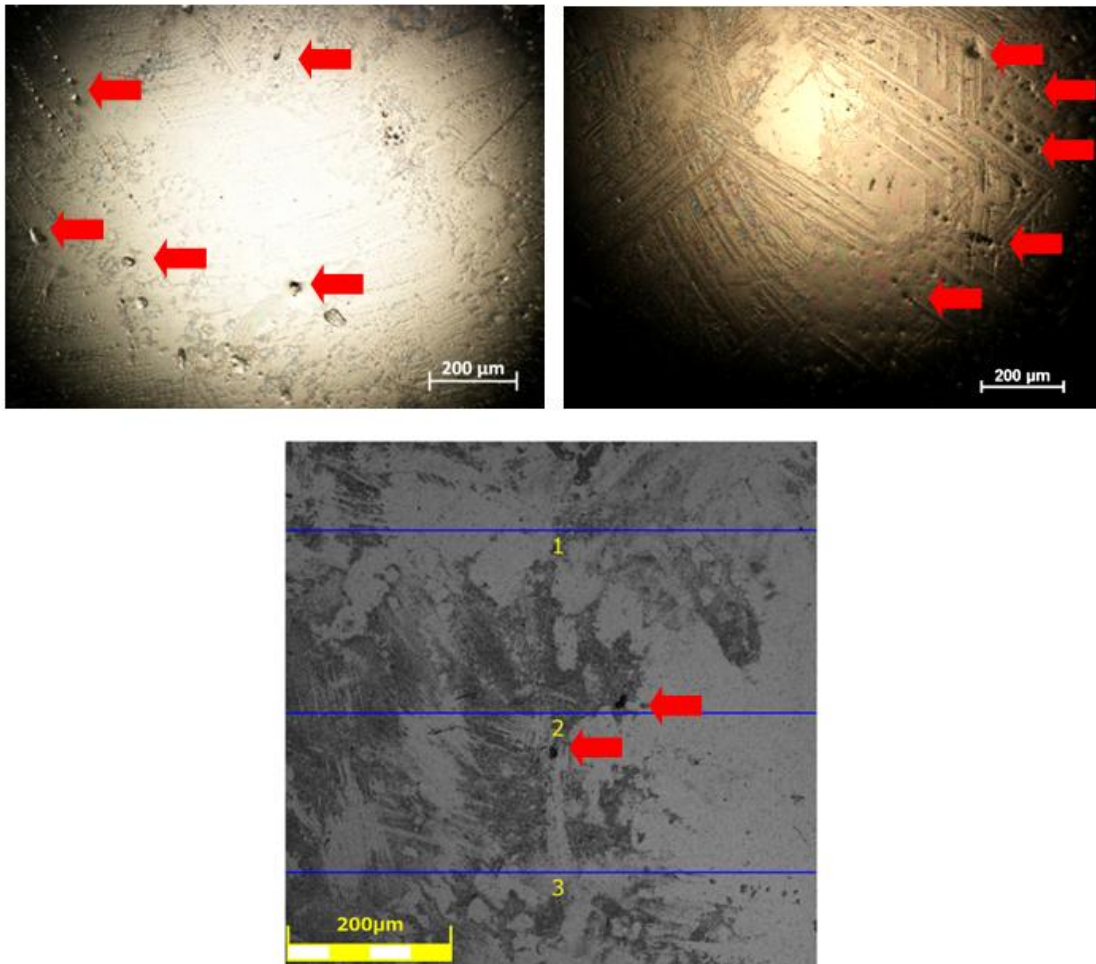
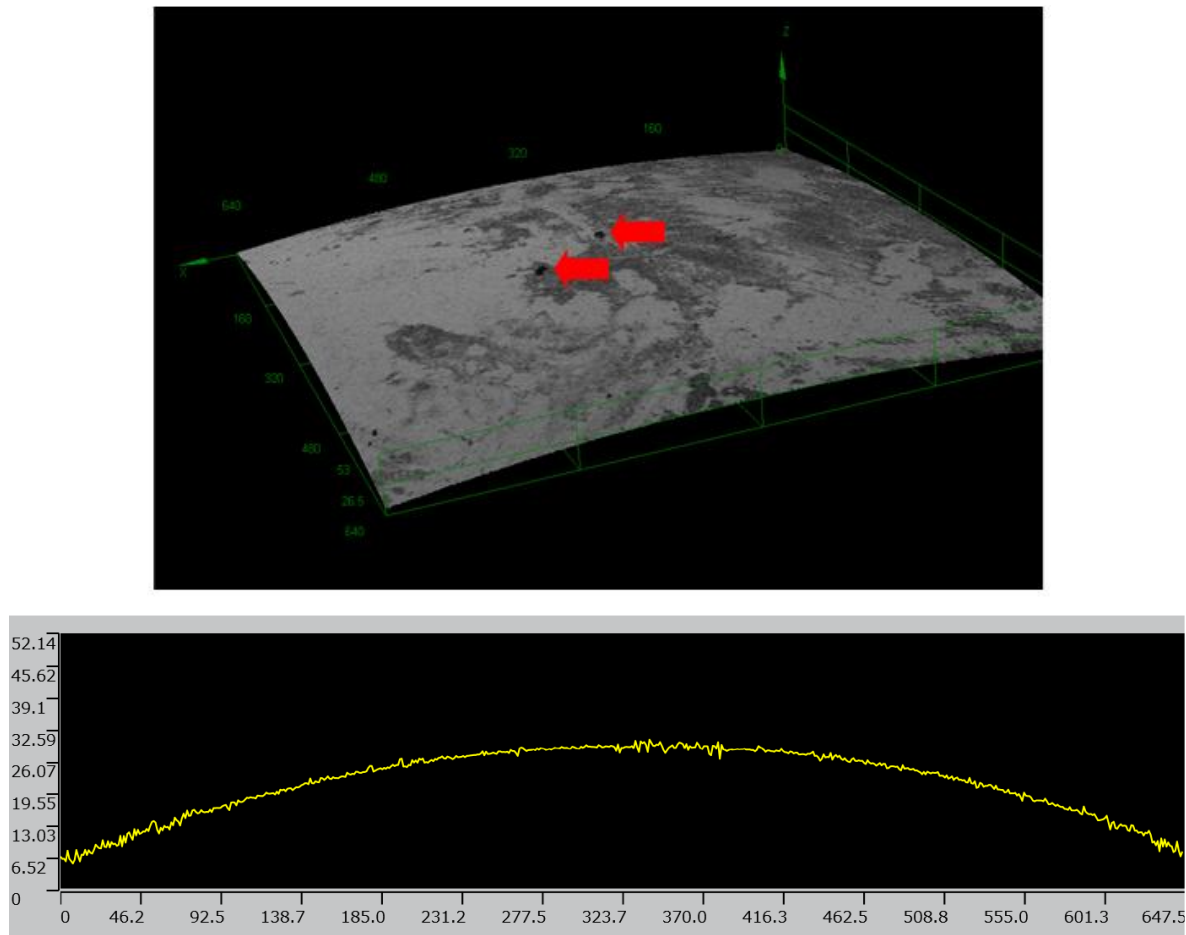


Figura 6.2: Superficies de los elementos rodantes de rodamientos nuevos. Imágenes de microscopía óptica (arriba) y confocal láser 100x (abajo).

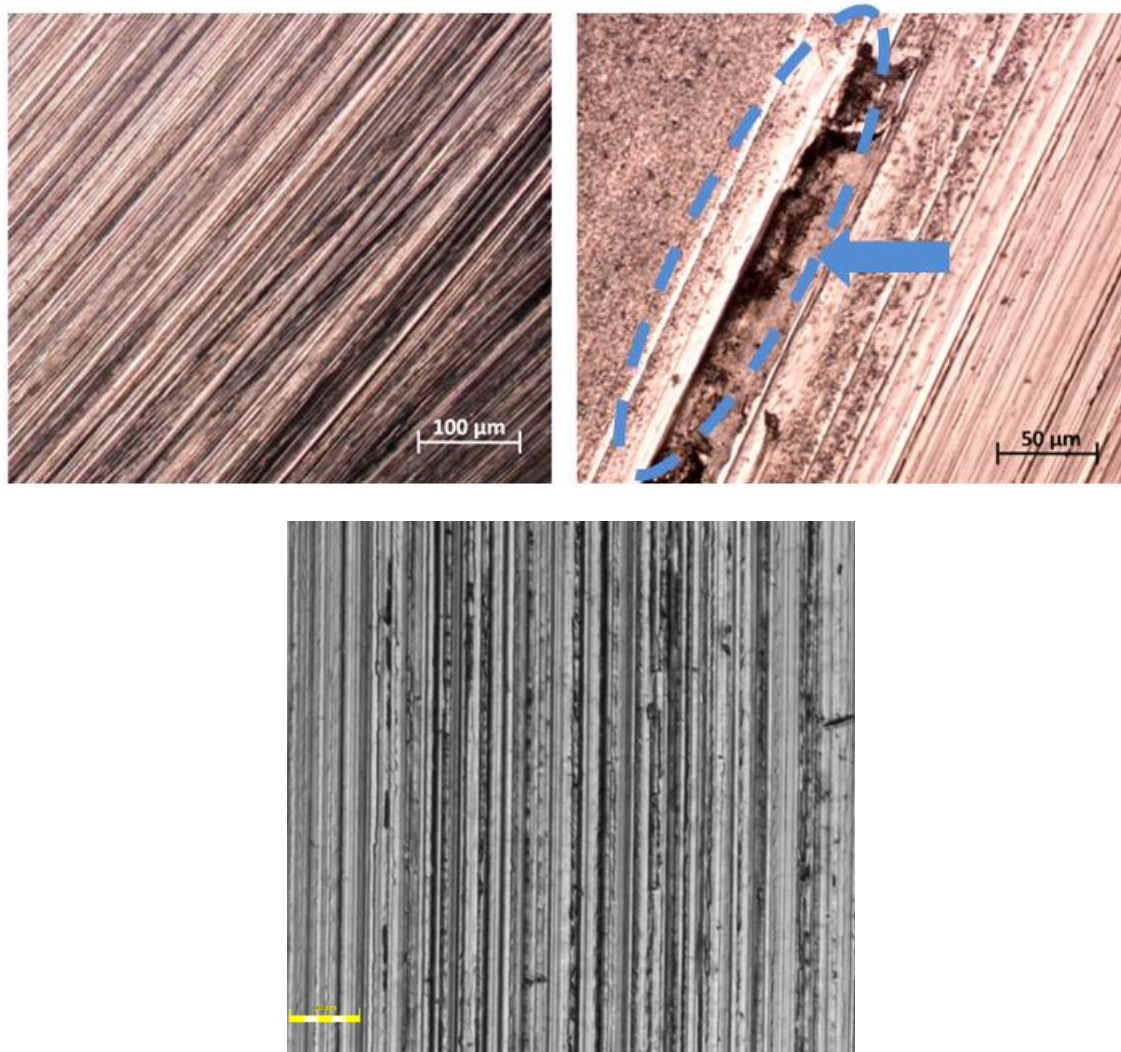
Las Figura 6.3 muestra imágenes obtenidas con microscopia confocal, donde se aprecia la gran cantidad de imperfecciones tanto en el perfil superficial realizado en una línea, como en un área. Las flechas marcan algunas imperfecciones puntuales. Estas imperfecciones inhabilitan el estudio de la generación de partículas.



*Figura 6.3: Perfil superficial de la esfera realizado con microscopia láser confocal sobre un área (arriba) y una línea (abajo).*

### 6.1.2 Pistas de rodamientos comerciales

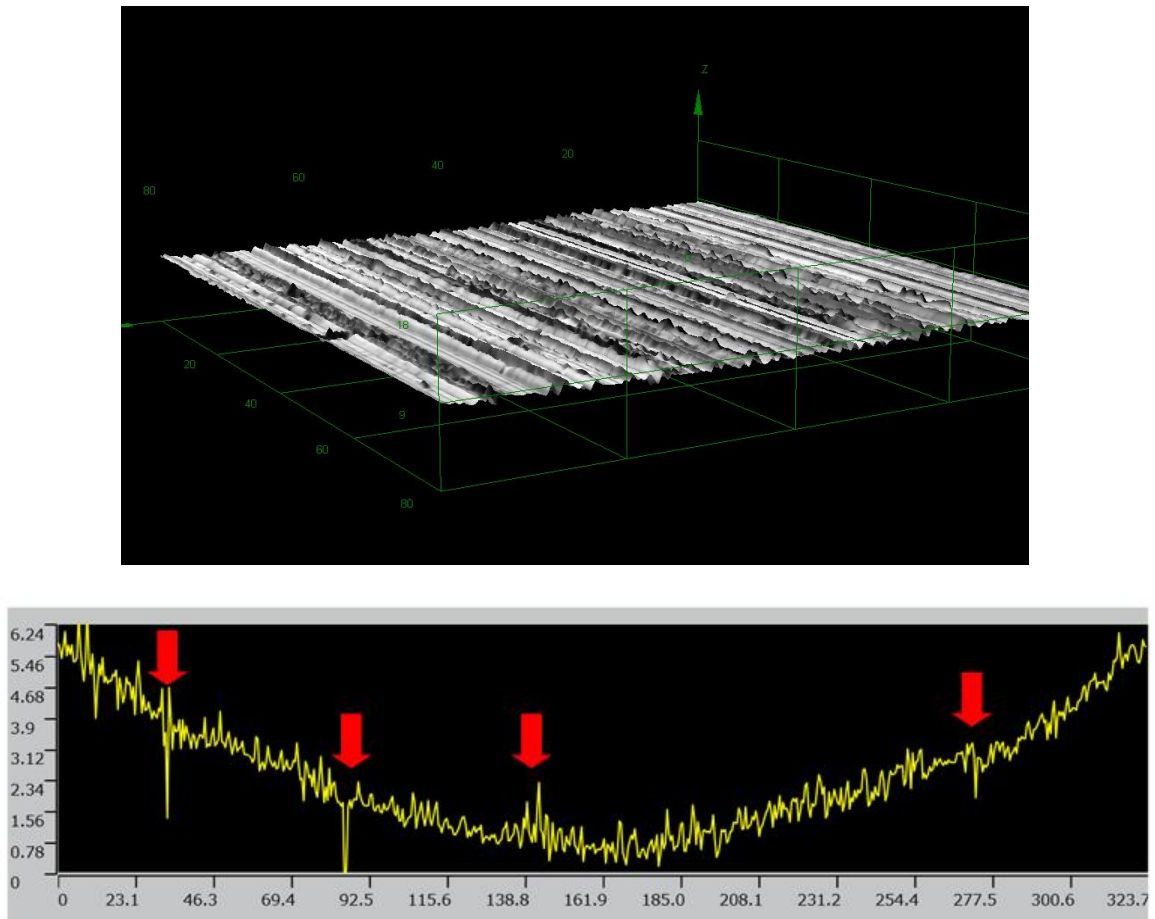
En la Figura 6.4 se presentan imágenes de las pistas de rodamientos convencionales del tipo 51101, donde se observan algunos defectos de fabricación. Sobre la imagen, se muestra un área que contiene defectos superficiales. Estas imperfecciones inhabilitan el estudio de la generación de partículas.



*Figura 6.4: Imágenes de microscopio óptico (arriba) y confocal (abajo) de las superficies rodantes de rodamientos sin usar, con surcos propios del proceso de pulido. Sup. izq.: 200x; sup. der.: 500x, con defectos; inf.: 1000x (barra: 10 mm).*

Las Figura 6.5 muestra los perfiles realizados con microscopía confocal, donde se aprecia una elevada rugosidad superficial en comparación con los elementos rodantes analizados, y la presencia de algunos defectos superficiales destacados en el perfil lineal. Nuevamente, la presencia de imperfecciones sumado a la alta rugosidad de las pistas inhabilitan el estudio de la generación de partículas.





*Figura 6.5: Perfil superficial de la pista de rodadura realizado con microscopía láser confocal sobre un área (arriba) y una línea (abajo).*

### **6.1.3 Esferas sueltas para elementos rodantes de uso múltiple**

Dada la calidad superficial de las esferas de los rodamientos comerciales analizados, se decidió intentar con esferas sueltas para uso en rodamientos de diferentes fabricantes. Su análisis mostró la existencia de defectos aún más significativos a los encontrados en las esferas de rodamientos 51101. La Figura 6.6 muestra imágenes de microscopía óptica donde se observa una gran cantidad de pits superficiales.

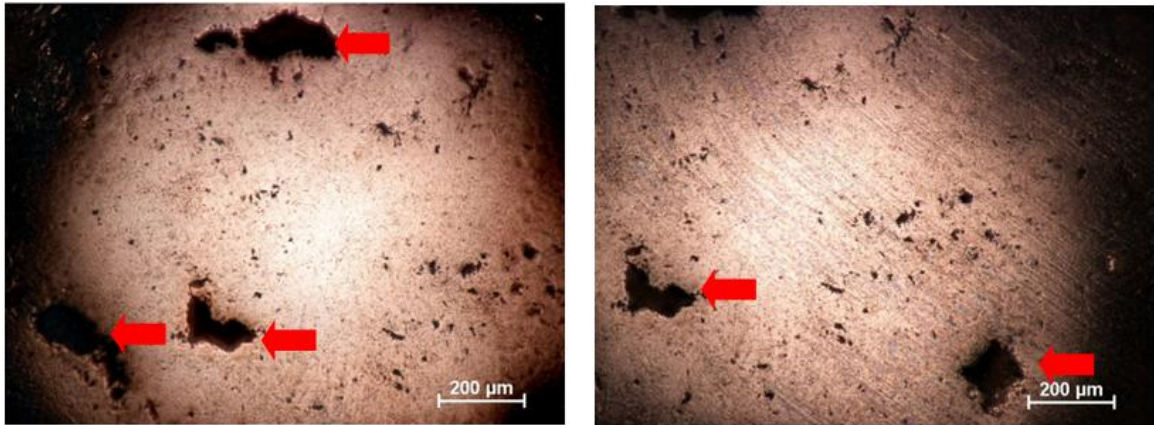


Figura 6.6: Superficies de los elementos rodantes adquiridos comercialmente (100x).

#### 6.1.4 Esferas de rodamientos híbridos (nitruro de silicio)

Siguiendo con la búsqueda de esferas de superficies con mínima cantidad de defectos, se analizaron esferas de nitruro de silicio, pertenecientes a rodamientos híbridos. Estas resultaron tener una mejor terminación superficial (ver Figura 6.7). Además, el uso de estas esferas tiene la ventaja de permitir determinar la procedencia de las partículas de desgaste con más precisión ya que, al ser cerámicas, sus elementos en composición se distinguen fácilmente del acero proveniente de las pistas.

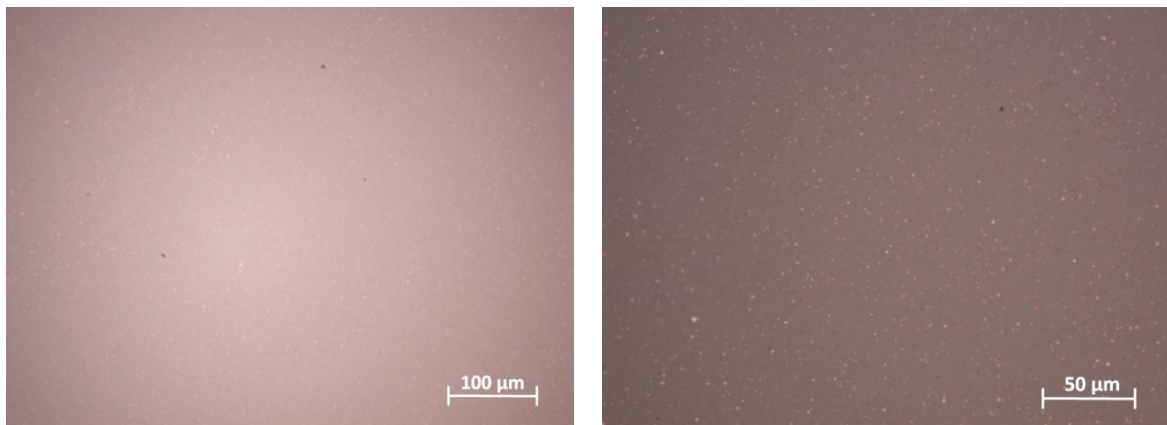


Figura 6.7: Superficies de elementos rodantes de nitruro de silicio obtenidas por microscopía óptica (izq.:200x; der.:500x).

#### 6.1.5 Mejora superficial de las pistas de rodadura

Dada la calidad superficial de las pistas de rodamientos comerciales (vista en la Figura 6.4) se decidió utilizar un proceso de pulido para mejorarlas, obteniendo superficies con mejor



terminación. Para ello, las pistas fueron pulidas mediante papeles abrasivos hasta una granulometría 2500 para luego realizar un acabado con pasta de diamante 6  $\mu\text{m}$ . La Figura 6.8 permite observar las pistas antes (izq.) y después del proceso de pulido (der.). La terminación superficial luego del pulido presenta una rugosidad  $S_a$  de aproximada de 0,040  $\mu\text{m}$  (ver Figuras 6.9 y 6.10). La Figura 6.9 presenta imágenes de microscopía óptica y confocal mostrando la terminación superficial de las pistas de rodadura obtenida luego del proceso de pulido. Se puede observar que las superficies están libres de defectos, permitiendo la clara evaluación de los cambios morfológicos con el transcurso del ensayo de contacto puntual.

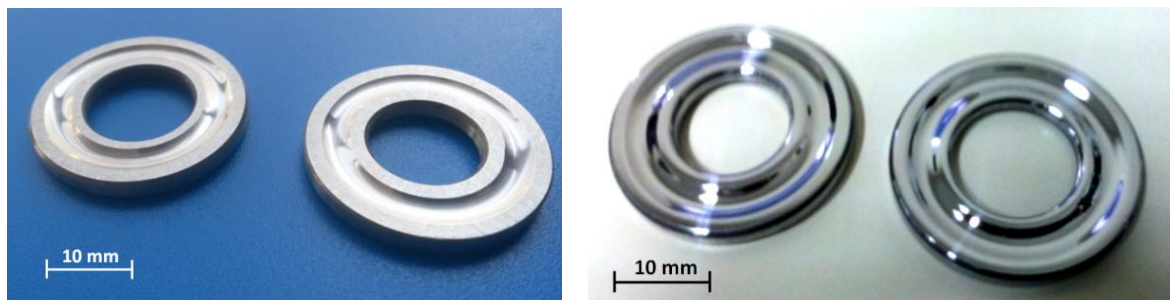


Figura 6.8: Pistas de rodadura antes (izq.) y después del pulido (der.).

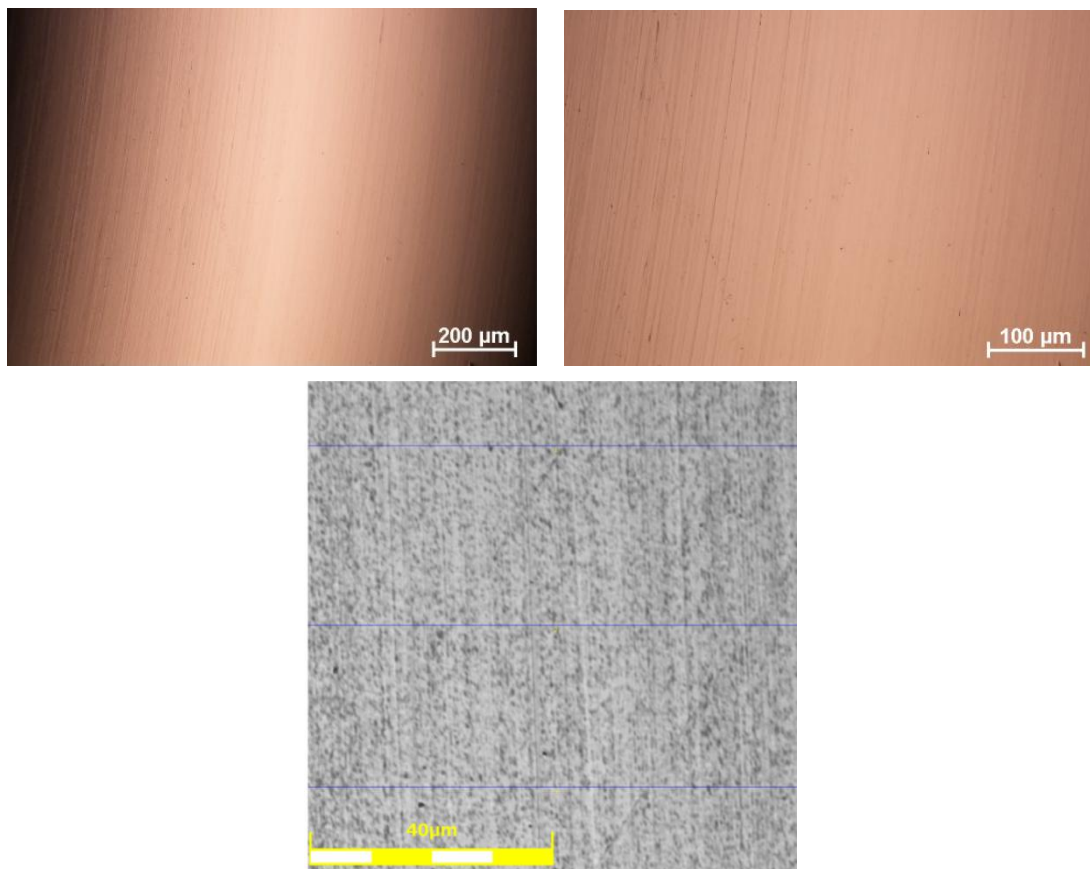


Figura 6.9: Superficies rodantes del rodamiento luego del proceso de pulido. Imágenes de microscopía óptica (arriba, 100x y 200x) y laser confocal (abajo, 1000x).

La Figura 6.10 muestra los perfiles obtenidos con microscopía confocal, donde se aprecia la baja rugosidad superficial y la falta de defectos en comparación con la de la pista antes del proceso de pulido.

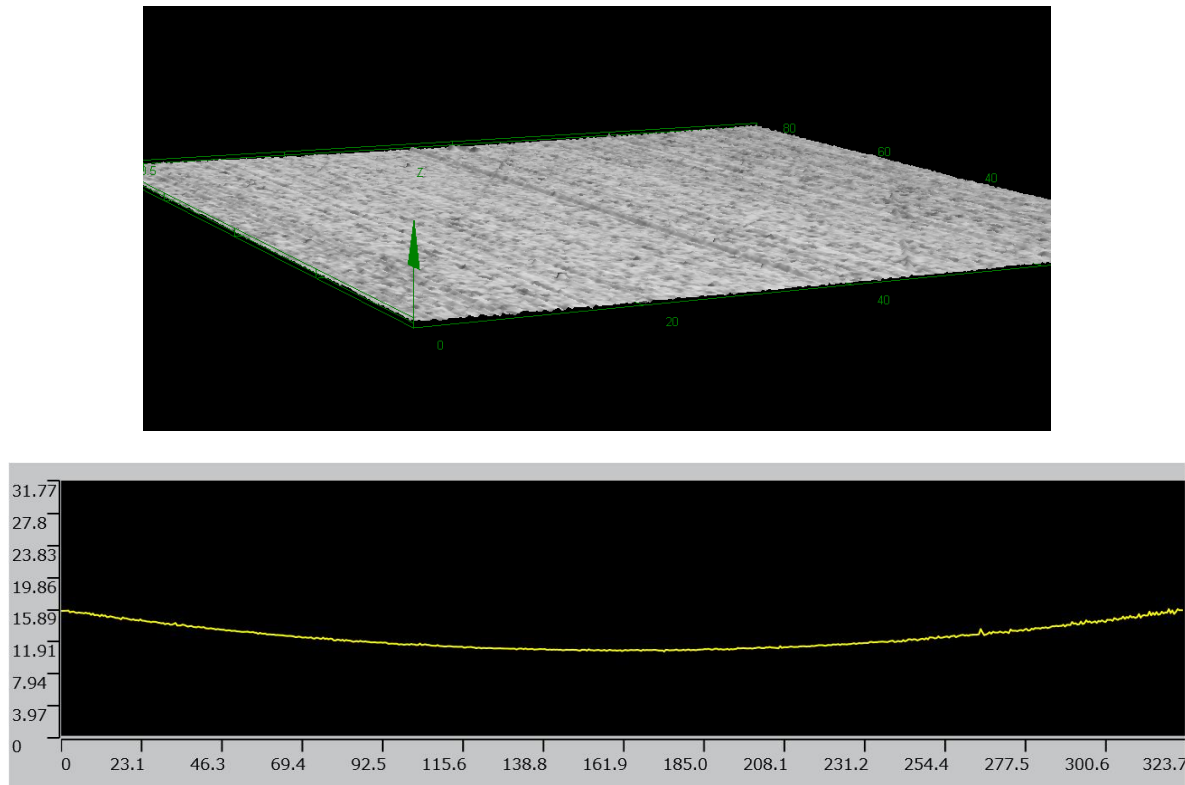


Figura 6.10: Perfil superficial de la pista de rodadura luego de la etapa de pulido realizado con microscopía láser confocal sobre un área (Sup.) y una línea (Inf.).

## 6.2 CARACTERIZACION DE LAS SUPERFICIES RODANTES

La Tabla 6.3 lista los parámetros obtenidos al caracterizar la rugosidad de las pistas antes y después del proceso de pulido. Se puede observar la importante disminución de la rugosidad superficial. Las mediciones se realizaron con microscopía láser confocal sin contacto, en un área de evaluación de:  $78 \times 78 \mu\text{m}$ , y un Cut-off  $\lambda_c$  25 mm.

Al igual que para las pistas, también se realizaron mediciones de rugosidad a las esferas de nitruro de silicio y acero. Las diferencias en el acabado superficial resultan considerablemente diferentes. Si bien la mejoría ya fue observada en las imágenes de microscopía y los perfiles superficiales, la cuantificación denota una importante diferencia de los parámetros de

rugosidad (ver Tabla 6.4). Para los elementos rodantes se utilizó un área de evaluación de:  $150 \times 150 \mu\text{m}$  y un Cut-off  $\lambda_c 25 \mu\text{m}$ .

Tabla 6.3: Parámetros de rugosidad superficial de las pistas de rodadura.

Parametro	Pistas	
	Nueva	Pulida
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	0.204	0.047
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	2.995	1.713
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	0.27	0.073
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	1.633	1.158
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	1.361	0.555

Tabla 6.4: Parámetros de rugosidad superficial de las esferas de rodadura.

Parámetro	Esfera	
	Acero	Nitruro de silicio
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	0.509	0.040
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	4.252	2.054
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	0.751	0.059
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	1.569	1.352
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	1.967	0.702

### 6.3 TRIBÓMETRO DE CONTACTO POR RODADURA LINEAL

Los ensayos se realizaron en ensayos de contacto tribológico por rodadura con lubricación marginal que fue especialmente diseñado. Un esquema del mismo se presenta en la Figura 6.11. El dispositivo fue realizado íntegramente de aleación CAMPLO 2005 T3, con el fin de poder identificar cualquier contaminante en el lubricante proveniente del dispositivo y no de la probeta en estudio (ver Figura 6.12). El movimiento fue aplicado por un motor de  $\frac{1}{2}$  HP a 1500 RPM mediante un sistema de poleas, obteniendo una velocidad final de 2100 RPM. La carga se aplica mediante un sistema de palancas. Durante los ensayos se utilizó una carga normal aplicada de 100N.

Como ya se mencionará, se utilizaron rodamientos axiales de bolas 51101 empleando pistas de acero AISI 52100 y esferas de nitruro de silicio  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Las pistas de rodadura fueron lubricadas con vaselina líquida, la cual fue previamente micro-filtrada con membrana de  $5 \mu\text{m}$ . Las condiciones del ensayo fueron seleccionadas para producir la interacción de las micro-asperezas, es decir, un espesor de película lubricante  $\lambda < 3$ .

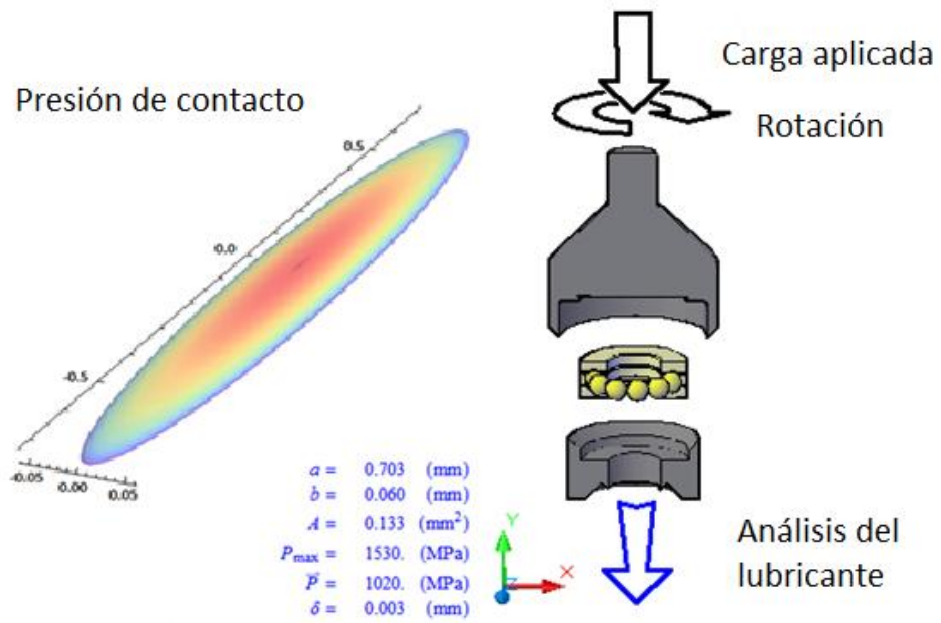


Figura 6.11: Esquema del tribómetro de contacto puntual con la presión de contacto para una carga de 100 N.



Figura 6.12: Rodamiento montado en el tribómetro de contacto puntual.

#### 6.4 ANÁLISIS DEL LUBRICANTE

Durante los ensayos, periódicamente se extraen muestras de lubricante (ver Tabla 6.5). Las muestras son utilizadas para analizar la degradación del lubricante mediante FTIR y para la

detección y análisis de partículas de desgaste presentes en el fluido mediante técnicas ferrográficas.

*Tabla 6.5: Extracciones realizadas para monitoreo de lubricante y partículas de desgaste.*

	Extracciones	Periodo
Asentamiento	c/ 15 min	primeros 120 min
Etapa estacionaria	c/ 180 min	hasta el final
Detección de fisuras	al finalizar	

## 6.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS TRIBO-SUPERFICIES

La morfología de las superficies de rodadura y las partículas de desgaste se analizan empleando microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM), sumado a microanálisis de composición química puntual (EDS). Las superficies de rodadura son además observadas mediante microscopía láser para realizar la medición de rugosidad de las pistas y los elementos rodantes. Se utilizan los mismos parámetros ya descritos para la caracterización de las superficies iniciales.

Por otra parte, se usa espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS ó ESCA) para analizar los óxidos presentes sobre las superficies de rodadura.

## 6.6 ANÁLISIS LAS PARTÍCULAS DE DESGASTE

El reconocimiento de los elementos presentes en la composición de las partículas de desgaste se realiza usando técnicas de microscopía óptica y electrónica SEM junto con EDS. Además, los óxidos de las partículas de desgaste se caracterizan mediante microscopía RAMAN. El láser utilizado tiene una longitud de onda de 785 nm con diferentes potencias de trabajo y tiempos de exposición. La potencia máxima del láser utilizado es de 300 mW.

## 6.7 REFERENCIAS

- [1] Página web SKF: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/single-direction>

# Capítulo 7

## *Modelización del contacto*

---

El cálculo numérico permite simular el comportamiento de contactos termo-elasto-hidrodinámicos (TEHD) puntuales y lineales, aplicados a los ensayos descritos anteriormente. Como se mencionó en el Capítulo 3, el lubricante entre dos superficies en contacto con movimiento relativo cumple un rol fundamental en el área de la tribología. Para estimar las presiones generadas, el espesor de película lubricante y las temperaturas en el contacto, se plantea la teoría TEHD de contactos lubricados. La resolución de este problema presenta diversas complejidades matemáticas y exige el desarrollo de un elaborado procedimiento de cálculo basado en análisis numérico [1,2]. La teoría TEHD establece los criterios para alcanzar la convergencia de la solución de la ecuación de Reynolds, la deformación elástica en la zona del contacto lubricado y el balance energético del contacto. En este capítulo se presenta el sistema de ecuaciones de balance energético que se resuelve mediante un método numérico. En la actualidad se utilizan técnicas multinivel para la resolución de las ecuaciones, y ésta fue la adoptada en esta tesis [2].

### 7.1 ECUACIONES BÁSICAS

Las ecuaciones básicas para el modelo de contacto TEHD son las ecuaciones de contacto elasto-hidrodinámico sumado a las ecuaciones de energía para dos y tres dimensiones según sea el contacto lineal o puntual (una en la dirección de la velocidad y otra en la dirección del espesor de película lubricante).

En primer lugar se debe mencionar la ecuación de Reynolds, que describe el comportamiento isotérmico a lo largo de un dominio de puntos  $(x,y)$  de la presión  $p(x,y)$  de

un fluido Newtoniano incompresible que fluye a través de un canal de espesor  $h(x,y)$ . La misma depende de las propiedades del fluido, como son su viscosidad y su densidad, y de las condiciones de funcionamiento del contacto que rigen el flujo, como son las velocidades a las que se desplazan las superficies en movimiento relativo.

Al contrario de lo que sucede en la teoría hidrodinámica, y como consecuencia de los altos valores de presión  $p(x,y)$  en el interior de la zona de contacto, la geometría del canal  $h(x,y)$  de los contactos EHD varía en función de las deformaciones elásticas sufridas por los sólidos. Este comportamiento se analiza partiendo de las hipótesis de contacto seco con el desarrollo de una ecuación para el espesor de película que depende de un parámetro  $h_0$  que incluye el efecto del lubricante alojado entre las dos superficies. El ajuste de este parámetro se realiza con la condición de equilibrio de fuerzas, que iguala la integral de la distribución de presiones  $p(x,y)$  a lo largo del canal a la carga normal  $W$  aplicada.

### 7.1.1 Ecuación de Reynolds

La ecuación diferencial de Reynolds (Ec.7.1 para contacto lineal y Ec. 7.2 para contacto puntual) describe el comportamiento de un fluido que se encuentra alojado entre dos superficies en movimiento relativo [3]. La misma se deriva de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo laminar reptante. Concretamente, establece la relación existente entre el perfil de presión  $p$ , espesor de película  $h$ , viscosidad  $\eta$  y densidad  $\rho$  del lubricante y la velocidad media de las superficies  $u$ , en un contacto hidrodinámico [2]. La ecuación de Reynolds se deriva bajo las siguientes suposiciones:

- *el flujo es laminar y continuo,*
- *el fluido es Newtoniano incompresible,*
- *las fuerzas de inercia en el flujo son despreciables frente a las viscosas,*
- *el flujo es isotérmico (viscosidad y densidad constantes en el flujo),*
- *la distancia en dirección  $z$  (espesor de película lubricante) es mucho menor que en las direcciones  $x$  e  $y$ ,*
- *la presión del fluido no depende de la dirección transversal  $z$  (espesor de la película),*
- *la curvatura de las superficies es mucho mayor que el espesor de película, por lo que el análisis se puede realizar en coordenadas cartesianas y considerar que la velocidad de las superficies no cambia de dirección,*
- *el fluido se mantiene adherido a las superficies sólidas y se mueve con ellas, y*



- las dos superficies se desplazan en la misma dirección  $x$ .

### 7.1.2 Ecuación de Reynolds en contacto lineal:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{dp}{dx} \right) = 12 U \frac{d \rho h}{dx} \quad \text{Ecuación 7.1}$$

### 7.1.3 Ecuación de Reynolds en contacto puntual:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{dp}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{dp}{dy} \right) = -12 U \frac{d \rho h}{dx} \quad \text{Ecuación 7.2}$$

donde:

$\rho$  Densidad del lubricante

$\eta$  Viscosidad del lubricante

$U$  Velocidad promedio de las superficies,  $U=(u_1 + u_2)/2$ , siendo  $u_1$  y  $u_2$  las velocidades tangenciales de las superficies de contacto.

$p$  Presión

$h$  Espesor de película lubricante

$x$  e  $y$  Coordenadas: en dirección del movimiento de las superficies ( $x$ ) y perpendicular al movimiento ( $y$ ).

### 7.1.4 Ecuación de energía

La temperatura de la película lubricante es un factor importante que influye en las propiedades de lubricación y, por ende, afecta significativamente la presión y la capacidad de carga. Por otro lado, los cambios en el espesor de película causados por la deformación térmica de las superficies de lubricación también influyen en las propiedades de lubricación. De hecho, una alta temperatura puede causar fallas de lubricación y dañar el material de las superficies, además de disminuir la vida del lubricante. Usualmente, temperaturas de 120 a 140°C son consideradas como límites admisibles para la temperatura en la zona de lubricación. Son muchos los estudios dedicados a analizar el proceso de lubricación TEHD. En particular, Zhu y Wen propusieron en 1984 una solución completa de contacto EHD acoplado con ecuaciones de energía [4]. Las Ecs. 7.3 y 7.4 presentan las ecuaciones de energía lineal y puntual acopladas en la teoría TEHD.

### 7.1.5 Ecuación de energía en contacto lineal:

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left( u \frac{\partial p}{\partial x} \right) - K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \eta \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad \text{Ecuación 7.3}$$

### 7.1.6 Ecuación de energía en contacto puntual:

$$\rho c_p u \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left( u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \eta \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 7.4}$$

donde:

- $T$       Temperatura
- $u$       Velocidad axial de flujo
- $v$       Velocidad transversal de flujo
- $C_p$      Calor específico a presión constante
- $K$       Conductividad térmica
- $z$       Coordenada en la línea del espesor de película

### 7.1.7 Ecuación de espesor de película lubricante

El espesor de película,  $h(x,y)$ , es la separación que se crea por efecto hidrodinámico entre las dos superficies en contacto lubricado. Esta separación depende de la geometría de los cuerpos y de la deformación elástica  $\omega$  que sufren en cada punto a consecuencia de las grandes presiones alcanzadas en el contacto, las propiedades del lubricante y las condiciones de funcionamiento (velocidades relativas, cargas, temperaturas, etc.). En la lubricación EHD, la ecuación de deformación elástica es dependiente del espesor de película lubricante originado [5,6]. En la Figura 7.1 se puede observar una situación en la que un cilindro está en contacto con un plano rígido. El espesor de película lubricante se puede describir con las Ecs. 7.5 y 7.6.

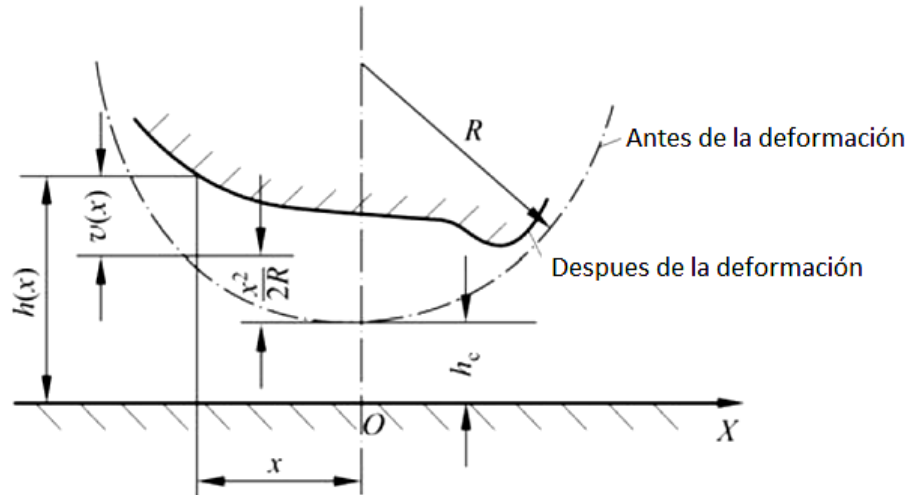


Figura 7.1: Configuración del espesor de la película en contacto lineal

**Ecuación de espesor de película lubricante en contacto lineal:**

$$h(x) = h_c + \frac{x^2}{2R} + w(x) \quad \text{Ecuación 7.5}$$

**Ecuación de espesor de película lubricante en contacto puntual:**

$$h(x, y) = h_0 + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + w(x, y) \quad \text{Ecuación 7.6}$$

donde:

$h_c$  espesor de película lubricante central

$h_0$  Parámetro de espesor de película lubricante

$R$  radio de curvatura equivalente  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

$w(x)$  deformación elástica

**7.1.8 Ecuación de deformación elástica contacto lineal:**

$$w(x) = -\frac{2}{\pi E} \int_{x_0}^x p(s) \ln (s - x)^2 ds + c \quad \text{Ecuación 7.7}$$

donde:

$$E \quad \text{Modulo elástico equivalente } \frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)$$

$\nu_1$  y  $\nu_2$  Módulo de Poisson

$E_1$  y  $E_2$  Módulos elásticos de las dos superficies

$x_0$  Coordenada inicial

$c$  constante de integración

### 7.1.9 Ecuación de deformación elástica para contacto puntual:

$$v(x, y) = -\frac{2}{\pi E} \iint_{\Omega} \frac{p(s, t)}{\sqrt{(x-s)^2 + (y-t)^2}} ds dt \quad \text{Ecuación 7.8}$$

donde:

$\Omega$  Dominio del contacto

#### 7.1.10 Características del lubricante en contactos EHD

En los contactos EHD, como, por ejemplo rodamientos de bolas o engranajes, el rango de las condiciones de funcionamiento es muy amplio, llegándose a alcanzar presiones de 3 GPa. Bajo estas sollicitaciones, los lubricantes sufren grandes modificaciones en su estructura molecular: orientación, deformación, extensión o desaglomeración, que tienen un efecto directo sobre sus propiedades reológicas, afectando así a su funcionalidad [7-9]. Las dos propiedades más importantes de los lubricantes para el estudio de un contacto EHD son su viscosidad y su densidad. También se incluyen las propiedades térmicas para el estudio térmico del contacto. Los resultados presentados en esta tesis se han obtenido para propiedades del lubricante bajo condiciones de óptimo funcionamiento, es decir, no se han tenido en cuenta fenómenos de degradación del mismo.

#### 7.1.11 Relación viscosidad-presión en lubricantes

A medida que la presión incrementa, la distancia entre las moléculas de un lubricante líquido disminuye y, consecuentemente, la viscosidad se incrementa. Generalmente, los cambios de la viscosidad debidos a la presión resultan significativos cuando la presión excede los 0.02 GPa. Además, la velocidad con que aumenta también varía con la presión. De hecho,

la viscosidad de un lubricante bajo una presión de 1 GPa puede llegar a ser varios órdenes de magnitud mayor a que a presión atmosférica. Cuando la presión es aún mayor, los aceites minerales pierden la naturaleza del estado líquido, cambiando a un estado sólido ceroso "waxy-solid" [1]. Por lo mencionado, en la lubricación EHD, la relación presión-viscosidad juega un papel muy importante.

Existen varias ecuaciones, debidas a distintos autores, que permiten describir el comportamiento del lubricante en relación con la viscosidad y presión. Entre ellas se puede mencionar las de Barus, Cameron, Roelands, entre otras. La ecuación propuesta por Barus [10] logra una muy buena aproximación a bajas presiones. Sin embargo, como las presiones generadas en los ensayos tribológicos realizados son elevadas, se decidió utilizar la ecuación propuesta por Roelands [11], Ecs. 7.9 y 7.10, ya que la misma logra mejores predicciones a altas presiones.

#### ***Ecuación de Roelands en contacto lineal:***

$$\eta = e^{-\beta T} \exp\{(\ln \eta_0 + 9.67)[(1 + 5.110^{-9}p)^z - 1]\} \quad \text{Ecuación 7.9}$$

#### ***Ecuación de Roelands en contacto puntual:***

$$\eta = e^{-\beta T} \exp\left\{(\ln \eta_0 + 9.67) \left[ (1 + 5.110^{-9}p)^{cz} \left( \frac{T - 138}{T_0 - 138} \right) - 1 \right] \right\} \quad \text{Ecuación 7.10}$$

donde:

$\eta_0$  viscosidad del lubricante a  $p=0$  y  $T=T_0$

$b$  constante de dependencia de la viscosidad con la temperatura

$cz$  coeficiente de dependencia de la viscosidad con la presión.

Para la dependencia de la densidad con la presión y la temperatura se usa la siguiente relación [1]:

#### ***7.1.12 Ecuación de densidad para contacto lineal y puntual:***

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \frac{0.6p}{1 + 1.7p} + D(T - T_0) \right] \quad \text{Ecuación 7.11}$$

donde:

$\rho_0$  densidad del lubricante a  $p=0$

$p$      presión  
 $D$       $0.00065K^{-1}$

## 7.2 DIAGRAMA DE BLOQUE SIMPLIFICADO PARA EL CONTACTO TEHD PUNTUAL Y LINEAL

Como ya se ha mencionado anteriormente, la deformación elástica de las superficies en contacto, la temperatura y la viscosidad dependen de la presión (a través de las ecuaciones correspondientes). Por ello, el primer paso en la obtención de la solución general es plantear una distribución inicial de presión (distribución de presión Hertziana) y una distribución inicial de temperatura (distribución de temperatura constante) y calcular con ellas las distribuciones iniciales de espesor de película y viscosidad. A continuación se sustituyen los datos obtenidos al resolver la ecuación de Reynolds para obtener una nueva distribución de presión que se ingresa a la ecuación de energía para realizar una corrección en la distribución de temperatura. La nueva distribución de temperatura se utiliza como entrada para calcular una nueva viscosidad. De esta manera, tomando como referencia la distribución de presión antes resuelta, se realiza un cálculo iterativo de la deformación elástica y el espesor de película. La operación se repite hasta que las diferencias de presión entre dos resultados consecutivos sea menor que un valor de error dado. Así se obtienen las distribuciones de presión, temperatura y espesor de película lubricante final [1]. El esquema de cálculo descrito se representa en el diagrama de flujo de la Figura 7.2.

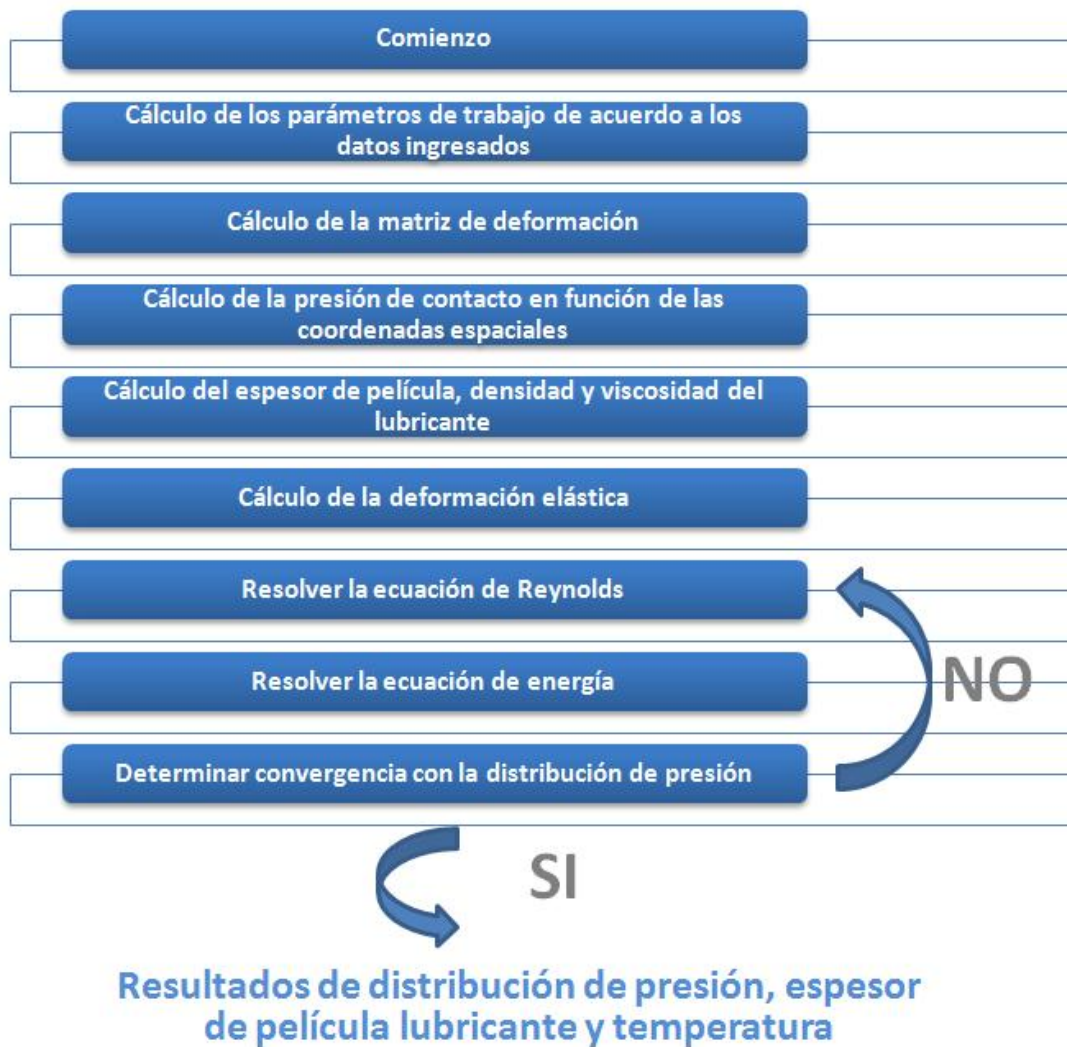


Figura 7.2: Diagrama de bloque simplificado para obtener las distribuciones de presión, temperatura y espesor de película lubricante en contacto TEHD puntual y lineal

### 7.3 REFERENCIAS

[1] Huang, P. (2013). Numerical Calculation of Lubrication: Methods and Programs. John Wiley & Sons.

[2] Venner, C. H., & Lubrecht, A. A. (Eds.). (2000). Multi-level methods in lubrication (Vol. 37). Elsevier.

[3] Reynolds, O. (1886). On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. Proceedings of the Royal Society of London, 40(242-245), 191-203.

[4] Zhu, D., & Wen, S. Z. (1984). A full numerical solution for the thermoelastohydrodynamic problem in elliptical contacts. Journal of tribology, 106(2), 246-254.

[5] Peppler, W. (1935). Untersuchungen über die Druckübertragung bei belasteten und geschmierten umlaufenden Achsparallelen Zylindern. Maschinenelemente—Tagung Aachen. Berlin, Vol. 42.

[6] Meldahl, A. (1941). Contribution to the Theory of the Lubrication of Gears and of the Stressing of the Lubricated Flanks of Gear Teeth. Brown Boveri Rev, 28(11), 374-382.



- 
- [7] Bair, S. S. (2007). High pressure rheology for quantitative elastohydrodynamics (Vol. 54). Elsevier.
- [8] Gatcombe, E. K., (1945), Lubrication Characteristics of Involute Spur Gears-A Theoretical Investigation, Trans. ASME, 67, pp. 177–185.
- [9] Blok, H., (1950), Fundamental Mechanical Aspects of Thin Film Lubrication, Ann. N.Y. Acad. Sci., 53, p. 779–804.
- [10] Barus, C. (1893). Isothermals, isopiestic and isometrics relative to viscosity. American Journal of Science, (266), 87-96.
- [11] Roelands, C. J. A. (1966). Correlational aspects of the viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology).

# Capítulo 8

## *Resultados contacto puntual*

---

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de fatiga de contacto puntual. También se incluyen los resultados de los modelos TEHD y la determinación del parámetro lambda para cada estadio del ensayo de rodadura puntual. En cada etapa de desgaste, se analiza la morfología de los elementos rodantes y los caminos de rodadura conjuntamente con el análisis de las partículas esféricas generadas. Asimismo también se propone una teoría sobre la formación para las partículas de desgaste esféricas a partir de la discusión de los resultados obtenidos, y la misma es contrastada con teorías elaboradas por otros autores.

### 8.1 CALCULOS TEHD DE CONTACTO PUNTUAL

#### 8.1.1 *Contacto sin lubricación. Teoría de Hertz y validación con elementos finitos*

Para poder realizar los cálculos TEHD de contacto puntual, primero se calculan las presiones de contacto en el rango elástico usando la teoría de Hertz [1-2] y elementos finitos [3]. Luego, los resultados obtenidos son utilizados como parámetros de inicio en los modelos TEHD (previamente descritos en el capítulo 5) con el fin de reducir el tiempo de convergencia. Mediante el uso del modelo, se pudo estimar el espesor de película lubricante generado, la presión de contacto modificada y la distribución de temperatura sobre la superficie del contacto lubricado.

Los parámetros más relevantes del contacto, como resultado de la teoría de Hertz se presentan en la tabla 8.1.

Tabla 8.1: Resultados de los parámetros del contacto según la teoría de Hertz.

a	Direc. de transversal	0.601	[mm]
b	Direc. de desplazamiento	0.052	[mm]
A	Área de contacto	0.098	[mm <sup>2</sup> ]
P <sub>max</sub>	Presión máxima	1540	[MPa]
P <sub>prom</sub>	Presión promedio	1030	[MPa]
δ	Deformación	0.002	[mm]

La distribución de contacto resultante posee forma elíptica, tal como se observa en la Figura 8.1, la cual es el resultado del modelado mediante elementos finitos. Los resultados son comparativamente semejantes con lo calculado según Hertz. Asimismo puede observarse en la Figura 8.1 que la elipse de presión de contacto no está perfectamente centrada sobre el camino de rodadura de la pista. Esta desviación, se debe a un error generado en el modelo causado por una simplificación en la aplicación de la carga. Al aplicar una carga distribuida sobre una porción de la pista, la cual no es simétrica, se produce un pequeño desbalance de la presión, que promueve este error en el resultado. Esta condición puede resolverse mediante un análisis sobre la totalidad de la pista (con mayor costo computacional), o modificando la distribución de la carga. A los fines numéricos, esto prácticamente no afecta los valores de presión promedio y máxima de interés en el presente estudio.

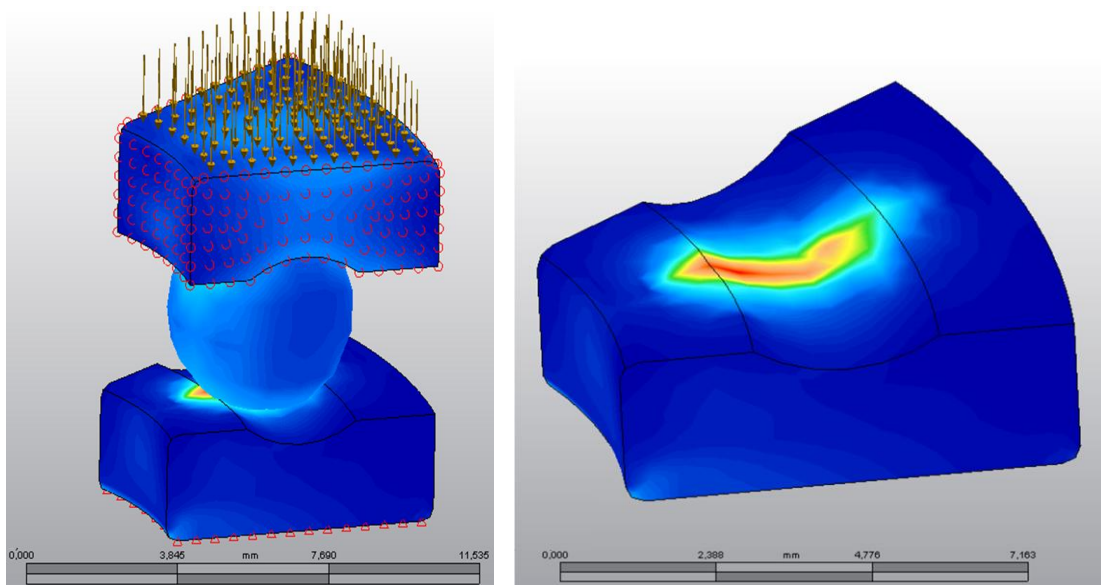


Figura 8.1: Resultados del contacto mediante la simulación por elementos finitos [3].

### 8.1.2 Resultados del modelo TEHD de contacto puntual

Los resultados obtenidos de la presión de Hertz se utilizaron como base para los cálculos TEHD. En las Figuras 8.2 y 8.3 se puede observar los resultados del espesor de película lubricante resultante y la presión generada durante el contacto. La Figura 8.4 muestra el resultado sobre la línea central de contacto. En el análisis de la Figura 8.4 (Izq.) el pico de presión propio de la rodadura con lubricación es prácticamente despreciable para las condiciones del ensayo de contacto puntual. Este resultado es muy satisfactorio, ya que al ser prácticamente despreciable, la máxima presión de contacto es equivalente a la calculada por Hertz, sin la distorsión producida por una variable adicional en el estudio.

De acuerdo a los resultados, el espesor de película lubricante mínimo es de  $0.064 \mu\text{m}$  para las condiciones ensayadas. Asimismo, el valor de máxima presión de contacto máxima es de  $1575 \text{ MPa}$  para las condiciones ensayadas. Como se observa de la comparación, se tiene una pequeña variación respecto del cálculo de Hertz (aproximadamente  $35 \text{ MPa}$ ) debido a la influencia del lubricante sobre las superficies. La temperatura del contacto calculada con el modelo es menor a  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  por encima de la temperatura de base de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , coincidiendo con lo registrado experimentalmente.

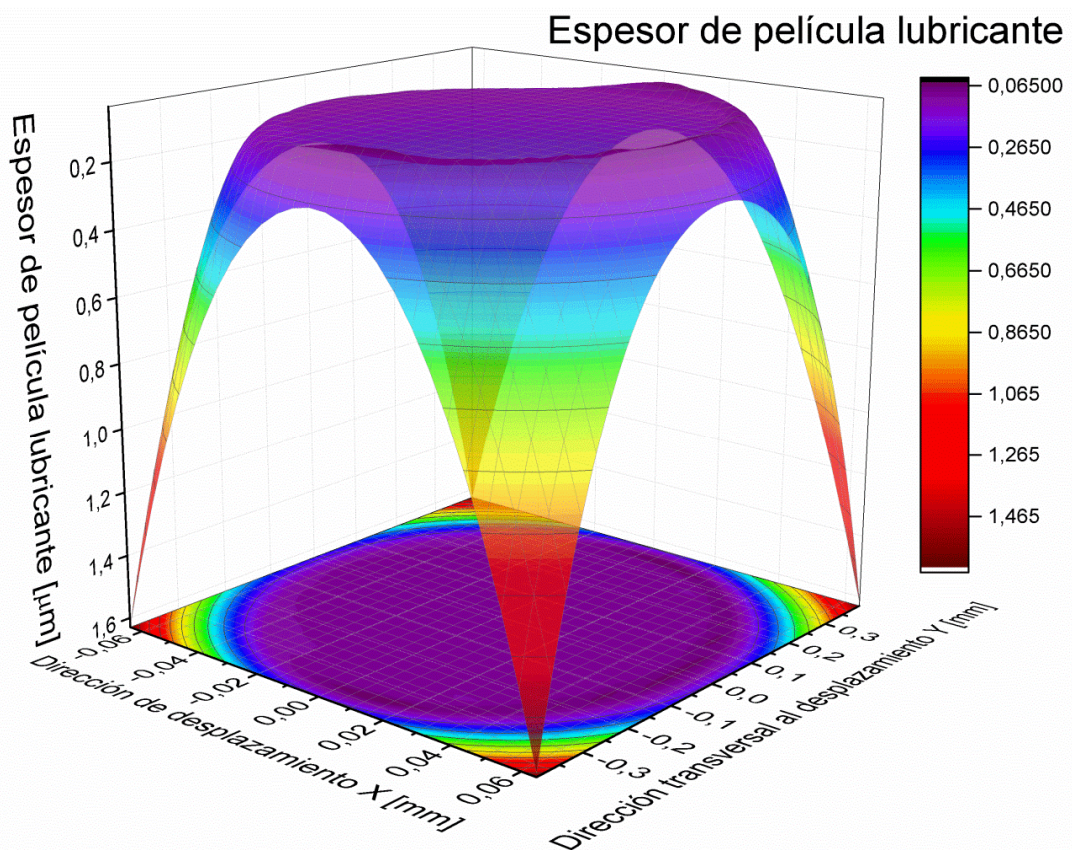


Figura 8.2: Resultados del modelo TEHD para el espesor de película lubricante.



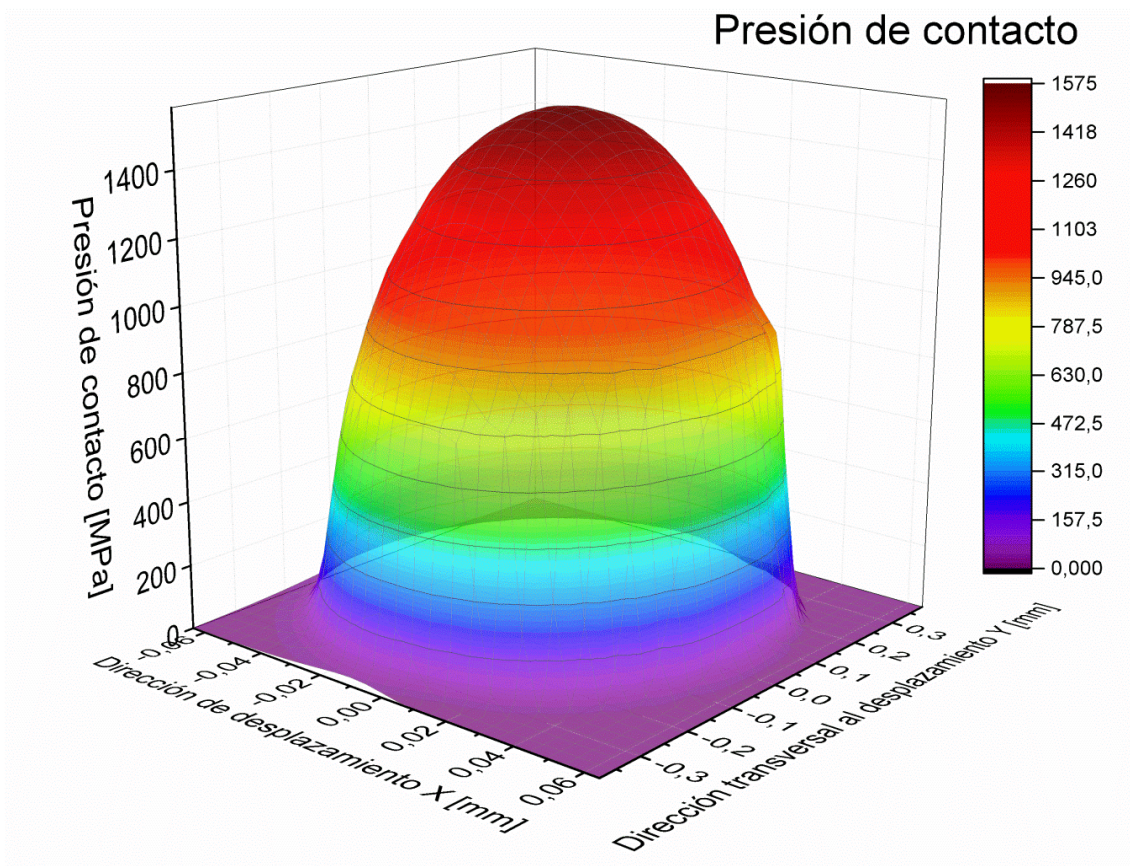


Figura 8.3: Resultados del modelo TEHD para la presión de contacto.

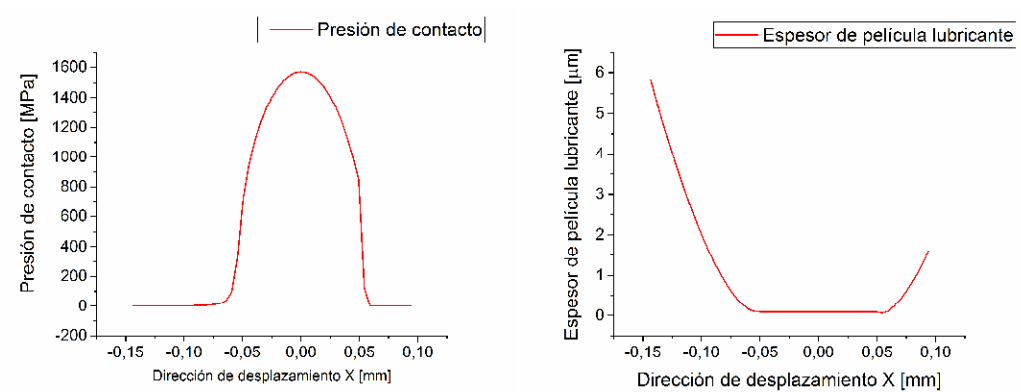


Figura 8.4: Resultados del modelo TEHD sobre la línea central. Izq.: distribución de la presión de contacto; Der.: distribución del espesor de película lubricante.

### 8.1.3 Relación de película lubricante: parámetro $\lambda$

En función de los resultados obtenidos por el modelo, es posible calcular el parámetro  $\lambda$  inicial con el cual se puede determinar el régimen de lubricación. La importancia de este

parámetro durante un proceso de contacto con rodadura ha sido enunciada en el Capítulo 3. Como puede observarse en la Tabla 8.2, la lubricación en la etapa inicial puede considerarse del tipo “mixta” [4] y es constantemente modificada en el transcurso del ensayo debido a los cambios morfológicos producidos.

Tabla 8.2: Espesor de película lubricante inicial.

Sa Pista [ $\mu\text{m}$ ]	Sa Esfera [ $\mu\text{m}$ ]	Sa prom [ $\mu\text{m}$ ]	Esp min [ $\mu\text{m}$ ]
0.047	0.040	0.0617	0.0649
Parámetro $\lambda$ inicial			
1.05			

## 8.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS TRIBOLÓGICOS DE CONTACTO PUNTUAL

Para el presente estudio se realizaron un total de 10 ensayos utilizando rodamientos comerciales. Si bien la metodología de ensayo se mantuvo constante para las 10 probetas, los resultados mostrados en este capítulo son principalmente sobre la base de un mismo ensayo, ya que todos presentaron resultados similares. En tal sentido, se destaca que no se evidenciaron diferencias significativas en los resultados de los diferentes ensayos en términos de cambios morfológicos superficiales y generación de partículas de desgaste, exceptuando variaciones en los tiempos de las diferentes etapas de desgaste.

En la Figura 8.5 se presenta un gráfico de cantidad de partículas de desgaste esféricas identificadas en ferrograma, en función al tiempo de ensayo transcurrido. La generación de partículas esféricas (característica de degradación por rodadura de contacto) se produce en todos los estadios del ensayo, incrementando su número abruptamente con la aparición de fisuras superficiales producto de la FCR.

Al comienzo, en un primer período, se observa una cantidad cercana a cinco partículas, que se reduce a casi ninguna luego de 300 min de ensayo. Esta etapa se la denomina “asentamiento”, y en ella no se observa el desarrollo de fisuras o daños superficiales vinculado con FCR.

En una segunda etapa, denominada “régimen estacionario”, el número de partículas esféricas que se detectan es muy bajo, con un máximo de dos o hasta tres partículas por ferrograma. Las primeras fisuras superficiales fueron apreciadas sobre el final de esta etapa, cosa que ocurre luego de aproximadamente 1000 min de ensayo.

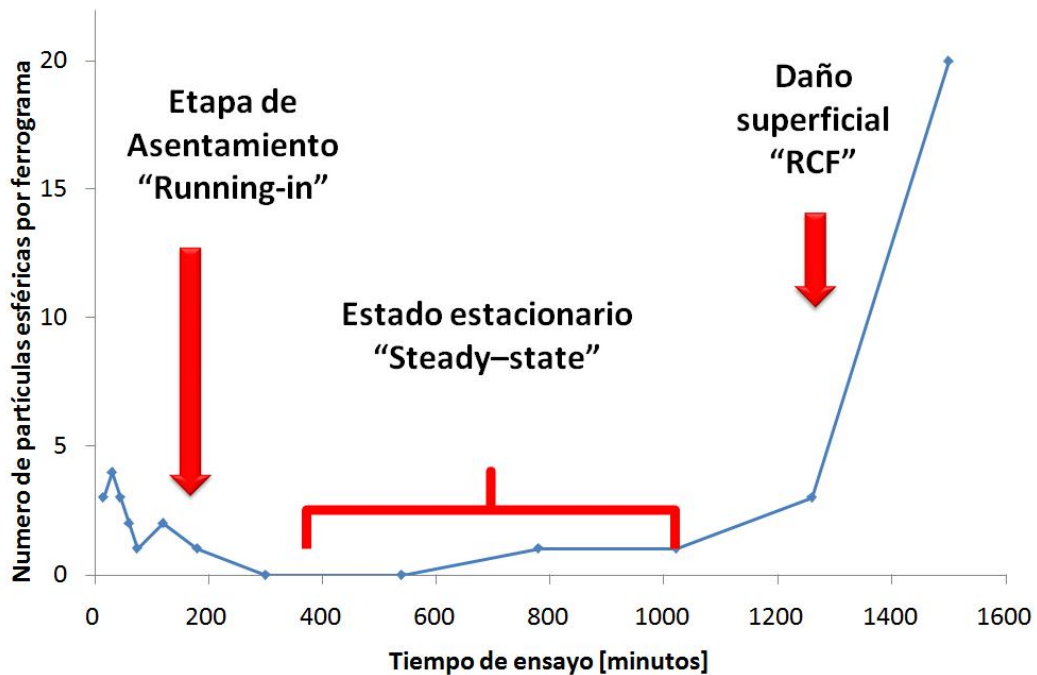


Figura 8.5: Gráfico cualitativo que exhibe la generación de partículas esféricas en las diferentes etapas de desgaste por rodadura de contacto.

Finalmente, con la aparición de fisuras superficiales por FCR, se observa la aparición de un número creciente de partículas esféricas por ferrograma. En esta etapa, los cambios morfológicos son muy evidentes con aparición y crecimiento de numerosas fisuras, sumado al descascarillado o picado de los caminos de rodadura. Cabe señalar que, si bien en la Figura 8.5 la aparición de fisuras superficiales para la probeta es a los 1300 min, este tiempo ha llegado a ser del doble para otros ensayos, variando entre los ~1000 y ~2800 min.

### 8.2.1 ANÁLISIS DE LA ETAPA INICIAL DE ASENTAMIENTO O “RUNNING-IN”

#### 8.2.2 Partículas de desgaste esféricas

Los primeros ferrogramas de un ensayo se efectuaron a los 15, 30 y 45 min, lo que corresponde a  $3.1 \times 10^4$ ,  $9.4 \times 10^4$  y  $6.3 \times 10^4$  ciclos acumulados respectivamente. La presencia de partículas esféricas fue rápidamente detectada durante este período de asentamiento. En la Figura 8.6 se puede observar algunas partículas esféricas de diferentes ferrogramas de esta etapa. En ella, el análisis morfológico de las superficies de rodadura no revela la presencia de



fisuras, lo que indicaría que las partículas de desgaste esféricas provienen únicamente de la superficie (ver Figura 8.7).

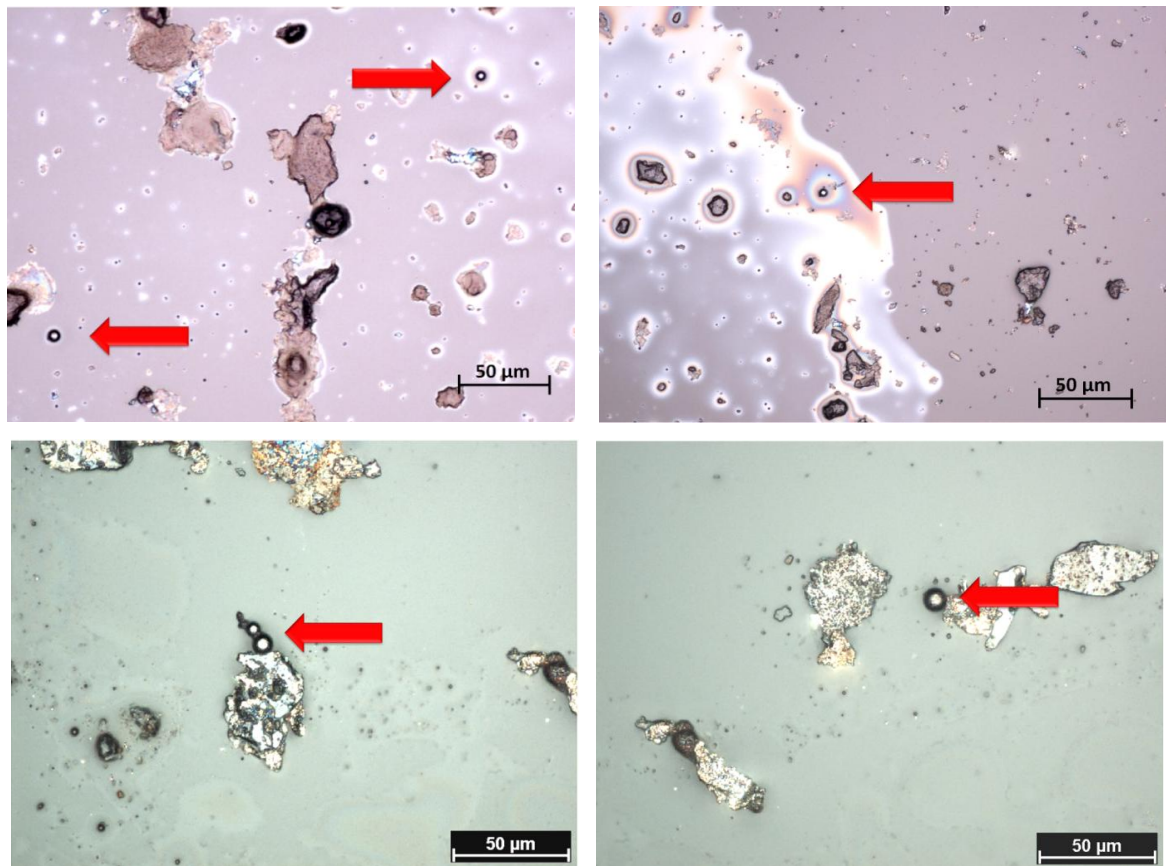


Figura 8.6: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 30 (Sup.) y 90 min (Inf.) correspondientes a  $6,3 \times 10^4$  y  $1,9 \times 10^5$  ciclos aproximadamente (Mag.: 500x.).

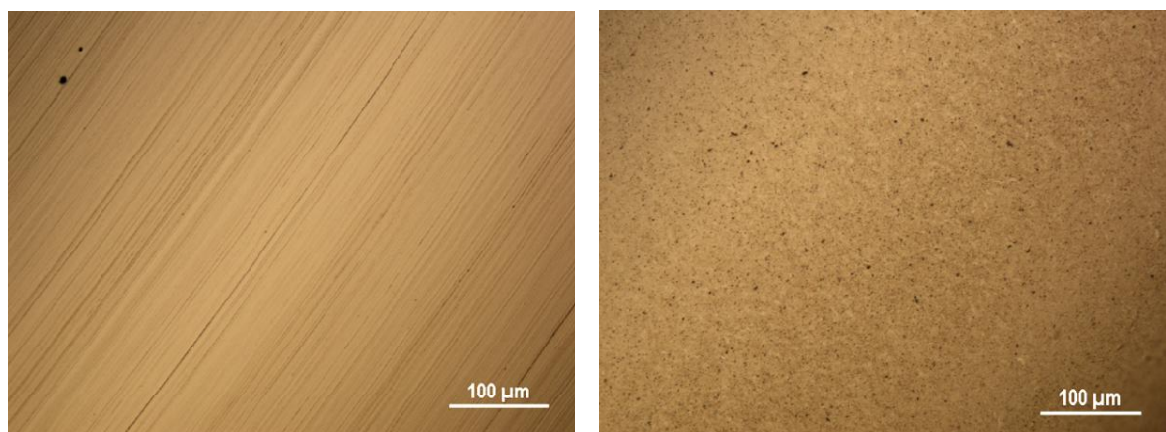


Figura 8.7: Imágenes de microscopía óptica de los caminos de rodadura sin ensayar (Izq.) y luego de 90 min de ensayo ( $\sim 1,9 \times 10^5$  ciclos) (Mag.: 200x).

La Figura 8.8 muestra varias partículas las cuales aún no son totalmente esféricas, posiblemente en proceso de generación. Estas imágenes indicarían que el proceso de generación podría correlacionarse con el mecanismo de redondeo y aglomeración. Este mecanismo también es consistente con las partículas esféricas detectadas, en micro cavidades superficiales (ver Figura 8.9).

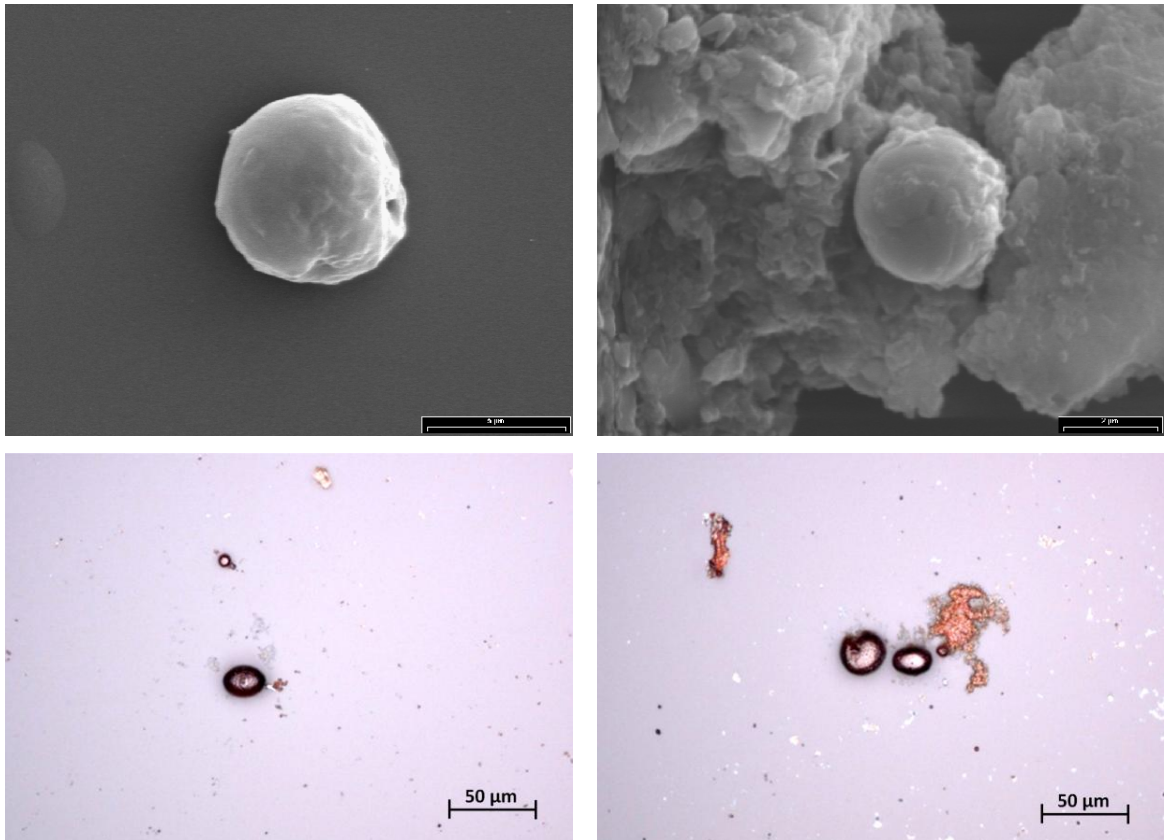


Figura 8.8: Partículas esféricas tomadas de ferrografías a 30 min ( $6,3 \times 10^4$  ciclos) en proceso de formación (Mag.: Sup.: lzq.: 6000x; Der.: 10000x; Inf.: 500x).

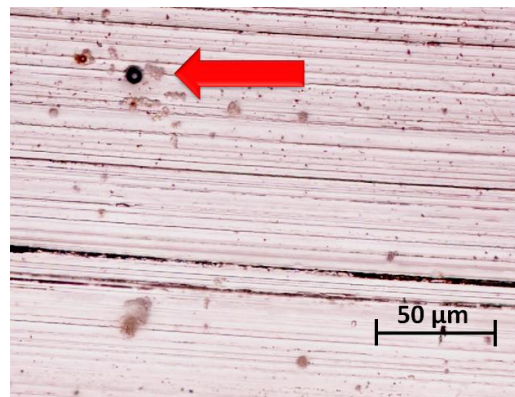
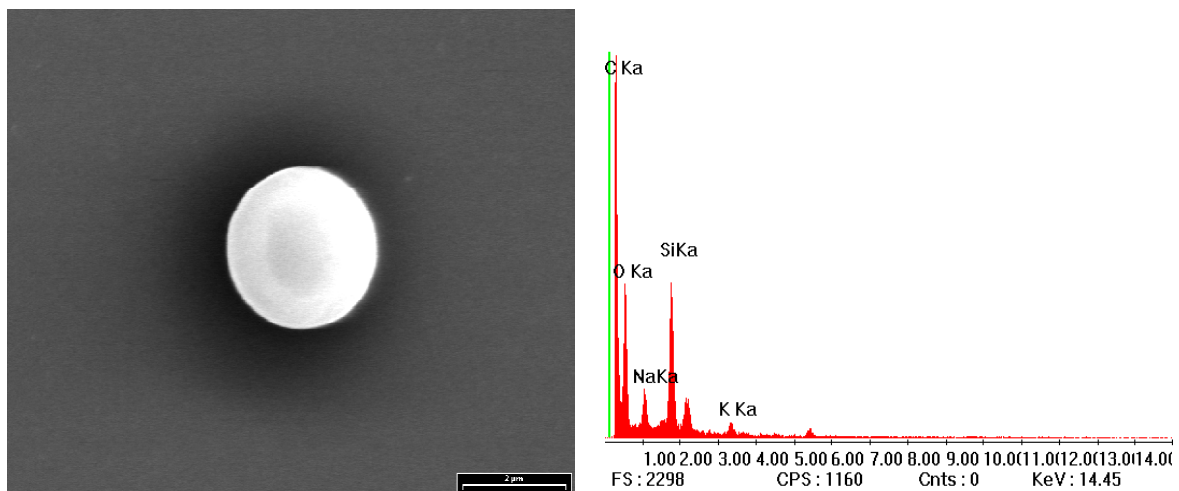


Figura 8.9: Partícula esférica en un borde del camino de rodadura, luego de 90 min de ensayo (aprox.  $1,9 \times 10^5$  ciclos) (Mag.: 500x).

Asimismo este mecanismo también permite explicar la presencia de partículas provenientes de los elementos rodantes. La Figura 8.10 muestra una partícula esférica de nitruro de silicio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  proveniente de las esferas rodantes. Las partículas detectadas generalmente menores a  $2\ \mu\text{m}$  han sido encontradas esporádicamente durante todas las etapas del ensayo. Como se ha mencionado precedentemente, las partículas esféricas habrían sido generadas por el mismo mecanismo descrito para las partículas con hierro y oxígeno, excluyendo el proceso de aglomeración, ya que no se ha detectado la presencia de otro elemento en las mismas.



*Figura 8.10: Partícula esférica proveniente de las bolillas cerámicas y su respectivo espectro EDS (con Silicio en composición) de un ferrograma a los 30 min ( $6,3 \times 10^4$  ciclos) (SEM Mag.: 6000x).*

Los espectros de composición química EDS de las partículas esféricas muestran únicamente la presencia de picos de hierro y oxígeno. Los mismos se pueden observar en la Figura 8.11 donde se encuentra una partícula esférica de aproximadamente  $8\ \mu\text{m}$  con su respectivo espectro de EDS. Para determinar la/s fase/s de óxido presentes en las partículas se realizaron análisis por espectroscopía Raman. En la Figura 8.12 es presentado el espectro resultante del análisis Raman sobre una partícula del ferrograma realizado a 15 min de iniciado el ensayo. El espectro revela la presencia de picos  $670$ ,  $\sim 310$  y  $\sim 530\ \text{cm}^{-1}$  que corresponden a la fase  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita) [5,6]. Asimismo la Figura 8.13 corresponde a un ferrograma de 90 min, en el que pueden observarse picos en  $670$  y  $\sim 320\ \text{cm}^{-1}$  correspondientes a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita) y picos en  $220$ ,  $410$  y  $1300$  pertenecientes a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (llamado Hematita) [7]. Estos resultados han sido observados de forma repetitiva en todos los análisis realizados a las partículas en la etapa de asentamiento.

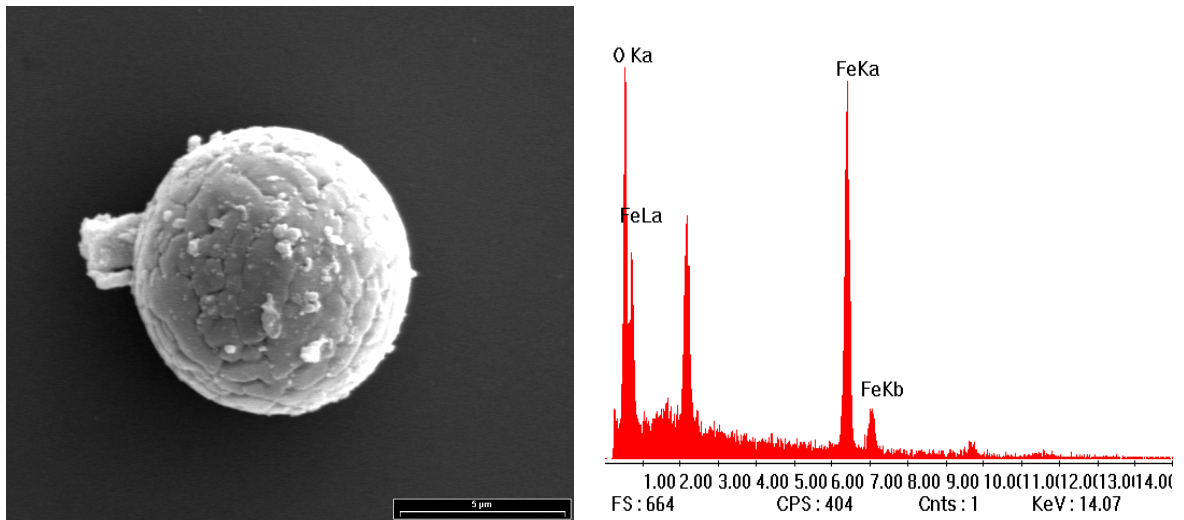


Figura 8.11: Partícula esférica y su respectivo espectro EDS con elementos Fe y O<sub>2</sub> de un ferrograma a los 30 min ( $6,3 \times 10^4$  ciclos) (SEM Mag.: 6000x).

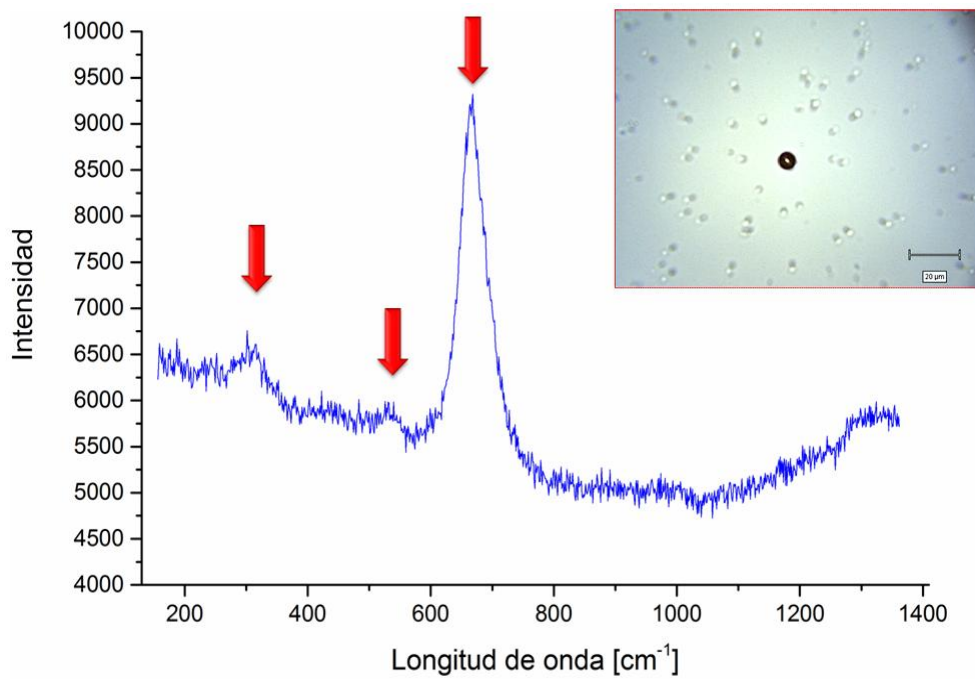


Figura 8.12: Espectro Raman de partícula perteneciente a un ferrograma a los 15 min [ $3,1 \times 10^4$  ciclos].



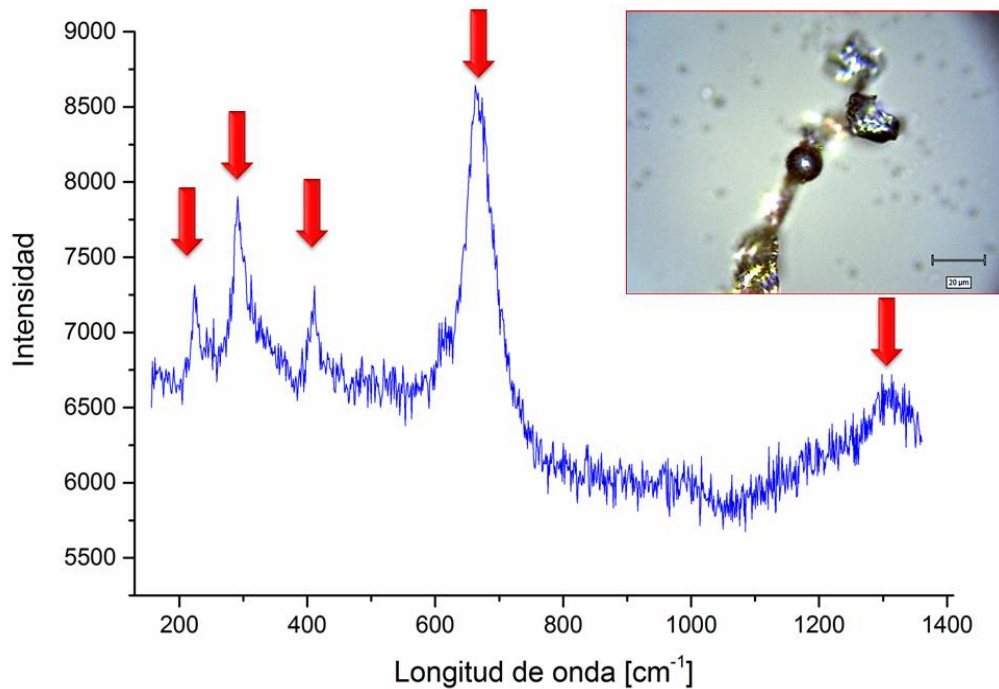


Figura 8.13: Espectro Raman de partícula perteneciente a un ferrograma a los 90 min [ $1,9 \times 10^5$  ciclos].

Por otro lado, el análisis de XPS de las superficies de rodadura revela la presencia de oxígeno disminuyendo al incrementar el tiempo de “sputtering”, es decir, al aumentar la profundidad de penetración desde la superficie. La Figura 8.14 muestra el conteo de la energía correspondiente al oxígeno ( $O_{1s}$ ) en función del tiempo total de “sputtering” (con argón). Este tiempo es proporcional a la profundidad del análisis y para las condiciones de análisis realizadas, se obtiene una profundidad de 150 nm cada 2 min de “sputtering”. Como se observa en la figura, los conteos de oxígeno se extinguen conforme se realiza el análisis en profundidad, con lo cual, se concluye que la gran cantidad de oxígeno en la superficie es adjudicado a la presencia de óxidos formados durante el proceso tribológico. Con este análisis pudo comprobarse no sólo la presencia de óxidos a nivel superficial, sino también la profundidad cualitativa mediante el análisis del oxígeno como elemento de interés.

El perfil de intensidad permite realizar una comparación de la profundidad de los óxidos en las diferentes etapas de desgaste. Si se observa la Figura 8.16a, transcurridos 10 min de análisis, a una profundidad aproximada de 750 nm, se miden unas 500 cuentas correspondientes a la energía del elemento oxígeno ( $O_{1s}$ ). Este valor será utilizado para el análisis comparativo.

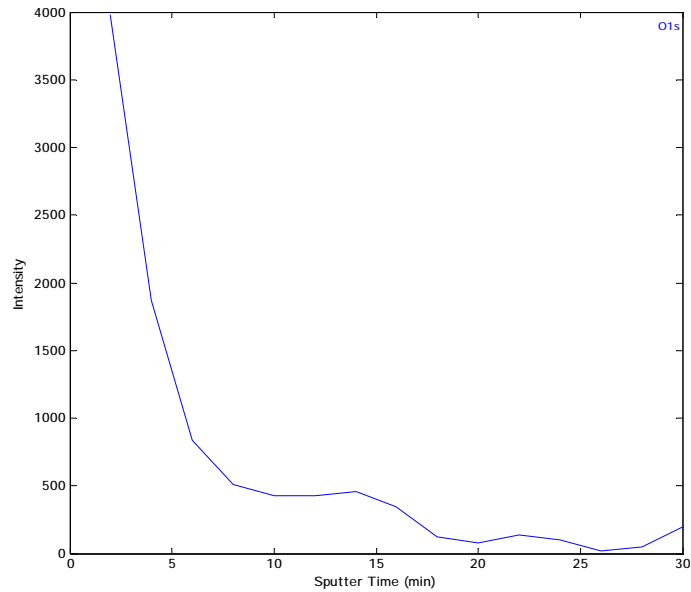


Figura 8.14: Perfil de energía correspondiente al oxígeno en función al tiempo de "sputtering".

Los análisis demandaron un tiempo total de 30 min de ablación con una energía de 3KV-7mA junto con el análisis de elementos en intervalos de 2 min generando un total de 15 capas de análisis (espectros sucesivos de las regiones de interés). Los espectros de perfil de ablación realizados en intervalos de tiempo pueden ser observados en la Figura 8.15. En la misma se aprecian las diferentes capas de análisis, con los valles correspondientes al elemento de interés (O1s) en una energía cercana a 528 eV.

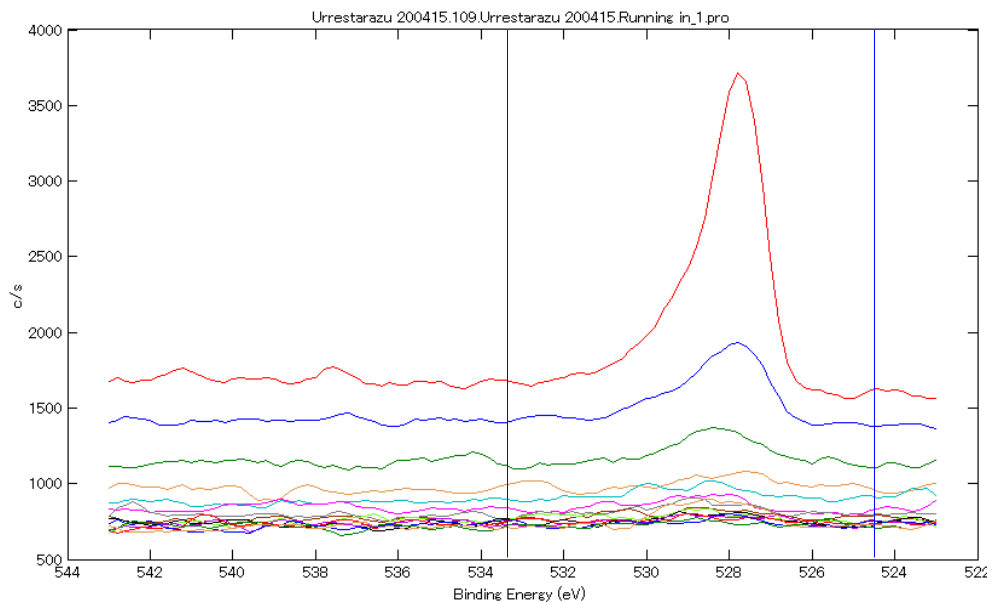


Figura 8.15: Perfiles de ablación iónica con decaimiento de la concentración de oxígeno con el aumento de la profundidad.

### 8.2.3 Rugosidad de superficies y parámetro $\lambda$ en la etapa de asentamiento

Si bien todas las superficies de rodadura durante la etapa de asentamiento fueron cuidadosamente observadas mediante microscopía óptica en busca de defectos, fisuras superficiales, o posibles fuentes de generación de partículas, sólo fueron detectados cambios morfológicos de las texturas de las superficies.

En la Figura 8.16 se aprecia la morfología superficial de las superficies de rodadura correspondientes a la etapa de asentamiento, donde es posible inferir muy pocos cambios morfológicos, eliminándose las líneas de mecanizado que presentaban las superficies antes de ser ensayadas. Las imágenes corresponden a una zona observada mediante microscopía láser confocal con su respectivo perfil de rugosidad. A partir de las imágenes obtenidas, no es posible identificar fisuras, pits, ni otros defectos producto de FCR.

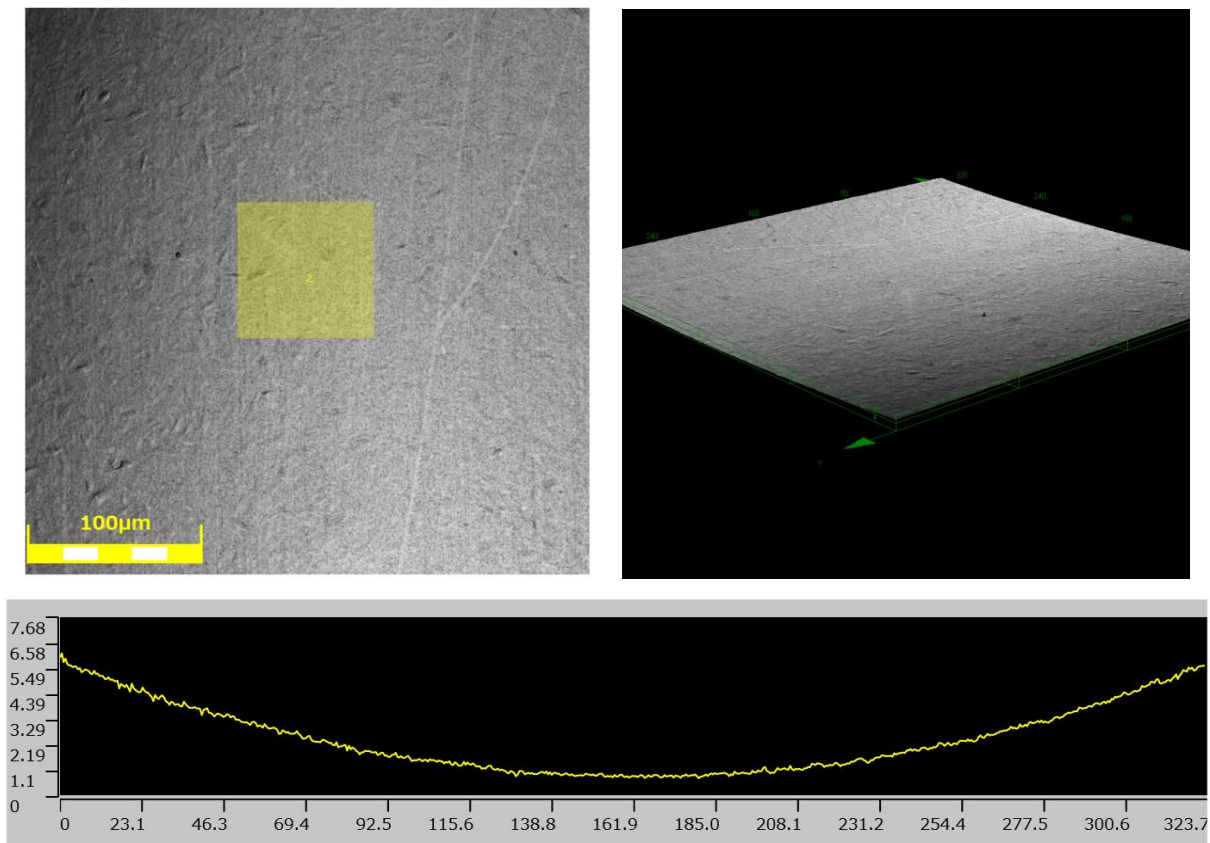


Figura 8.16: Morfología superficial de los caminos de rodadura (Sup. Izq.) y, perfil superficial realizado con microscopía láser confocal sobre un área (Sup. Der.) y una línea (Inf.) (Mag. 200x)

La Figura 8.17 muestra la imagen superficial de los elementos rodantes, donde tampoco se detectaron fisuras ni defectos. Se observan zonas marcadas donde ha cambiado la rugosidad superficial por el contacto. Las mismas se han señalado en la figura con líneas punteadas.



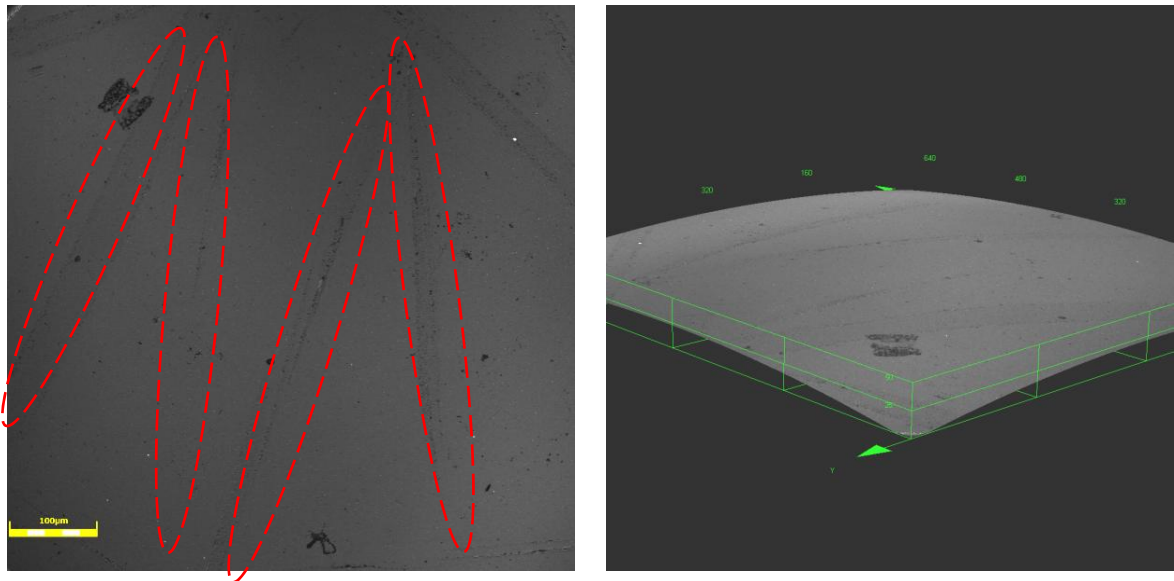


Figura 8.17: Morfología superficial de las bolillas rodantes y perfil superficial de la misma realizado con microscopía láser confocal (Mag. 100x).

La rugosidad superficial de los elementos rodantes y las pistas de rodadura en la etapa de asentamiento no sufrieron variaciones significativas, sino sólo mínimos cambios en los parámetros de rugosidad (ver tabla 8.3). Por consiguiente el espesor de película lubricante a los 90 min de ensayo ( $1.9 \times 10^5$  ciclos) sufrió únicamente una leve disminución. A partir de esto el régimen de lubricación continuó siendo del tipo “mixta”, pero tendiendo hacia “marginal” [4] (ver tabla 8.4).

Tabla 8.3: Parámetros de rugosidad de las superficies en el periodo de asentamiento (90 min).

Parámetro	Rugosidad				
	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]
Pista	0.056	0.989	0.064	0.595	0.394
Esfera	0.040	2.124	0.062	1.450	0.752

Tabla 8.4: Espesor de película lubricante en el periodo de asentamiento (90 min).

Sa Pista [ $\mu\text{m}$ ]	Sa Esfera [ $\mu\text{m}$ ]	Sa prom [ $\mu\text{m}$ ]	Esp min [ $\mu\text{m}$ ]
0.050	0.040	0.0640	0.0649
Parámetro $\lambda$			
1.013			

### 8.2.4 Análisis FTIR del lubricante

Durante diferentes etapas de desgaste fueron obtenidas muestras de lubricantes, las cuales se caracterizaron mediante espectrometría FTIR. La Figura 8.18 expone el espectro de una muestra tomada a los 90 min. Se observa la aparición de picos en  $\sim 1720$  y  $\sim 1170$   $\text{cm}^{-1}$  los cuales no estaban presentes en el lubricante sin ensayar. Estos picos corresponden a grupos moleculares del tipo carbonilo, asociados con la oxidación del lubricante [8,9].

La oxidación prematura del lubricante está relacionada directamente con el nivel de temperatura a la cual es sometido. Dado a que el volumen de lubricante utilizado en el ensayo es muy pequeño (aproximadamente 20 ml), y está sometido a temperaturas elevadas (sobre la zona de contacto) para las condiciones normales de lubricación, es esperable el envejecimiento detectado en el lubricante utilizado.

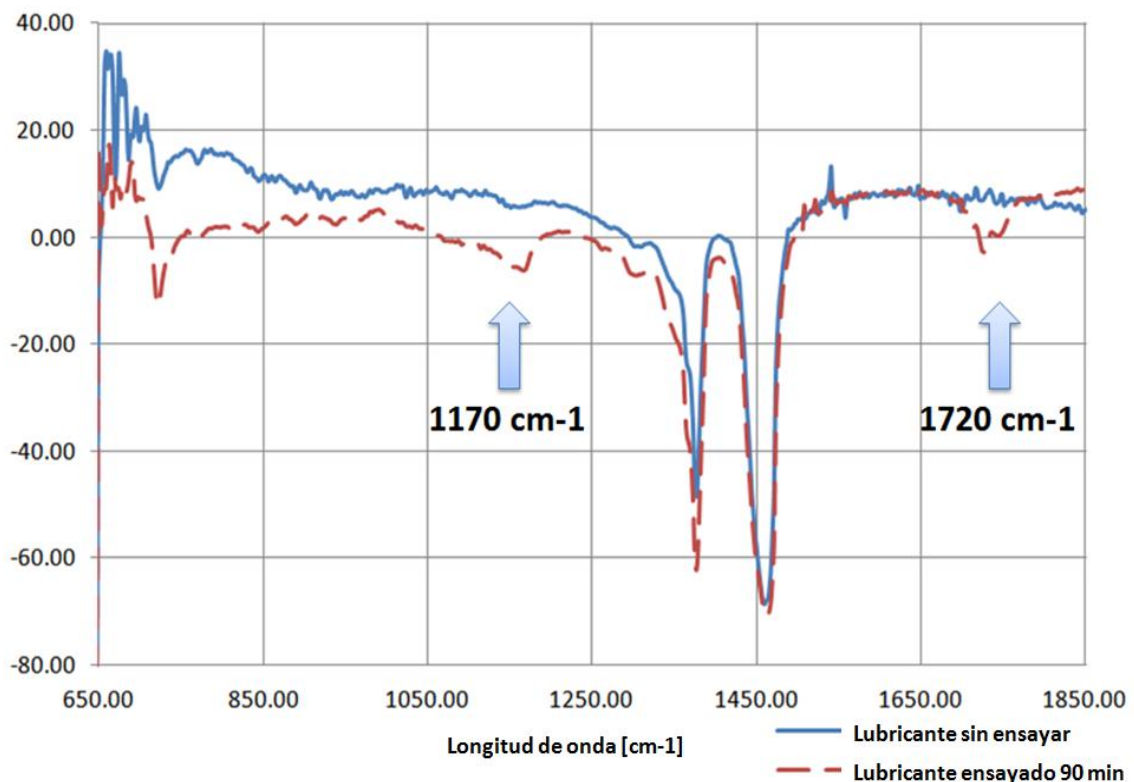


Figura 8.18: Espectro FTIR del lubricante sin ensayar (azul) y del lubricante luego de 90 min de ensayo (rojo).

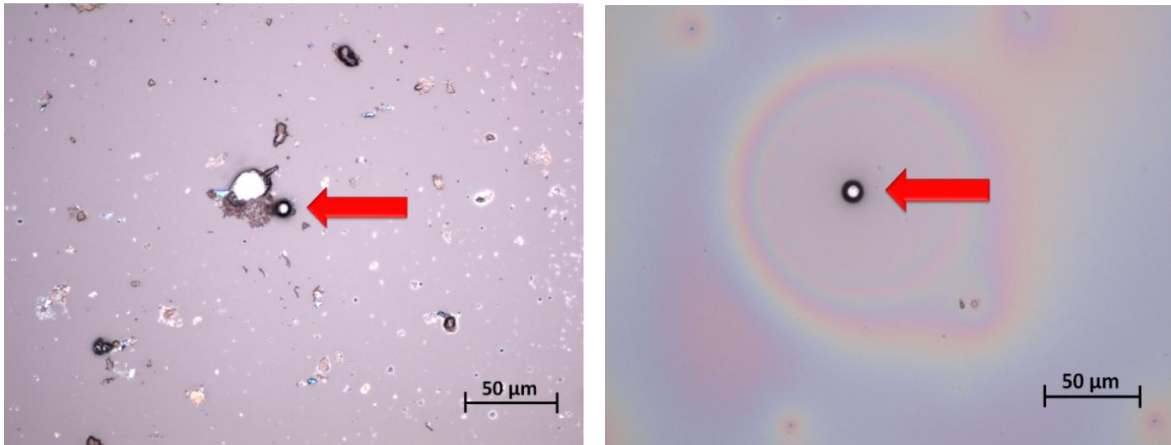
### 8.2.5 ETAPA ESTACIONARIA O “STEADY-STATE”

#### 8.2.6 Partículas de desgaste esféricas

La etapa denominada de régimen estacionario (en inglés STEADY-STATE) se extendió desde aproximadamente los 200 min hasta los 1000 min de duración de ensayo. En el estudio

de los ferrogramas obtenidos en esta etapa, se observó una generación uniforme de partículas esféricas. Además, también se encontraron aproximadamente dos o hasta tres esferas como máximo por ferrograma cada 200/300 min de ensayo.

En la Figura 8.19 se pueden observar partículas esféricas de ferrografías registradas luego de 660 y 840 min de duración de ensayo. Las partículas tenían tamaños similares, idéntica morfología superficial y composición química a las generadas durante el asentamiento.



*Figura 8.19: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 660 (Izq.) y 840 min (Der.) correspondientes a los  $1,3 \times 10^6$  y  $1,7 \times 10^6$  ciclos aproximadamente (Mag.: 500x).*

En las Figuras 8.20 y 8.21 pueden observarse el análisis mediante Raman de partículas obtenidas luego de 660 y 840 min [ $1,4 \times 10^6$  y  $1,7 \times 10^6$  ciclos].

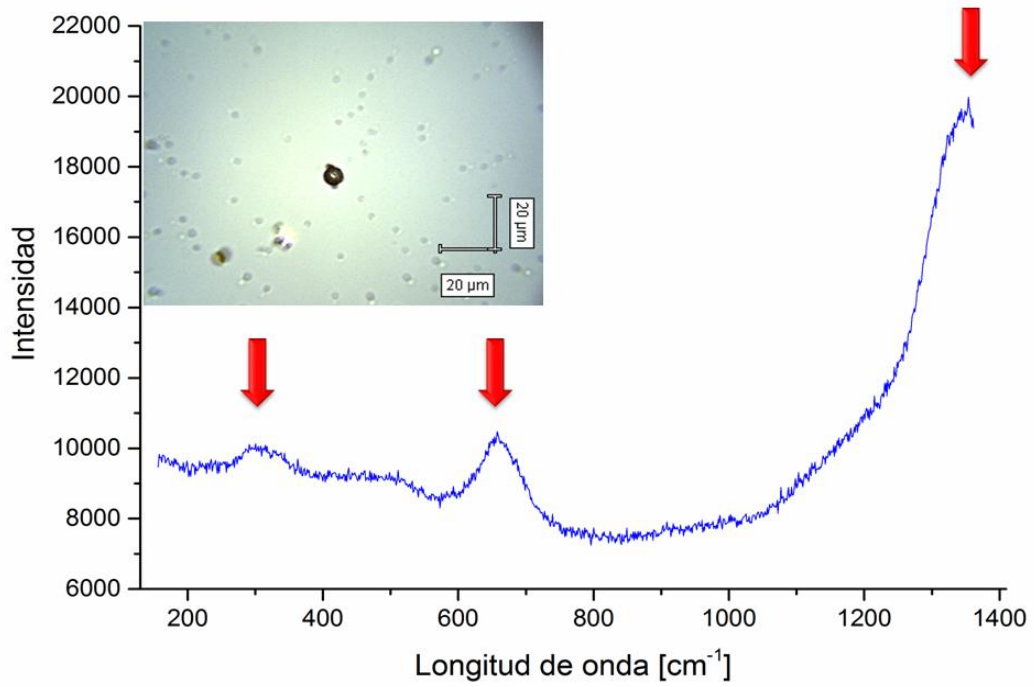


Figura 8.20: Espectro Raman de partícula perteneciente a una ferrografía tomada a los 660 min [1,4x10<sup>6</sup> ciclos].

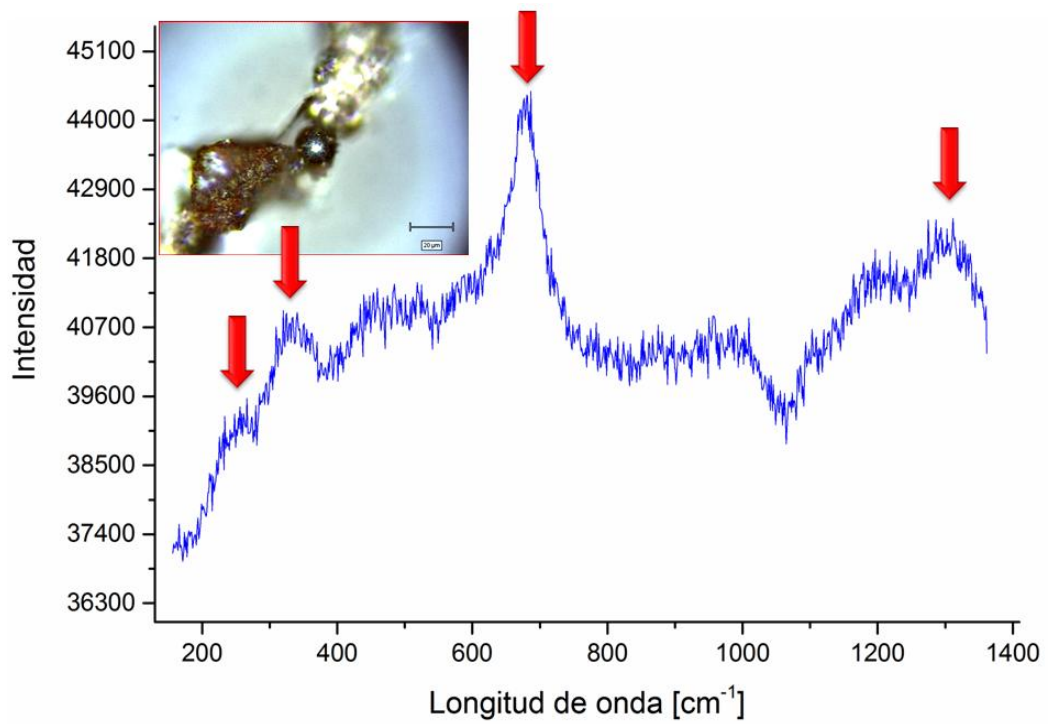


Figura 8.21: Espectro Raman de partícula perteneciente a una ferrografía tomada a los 840 min [1,7x10<sup>6</sup> ciclos].

En la Figura 8.20 se evidencian picos en el rango en  $\sim 310$  y  $\sim 670$   $\text{cm}^{-1}$  pertenecientes a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita). El pico  $\sim 1300$   $\text{cm}^{-1}$  posiblemente esté contabilizado a causa de una mezcla de óxidos de hierro (pico característico de Hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), es decir, proveniente del vidrio soporte, el cual tiene elevados conteos a frecuencias cercanas a  $1300$   $\text{cm}^{-1}$ . Por otra parte, el espectro Raman de la ferrografía tomada a los 840 min muestra picos en  $\sim 240$ ,  $\sim 340$  y  $\sim 670$   $\text{cm}^{-1}$  pertenecientes a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita). Nuevamente también se identificó un pico cercano a frecuencias de  $1300$   $\text{cm}^{-1}$ .

### 8.2.7 Rugosidad de superficies y parámetro $\lambda$ en etapa estacionaria

Las superficies de rodadura mostraron cambios morfológicos poco significativos en el comienzo de esta etapa. Sin embargo se detectó la presencia de una superficie con mayor rugosidad, y microcavidades superficiales. En la Figura 8.22 pueden observarse imágenes de microscopía óptica de 660 min de ensayo, donde se visualizan cambios en la textura superficial.

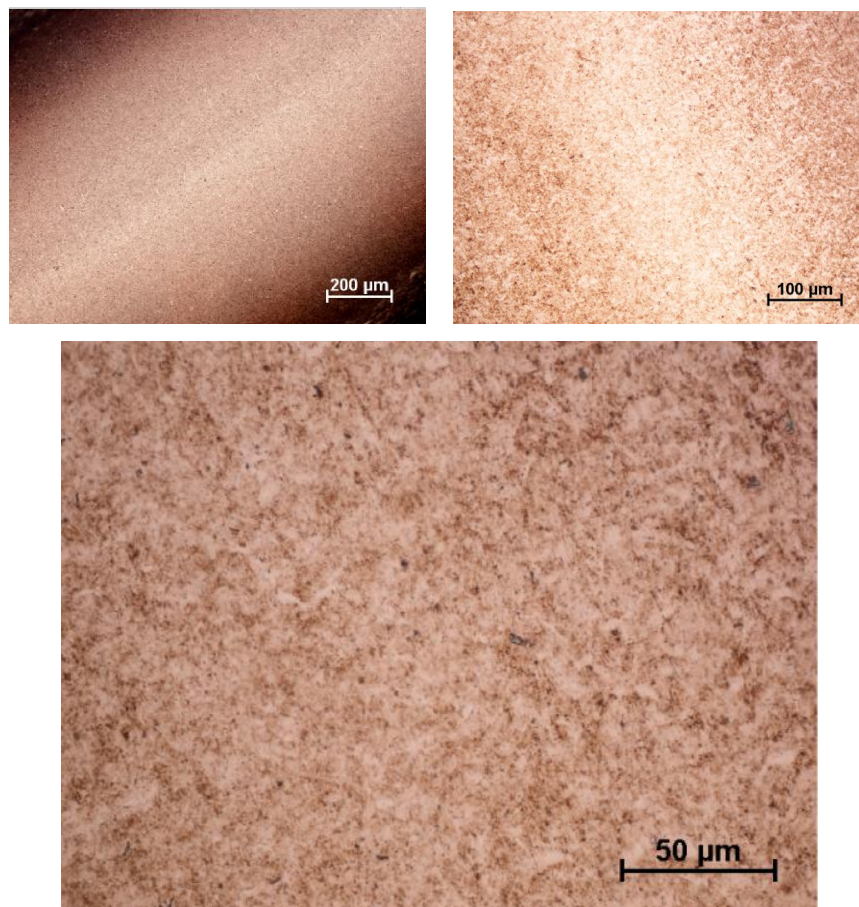
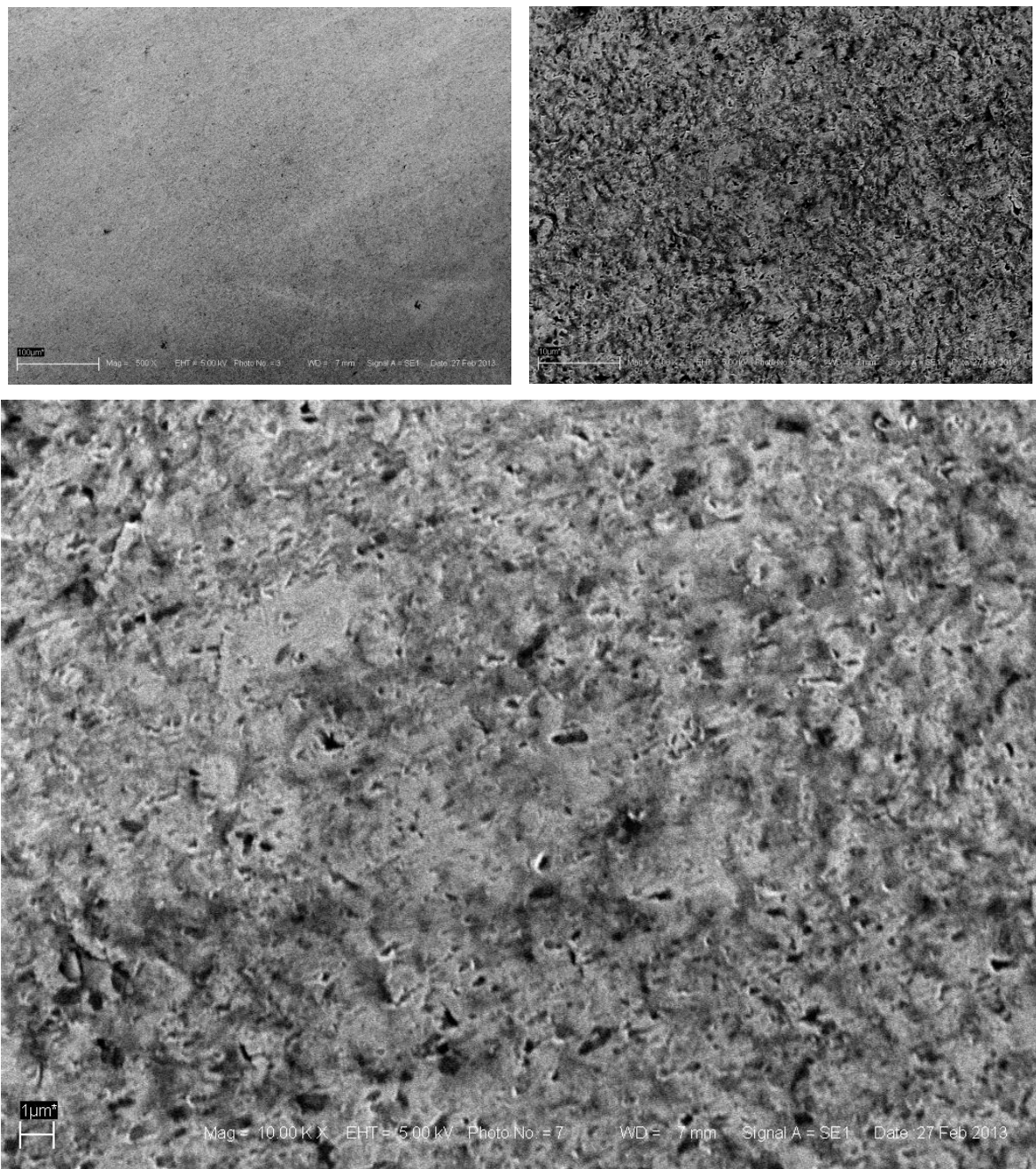


Figura 8.22: Caminos de rodadura luego de 660 min de ensayo correspondientes a los  $1,4 \times 10^6$  ciclos. (Mag.: Sup.: 100x, 200x; Inf.: 500x).

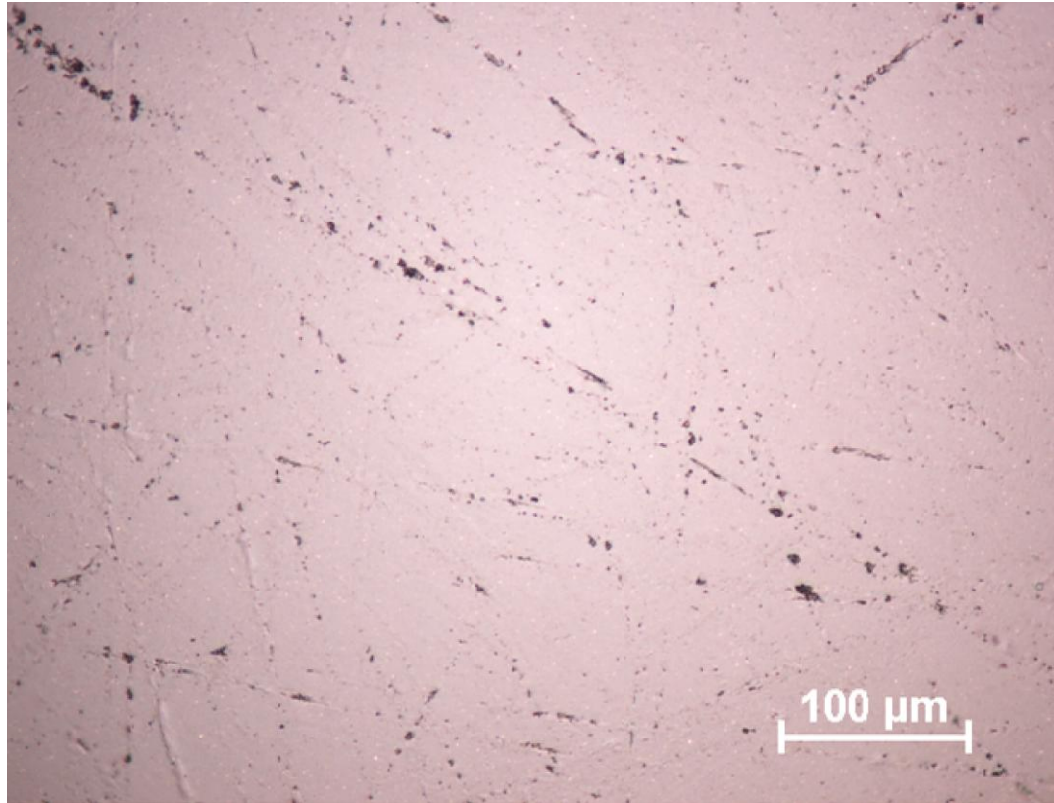


En el período próximo a la finalización de la etapa, las superficies de rodadura mostraron cambios morfológicos notables. Asimismo, una notoria concentración de micro-cavidades superficiales de rodadura. Las mismas tienen un rol de nucleación sobre el crecimiento de las fisuras posteriores (ver Figura 8.23). En tal sentido también se incrementó el nivel de deterioro topográfico como puede apreciarse en la Tabla 8.5.



*Figura 8.23: Caminos de rodadura luego de 840 min de ensayo correspondientes a los  $1,7 \times 10^6$  ciclos. (Mag.: Sup.:500x, 5000x; Inf.: 10000x).*

En cambio, las superficies de los elementos rodantes, no evidenciaron cambios significativos en la topografía superficial, aunque se observaron gran cantidad de defectos superficiales (ver Figura 8.24). El parámetro de rugosidad  $S_a$  que fue de  $0,040 \mu\text{m}$  en la etapa de asentamiento se incrementó a  $0,044 \mu\text{m}$  en esta etapa (ver tabla 8.5).



*Figura 8.24: Morfología superficial de los elementos rodantes tomada a los 1020 min correspondiente a los  $2,1 \times 10^6$  ciclos (Mag. 200x).*

Asimismo, en las pistas de rodadura el parámetro  $S_a$  aumentó de  $0,056 \mu\text{m}$  a  $0,119 \mu\text{m}$  en la etapa estacionaria, con lo cual el régimen de lubricación se vio notablemente afectado. Al aumentar la rugosidad superficial, con un valor de película lubricante aproximadamente constante, el parámetro  $\lambda$  disminuye significativamente (ver tabla 8.6). El tipo de lubricación migró de “mixta” a “límite” en los tramos finales de la etapa estacionaria. Esto puede explicar el cambio de topografía superficial producido en las pistas de rodadura.



Tabla 8.5: Parámetros de rugosidad de las superficies en el período estacionario (840 min).

Parámetro	Rugosidad				
	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]
Pista	0.119	2.764	0.15	0.409	2.547
Esfera	0.044	2.134	0.092	1.65	0.792

Tabla 8.6: Espesor de película lubricante en el período estacionario (840 min).

Sa Pista [ $\mu\text{m}$ ]	Sa Esfera [ $\mu\text{m}$ ]	Sa prom [ $\mu\text{m}$ ]	Esp min [ $\mu\text{m}$ ]
0.119	0.044	0.1268	0.0649
Parámetro $\lambda$			
0.51			

Luego de  $\sim 1000$  min [ $1.9 \times 10^6$  ciclos], se observó un significativo cambio en el proceso de desgaste. En ese instante, las primeras fisuras incipientes son detectadas en los caminos de rodadura. Lo enunciado se puede observar en la Figura 8.25. En esta imagen, dos fisuras son señaladas mediante flechas. Además, el perfil de rugosidad obtenido evidencia los cambios morfológicos superficiales de los caminos de rodadura mencionados.

La aparición de fisuras por RCF señala el final de la etapa de régimen de desgaste estacionario y el inicio de la etapa de daño irreversible.

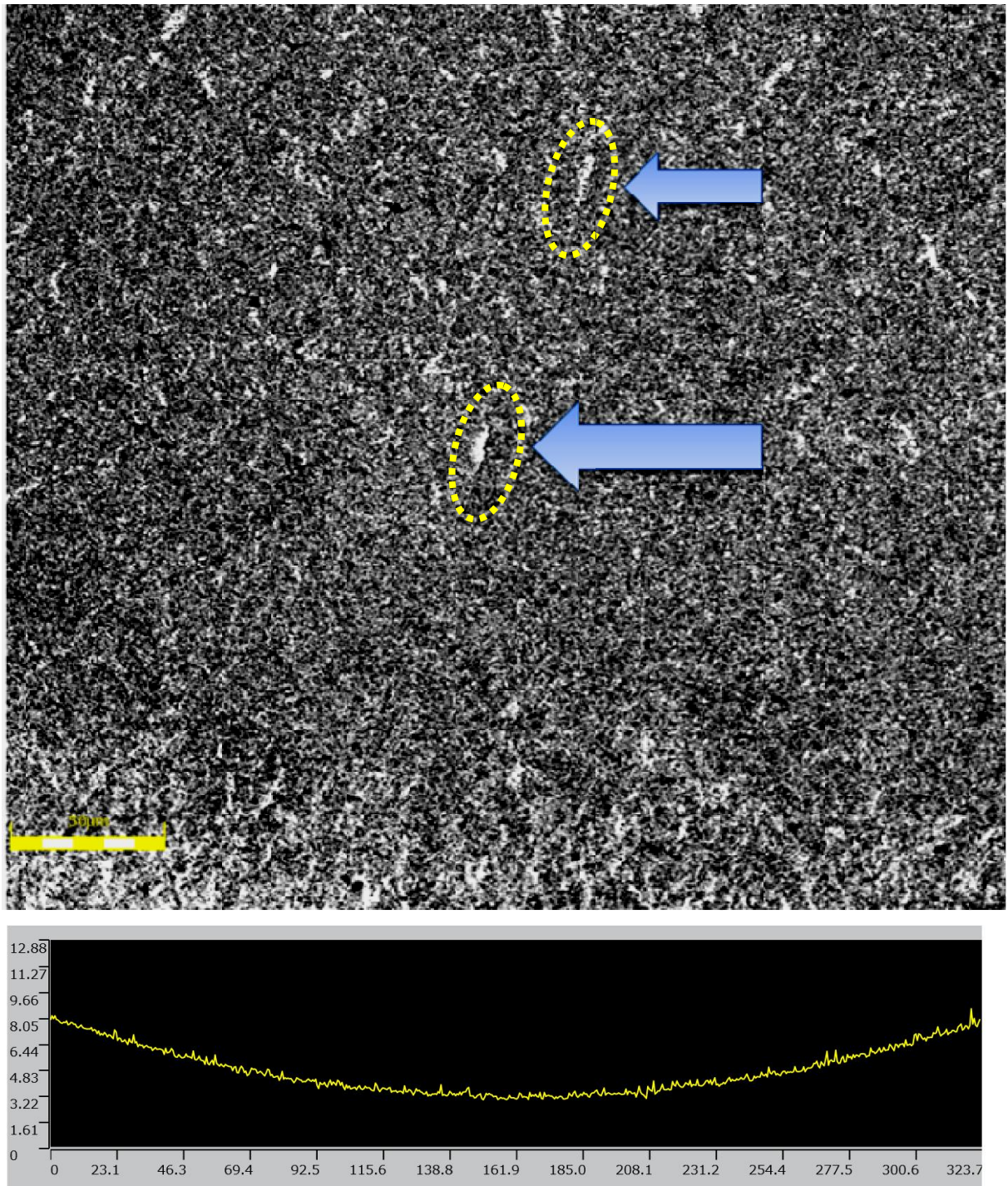


Figura 8.25: Morfología superficial de los caminos de rodadura tomada a los 1020 min ( $2.1 \times 10^6$  ciclos) donde se observan las primeras fisuras producidas y un perfil superficial del mismo realizado con microscopía laser confocal (Mag. 500x).

### 8.2.8 ETAPA FINAL: DEGRADACIÓN PRODUCTO DE FCR

#### 8.2.9 Partículas de desgaste esféricas

Luego de ~1200 min una significativa cantidad de fisuras pudo observarse en la superficie de las pistas de rodadura. Sin embargo, este nivel de daño no fue consistente con un incremento de partículas esféricas en la correspondiente ferrografía. La Figura 8.26 muestra una imagen de la superficie donde se aprecian las primeras fisuras superficiales.

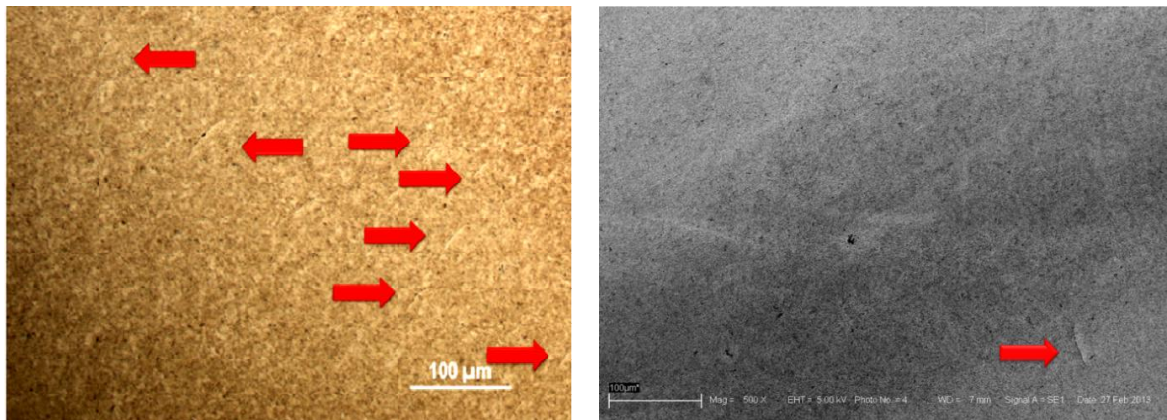


Figura 8.26: Caminos de rodadura luego de 1200 min de ensayo correspondientes a los  $3.5 \times 10^6$  ciclos. (Mag.: Sup.:500x, 5000x; Inf.: 10000x).

El ferrograma correspondiente a 1560 min [ $3.1 \times 10^6$  ciclos] muestra un abrupto incremento en el número de partículas esféricas, tal como puede observarse en las ferrografías de las Figuras 8.27. En esta última etapa fue detectada la presencia de partículas esféricas conteniendo hierro y oxígeno (ver Figura 8.28) como así también un pequeño número de partículas con hierro, cromo y oxígeno (ver Figura 8.29).



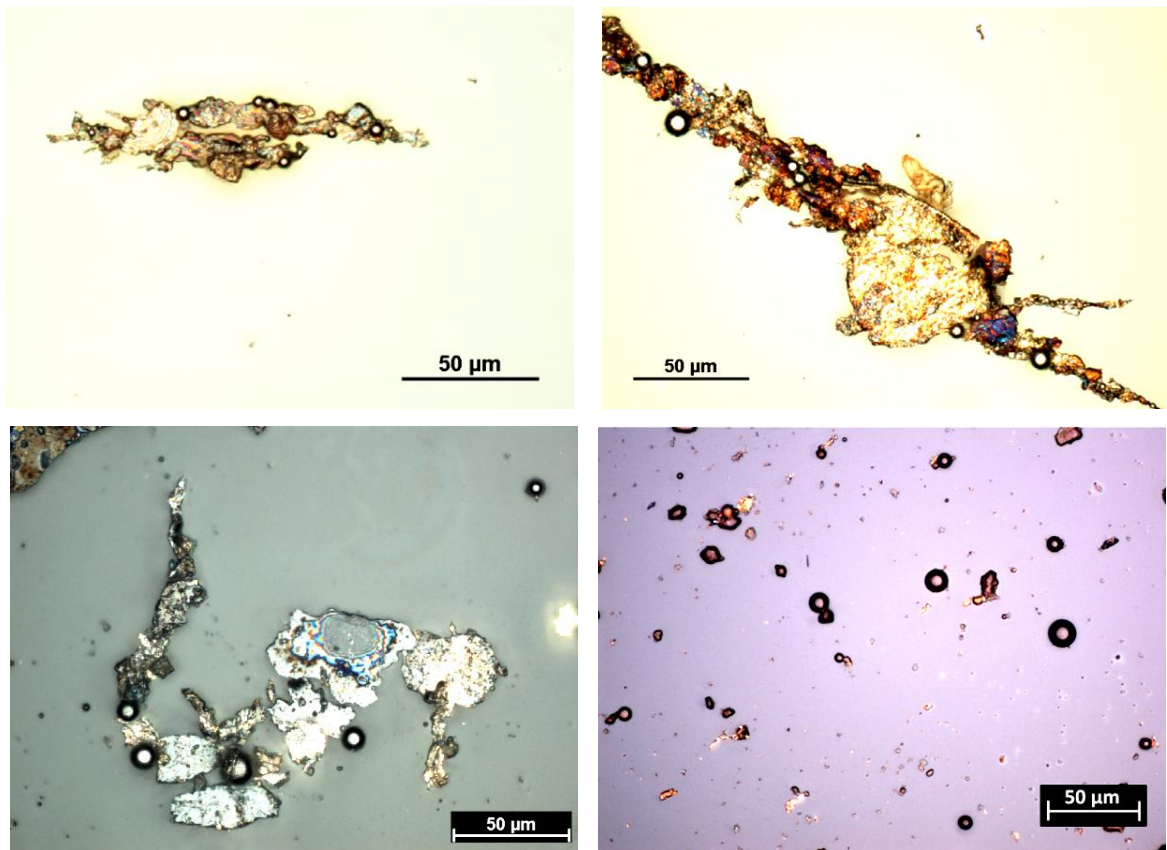


Figura 8.27: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 1560 min correspondientes a los  $3.2 \times 10^6$  ciclos aproximadamente (Mag.: 500x.).

Las partículas detectadas con elementos hierro-oxígeno en composición tienen similares características a las producidas en las etapas previas (de asentamiento y estacionaria), tanto en composición como en tamaño y morfología. La única diferencia significativa presentada en esta etapa es el abrupto incremento en cantidad en el ferrograma. Este elevado número de partículas esféricas menores a  $12 \mu\text{m}$  coincide con lo establecido por la bibliografía [10-13]. Además, el análisis de la composición de las partículas es totalmente repetitivo a las etapas anteriores. La Figura 8.30 muestra dos espectros de Raman con picos en  $\sim 240$ ,  $\sim 340$  y  $\sim 650 \text{ cm}^{-1}$  característicos de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita), y una posible mezcla con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematita) debida al pico  $\sim 1300 \text{ cm}^{-1}$ .

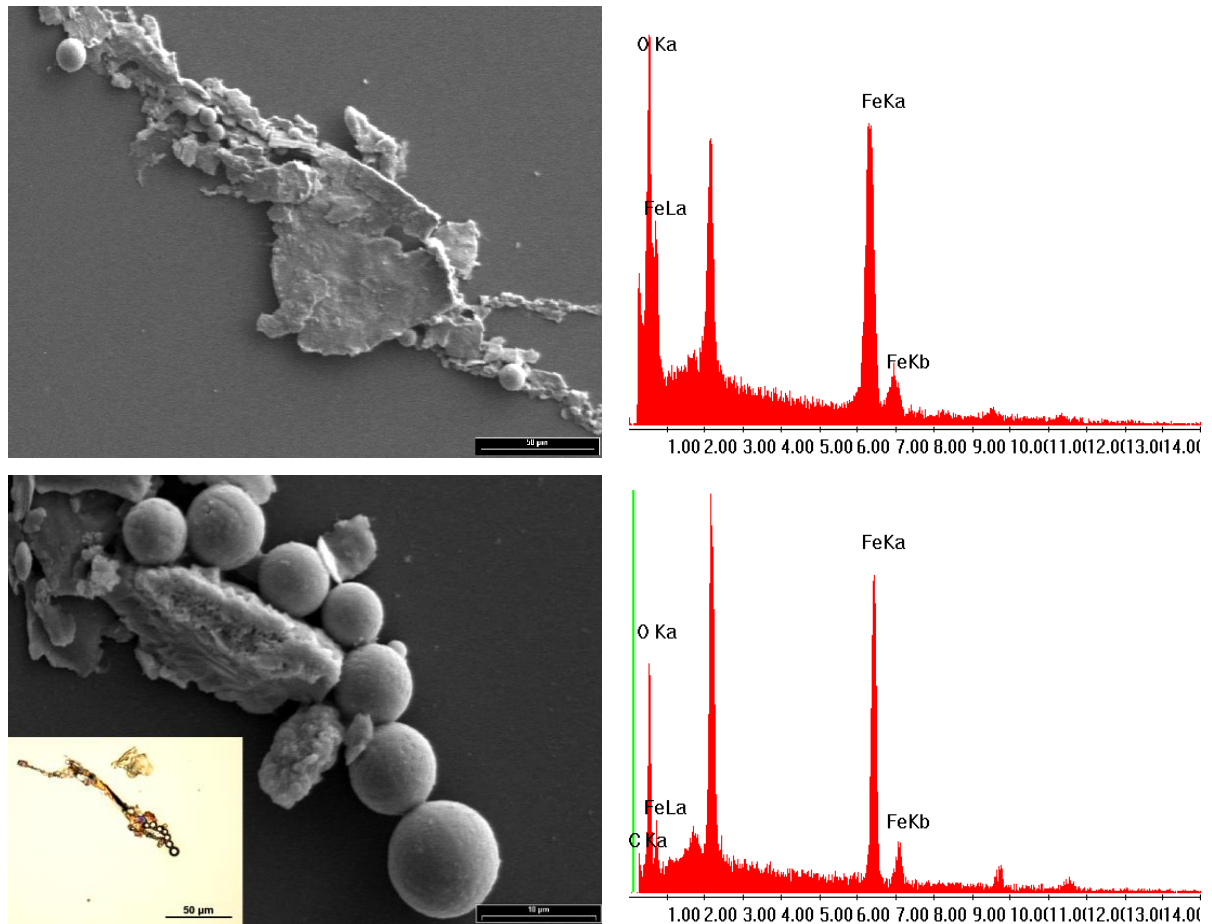


Figura 8.28: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 1560 min correspondientes a los  $3.2 \times 10^6$  ciclos aproximadamente, junto con el espectro EDS sin presencia de cromo (Mag.: Óptico 500; SEM 5000x).

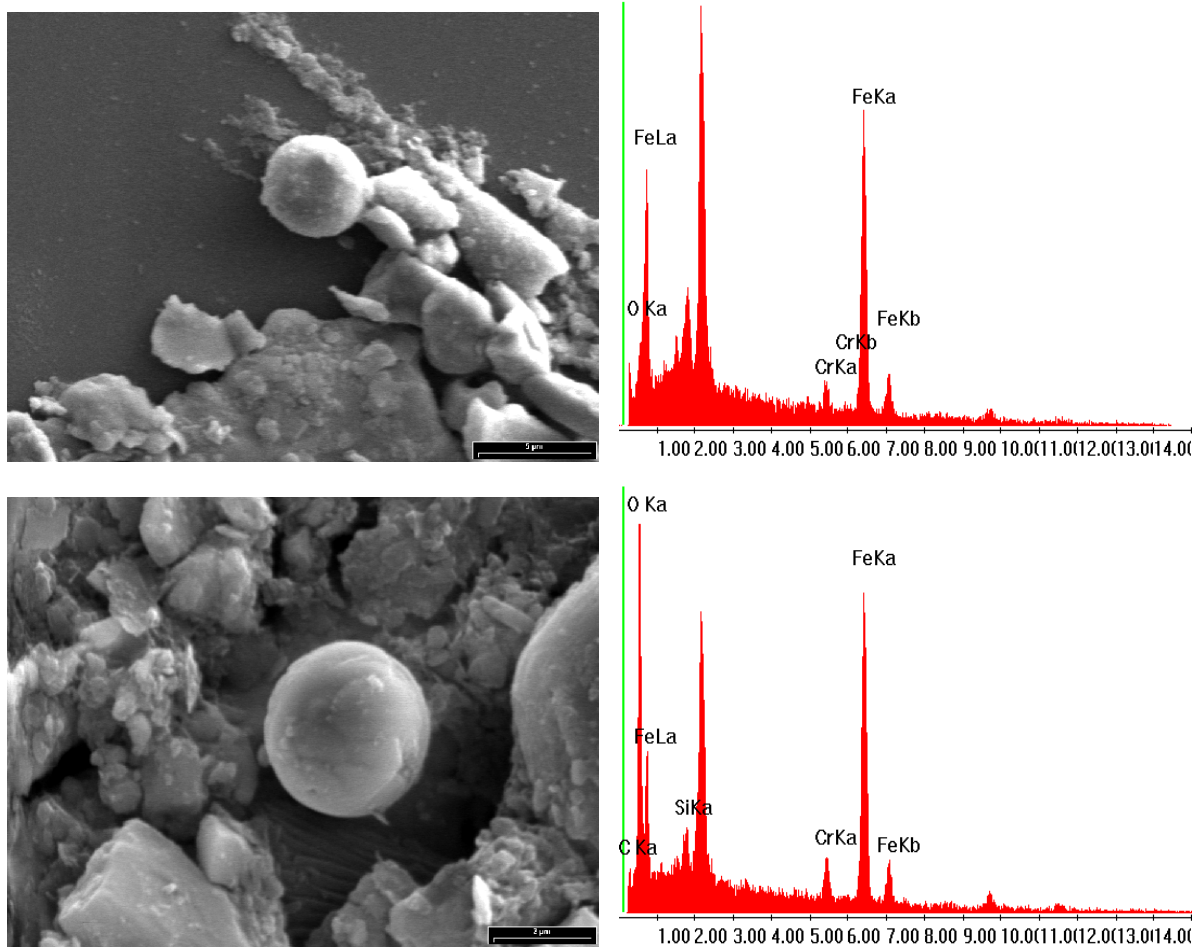


Figura 8.29: Partículas esféricas de ferrografías tomadas a los 1560 min correspondientes a los  $3.2 \times 10^6$  ciclos aproximadamente, junto con el espectro EDS con presencia de cromo (Mag.: Sup.:6000x; Inf.:10000x).

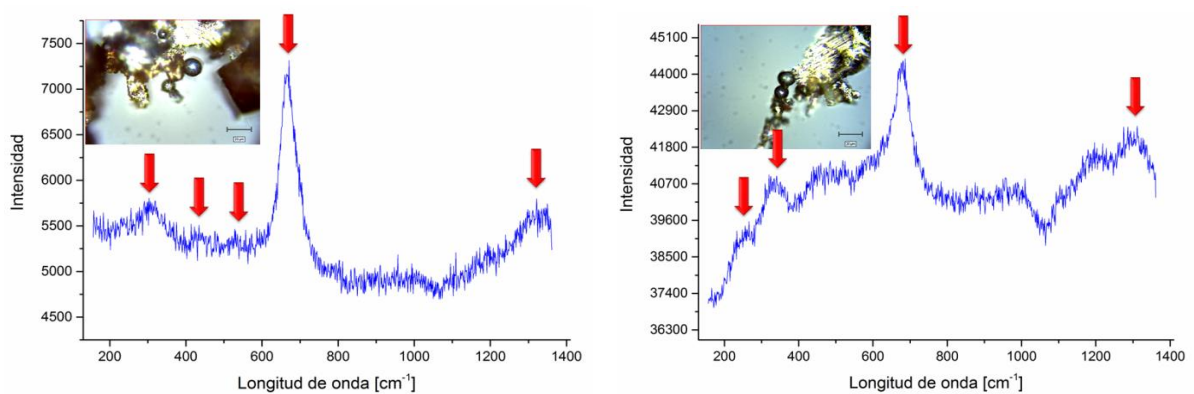


Figura 8.30: Espectro Raman de partícula perteneciente a una ferrografía tomada a los 1560 min [ $3,2 \times 10^6$ ].

La Figura 8.31 muestra algunas partículas en posible proceso de generación, sin la morfología esférica definida. Si bien la hipótesis de generación por aglomeración planteada



anteriormente sigue siendo aplicada en esta etapa, resulta necesario establecer una causal del incremento abrupto de partículas sin presencia de cromo, y la aparición esporádica de partículas con cromo. La Figura 8.32 exhibe una partícula esférica encontrada sobre las superficies de rodadura.

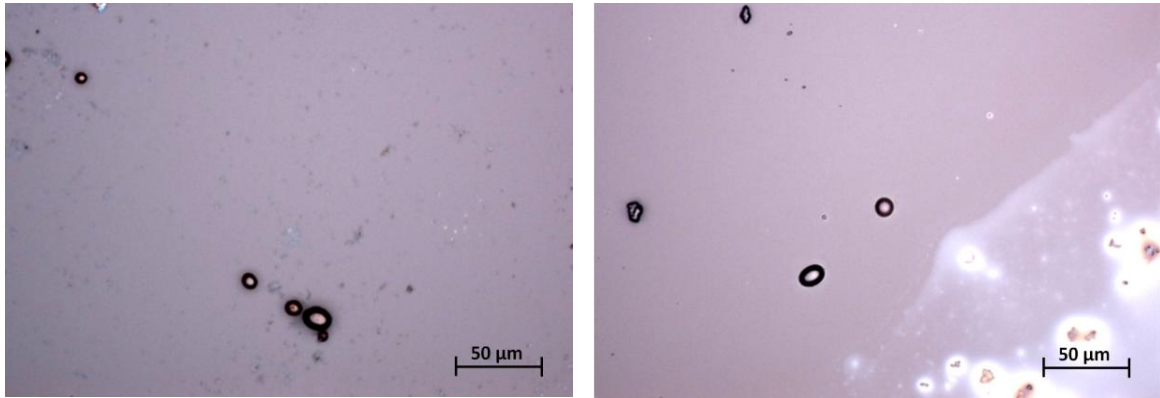


Figura 8.31: Partículas esféricas tomadas de ferrografías a los 1560 min ( $3,2 \times 10^6$  ciclos) en proceso de formación (Mag.: Sup.: Izq.: 6000x; Der.: 10000x; Inf.: 500x).

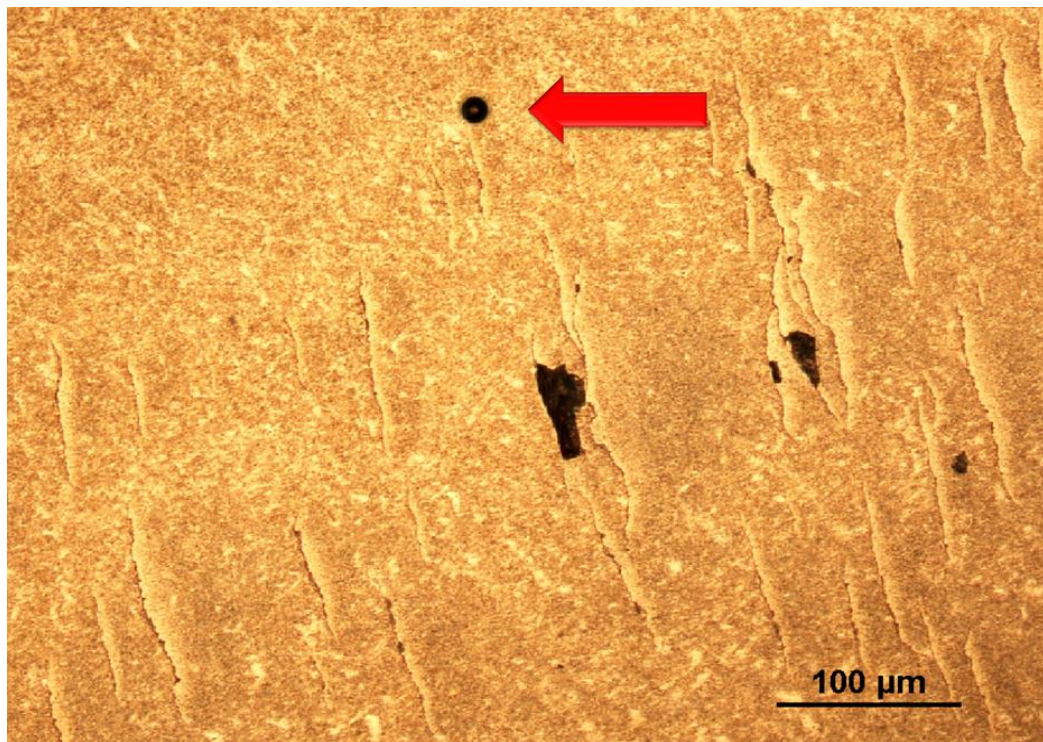


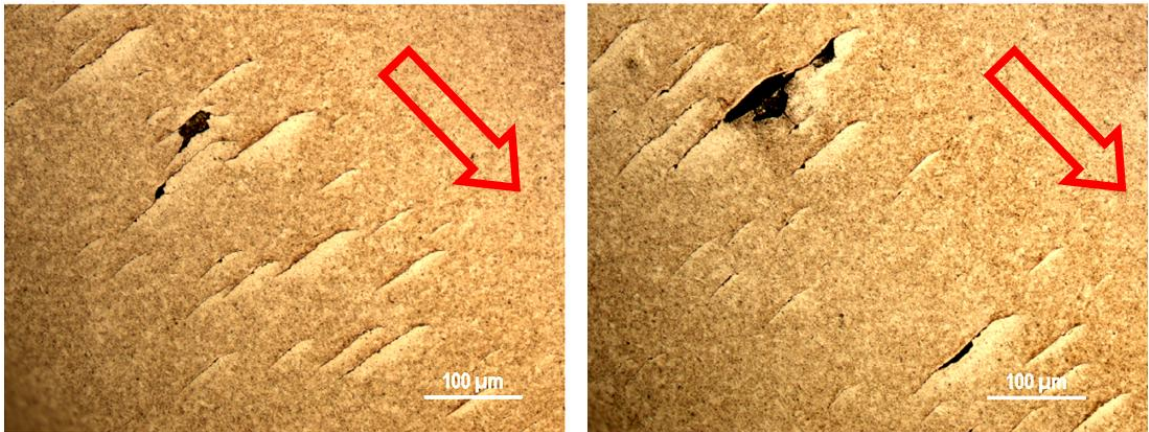
Figura 8.32: Partícula esférica encontrada en la superficie de rodadura luego de 1560 min de ensayo correspondientes a los  $3.2 \times 10^6$  ciclos. (Mag.: 500x).

Como se puede observar en las Figuras 8.33 y 8.34, las zonas aledañas a las fisuras sufren un cambio morfológico producto del contacto de las superficies rodantes o mejor dicho, a

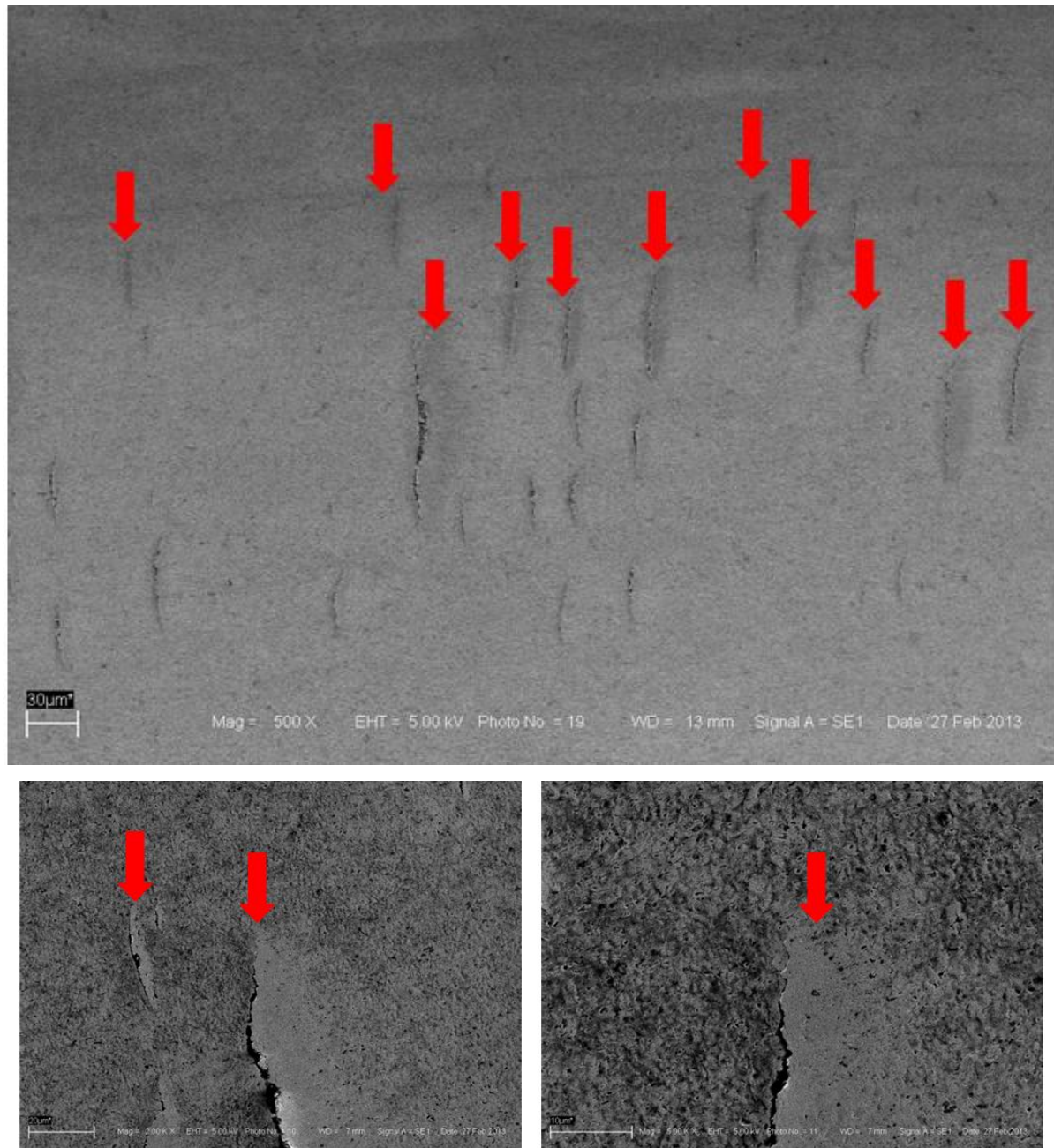


causa de la disminución de  $\lambda$  sobre la zona fisurada. Este cambio en el parámetro  $\lambda$  localizado, produce una zona tribológica desfavorable de contacto, y por ello el abrupto cambio topológico.

La Figura 8.34 muestra la marcada diferencia morfológica mencionada en las zonas aledañas a la fisura. Se observa en la figura la clara diferencia morfológica señalizada mediante flechas.



*Figura 8.33: Fisuras superficiales de los caminos de rodadura luego de 1560 min de ensayo correspondientes a los  $3.2 \times 10^6$  ciclos. La flecha indica el sentido del movimiento de rodadura (Mag.: 500x).*



*Figura 8.34: Morfología superficial de los caminos de rodadura tomada a los 1560 min ( $3.2 \times 10^6$  ciclos) donde se observa gran cantidad de fisuras superficiales abiertas las (Sup.: 500x). Detalle de la morfología en la zona cercana a la fisura (Izq.: 3000x; Der.: 5000x).*

Sobre las superficies de los caminos de rodadura se observó gran cantidad de defectos superficiales los cuales coalescen para convertirse en lugares propicios para el crecimiento de fisuras [9]. La rugosidad, tanto de los elementos rodantes, como de las pistas de rodadura se incremento notablemente. El parámetro de rugosidad  $S_a$  de los caminos de rodadura aumentó a  $0.132 \mu\text{m}$ , mientras que para los elementos rodantes se incrementó a  $0.050 \mu\text{m}$  (ver tabla 8.7). En las Figuras 8.35 y 8.37 se observan los perfiles de rugosidad de las pistas de rodadura



y los elementos rodantes respectivamente. Asimismo, en la Figura 8.36 se presenta una imagen donde se observa la morfología de los elementos rodantes tomada a los 1560 min.

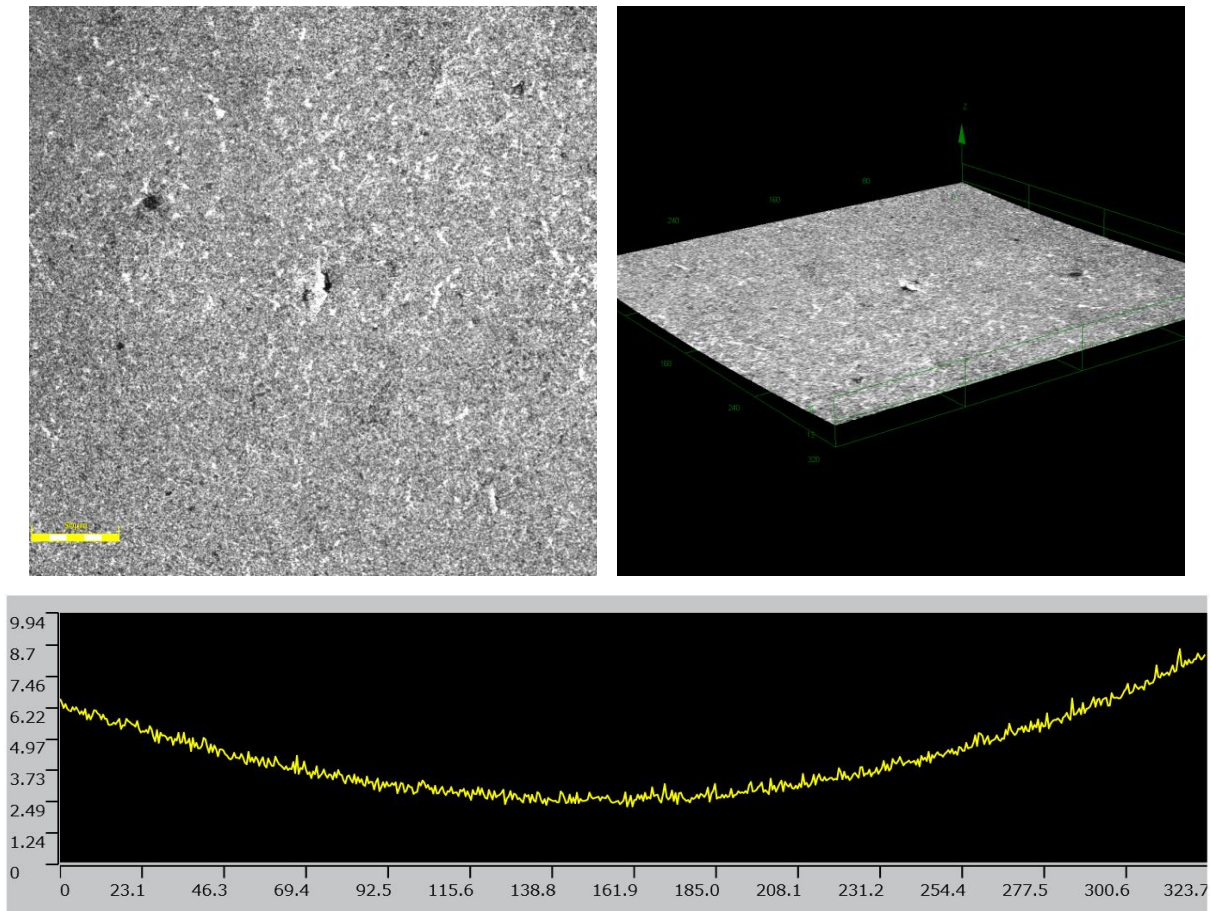


Figura 8.35: Morfología superficial de los caminos de rodadura tomada a los 1560 min ( $3.2 \times 10^6$  ciclos) (Sup. Izq.) y perfil superficial realizado con microscopia laser confocal sobre un área (Sup. Der.) y una línea (Inf.) (Mag. 500x).

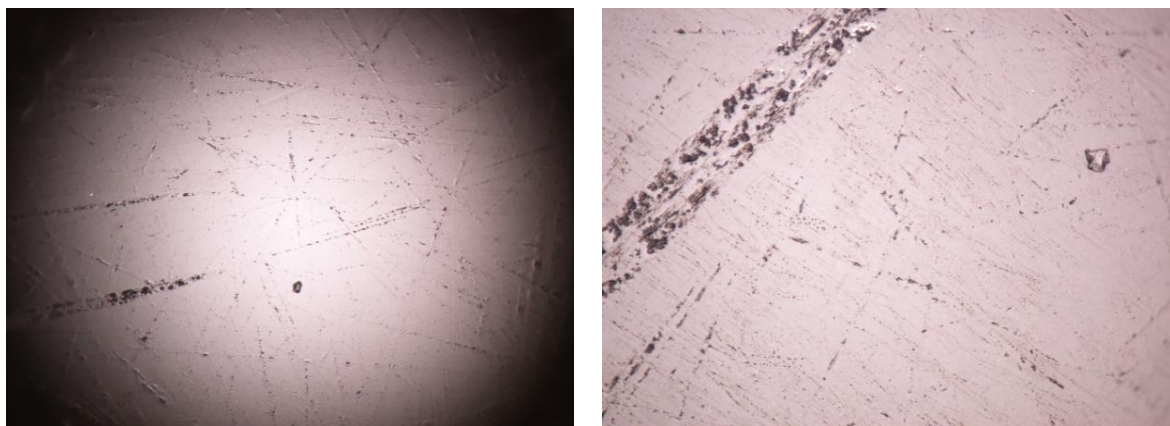
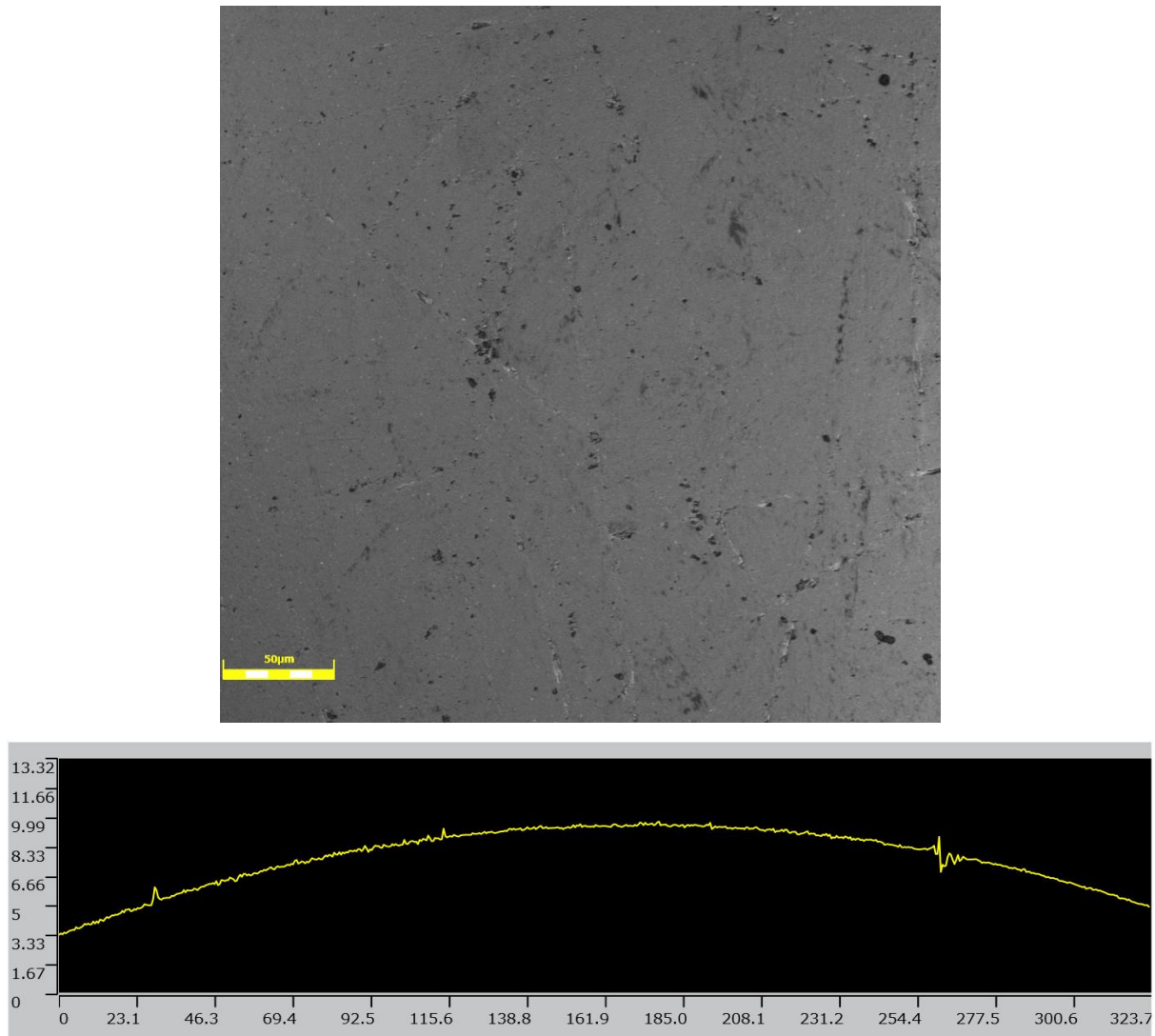


Figura 8.36: Morfología superficial de los elementos rodantes tomada a los 1560 min correspondiente a los  $3.2 \times 10^6$  ciclos (Mag.: Izq.: 100x; Der.: 200x).



*Figura 8.37: Morfología superficial de los elementos rodantes tomada a los 1560 min correspondiente a los  $3.2 \times 10^6$  ciclos y un perfil superficial del mismo realizado con microscopia laser confocal (Mag. 500x).*

El parámetro  $\lambda$  generalizado disminuyó notablemente, debido a los cambios morfológicos desde los comienzos del ensayo. La tabla 8.8 muestra la rugosidad de las superficies de rodadura, y el cálculo de  $\lambda$ , continuando con una lubricación del tipo “marginal”. Cabe destacar que este parámetro lambda está calculado en base a una teoría donde las superficies están libres de fisuras, por ello, se definió como  $\lambda$  generalizado, para diferenciarlo del  $\lambda$  local, el cual fue mencionado anteriormente.

Tabla 8.7: Parámetros de rugosidad de las superficies en la etapa final de degradación por FCR (1560 min).

Rugosidad					
Parámetro	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sp [ $\mu\text{m}$ ]	Sv [ $\mu\text{m}$ ]
Pista	0.132	3.617	0.170	1.070	2.547
Esfera	0.050	2.679	0.082	1.708	0.971

Tabla 8.8: Espesor de película lubricante en la etapa final de degradación por FCR (1560 min).

Sa Pista [ $\mu\text{m}$ ]	Sa Esfera [ $\mu\text{m}$ ]	Sa prom [ $\mu\text{m}$ ]	Esp min [ $\mu\text{m}$ ]
0.132	0.050	0.141	0.0649
Parámetro $\lambda$			
0.459			

Si bien precedentemente se ha propuesto un mecanismo para explicar la presencia de las partículas con Fe-O (en todas las etapas de desgaste), se desconoce el mecanismo que explique la presencia de las esporádicas partículas esféricas con Fe-O-Cr observadas en la última etapa de desgaste.

Para identificar el mecanismo de formación de este tipo de partículas, se analizaron las superficies mediante espectrometría XPS. La Figura 8.38 muestra el espectro XPS realizado sobre la superficie a los 90 min de comenzado el ensayo. Estos estudios, confirman que a nivel superficial no se evidenció la presencia del elemento Cr. Sobre la figura, se ha señalado con una flecha la zona donde se debería encontrar el pico correspondiente al  $\text{Cr}_{2p3}$  a una energía aproximada de 576 eV.

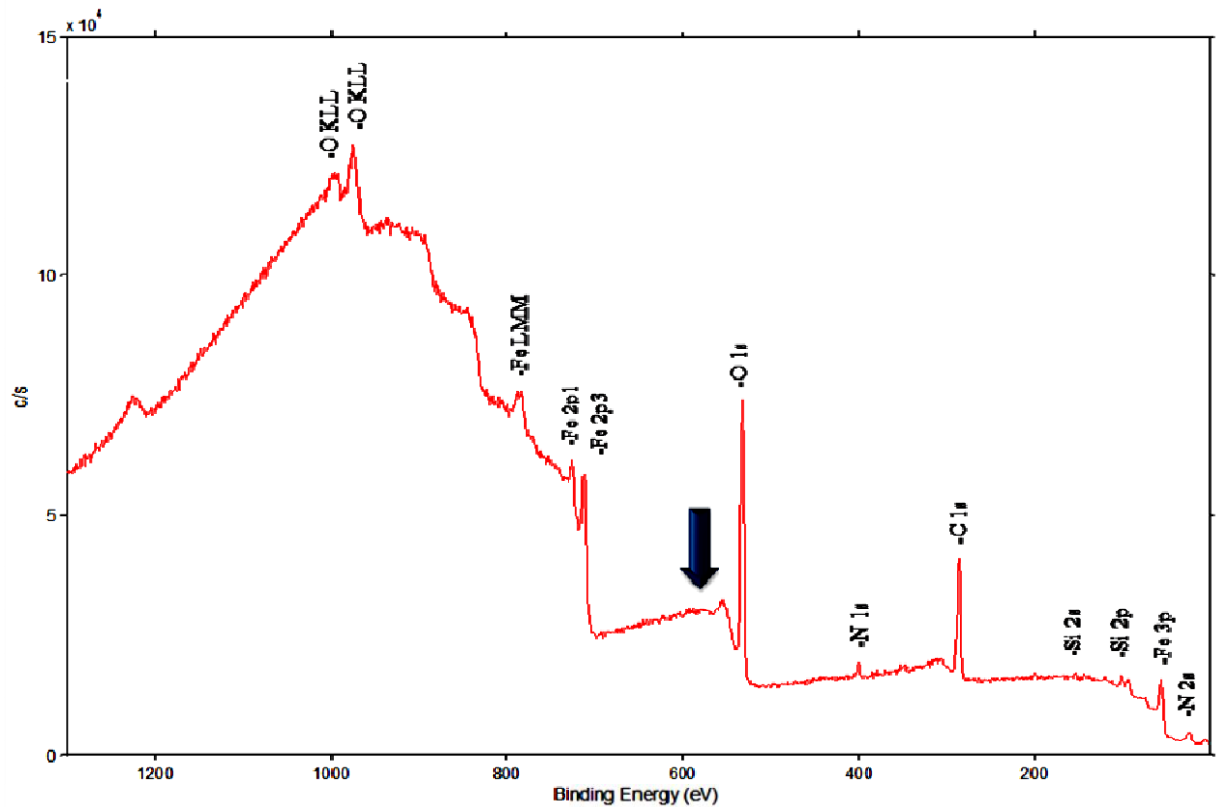


Figura 8.38: Espectro XPS de análisis superficial de pista de rodadura sin la presencia de cromo a los 90 min de ensayo [ $1,9 \times 10^6$  ciclos].

Luego de un bombardeo de iones argón (“sputtering”) a una potencia de 3Kv-7mA durante un tiempo de 4 min y, lográndose una profundidad de penetración sobre el acero aproximada de 300 nm, se observa la presencia de Cr (ver Figura 8.39).



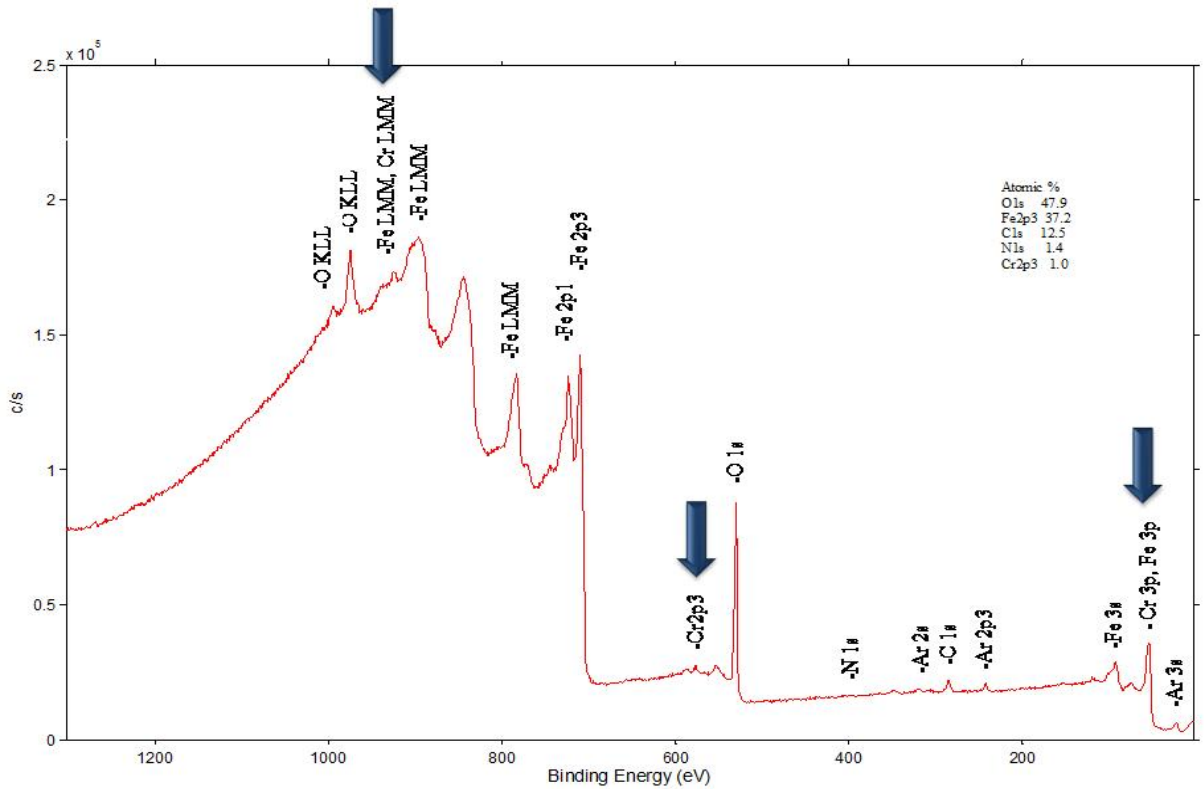


Figura 8.39: Espectro XPS de análisis a una profundidad de 300 nm con presencia de cromo (1%) a los 90 min de ensayo [ $1,9 \times 10^6$  ciclos].

La presencia de Cr se adjudica al carburo de cromo, dado que se encuentra un pequeño, pero claramente apreciable pico a los 576 eV. Del análisis bibliográfico es posible inferir que el cromo se encuentra mayoritariamente en los carburos del acero, lo cual es una característica propia de los aceros para rodamientos. Los carburos tienen un mayor porcentaje de cromo que la matriz ferrítica lo cual le otorga mejores propiedades mecánicas [14]. En la Figura 8.40 se observa una metalografía realizada con el agente reactivo “Marble” (10 g CuSO<sub>4</sub> en 50 ml de HCl y 50 ml de agua) durante 5 segundos sobre las pistas de rodadura. En la micrografía se presenta una clara dispersión de carburos (puntos blancos) en el sustrato del material con un diámetro promedio = 0.7  $\mu$ m. Los carburos fueron aún más evidentes mediante el incremento de contraste realizado con un software de diseño gráfico Gimp 2.8 (ver Figura 8.40 Der.). Los carburos dispersos en el sustrato del material, son los principales responsables de la concentración de cromo.

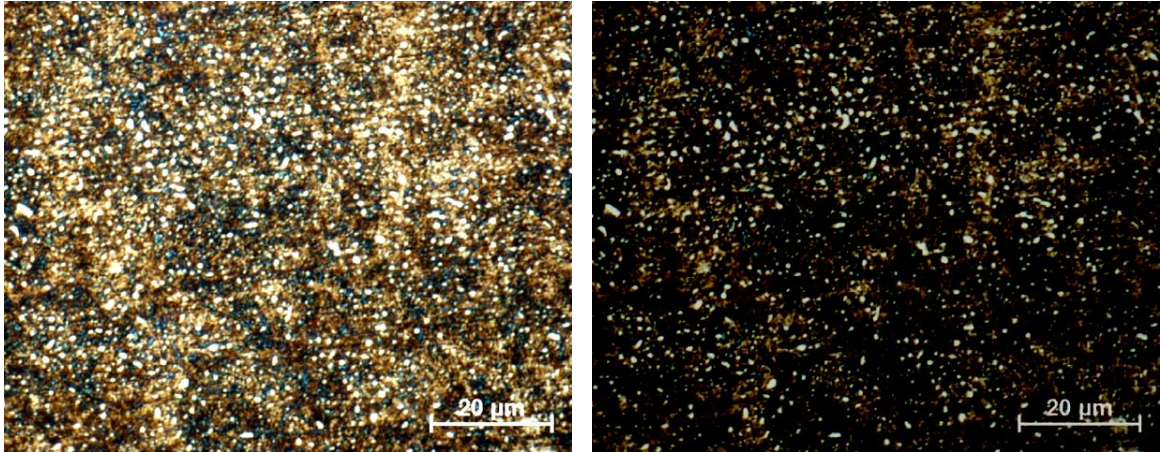


Figura 8.40: Metalografía de las pistas de rodadura (AISI-SAE 52100).

Si se analiza la concentración de oxígeno sobre la superficie del camino de rodadura en profundidad, es posible evidenciar que la capa de óxido en la etapa final de desgaste es mucho menor que la generada en la primer etapa de asentamiento. La Figura 8.41 muestra un análisis de 30 min de ablación a una potencia de 3kV-7mA con análisis de oxígeno en intervalos de 2 min. generando un total de 15 capas de análisis. Posteriormente, a los 10 min se miden aproximadamente 200 cuentas correspondientes a la energía 528 eV del oxígeno, a diferencia de la etapa de asentamiento donde se midieron ~500 (ver Fig. 8.14), es decir, la capa de óxido superficial es mucho menor en esta última etapa, dejando los carburos de cromo más cercanos a la superficie.

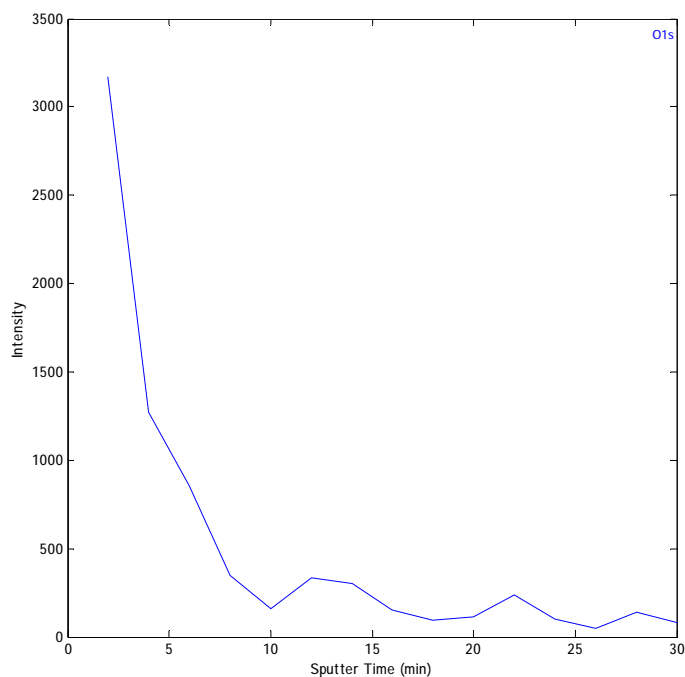


Figura 8.41: Perfiles de ablación iónica con decaimiento de la concentración de oxígeno con el aumento de la profundidad.

Los espectros de perfil de ablación realizados en intervalos de tiempo pueden ser observados en la Figura 8.42. En la misma se aprecian las diferentes capas de análisis, con los valles correspondientes al elemento de interés (O1s) en una energía cercana a 528 eV.

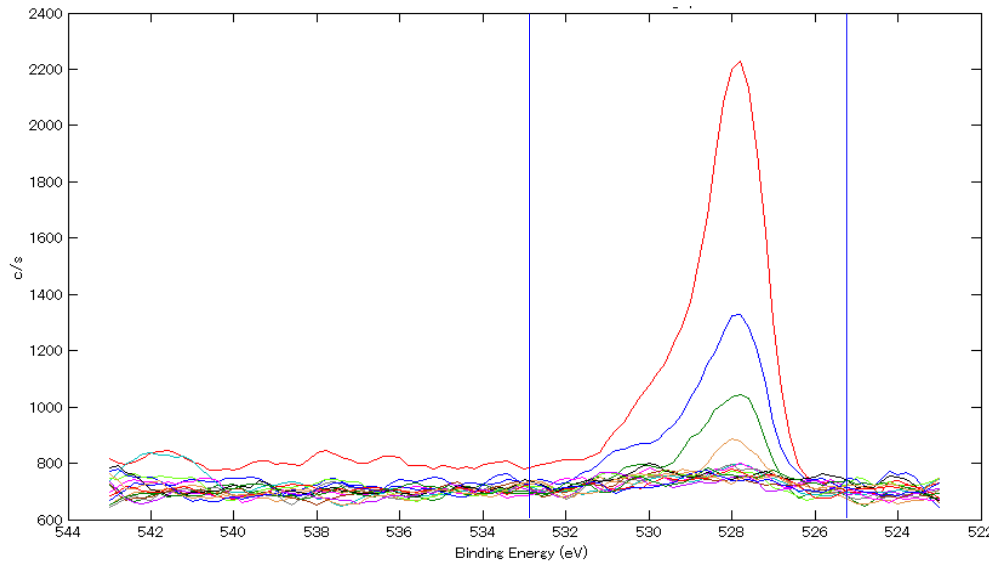


Figura 8.42: Perfiles de ablación iónica con decaimiento de la concentración de oxígeno con el aumento de la profundidad.

### 8.3 DISCUSION DE RESULTADOS

Hasta la actualidad existe controversia respecto de la generación de estas partículas esféricas menores a  $12\ \mu\text{m}$ . Una hipótesis señala que son producidas por redondeo y pulido de partículas producidas por mecanismo adhesivo [15-18]. Mientras que, una segunda hipótesis asocia la generación de partículas con la fusión superficial que ocurre como resultado de altas temperaturas instantáneas entre puntos de contacto, de ambas superficies, con movimiento relativo [19-23]. En tal sentido, E. Doyle [24] ha mostrado que cuando las partículas de desgaste alcanzan una temperatura cercana a  $900\ \text{°C}$ , es posible la formación de una esferoidización sólida que puede causar la aparición de partículas esféricas. Cabe destacar que esta condición es muy común en los procesos de abrasión, donde se observan generalmente partículas esféricas debidas a las altas temperaturas generadas, pero tales condiciones no resultan equivalentes a las condiciones de ensayo de este estudio. Asimismo, también trabajos teórico-experimentales realizados por Hsu et al. [25] han demostrado que para condiciones de ensayo EHD similares a los descritos en este capítulo, la temperatura no supera los  $450\ \text{°C}$ . Los modelos elaborados por Hsu et al, contemplan la deformación elástica y plástica del

contacto entre las asperezas de la superficie, como así también la fricción producto del movimiento relativo.

La presencia de partículas esféricas durante la etapa de asentamiento puede ser explicada por el mecanismo de aglomeración, redondeo y pulido de partículas de desgaste superficial aplicable tanto a las partículas provenientes de las pistas, como de los elementos rodantes. Un esquema del mecanismo de generación propuesto puede verse en la Figura 8.43. El mismo también ha sido propuesto por varios autores para la generación de partículas esféricas en contactos de rodadura [15,16] y contactos deslizantes [17,18].

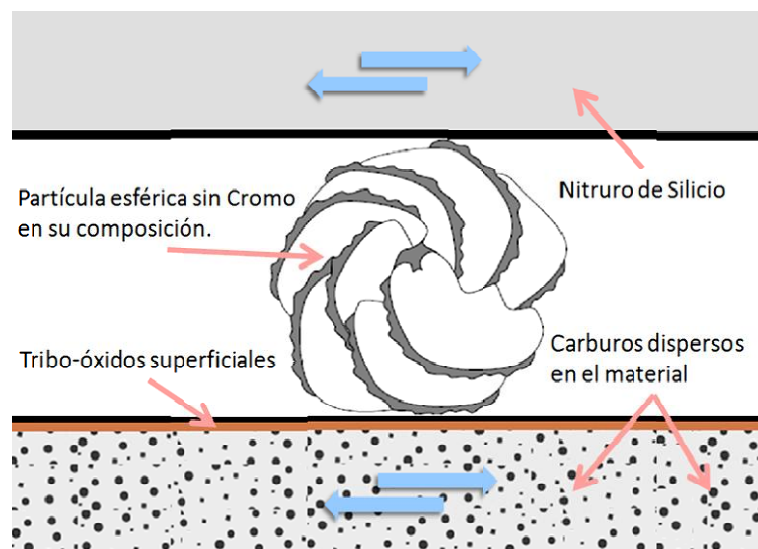


Figura 8.43: Esquema simplificado del proceso de generación de partículas esféricas sin cromo en su composición.

Las partículas se generan por el aglomerado de óxidos de la superficie. Los análisis por Raman permiten evidenciar que están formadas por una mezcla de óxidos de hierro del tipo  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (ver Figuras 8.12 y 8.13). Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por S. Kang y K. Ludema [26] a partir de tribo-óxidos formados durante el deslizamiento puro entre pista de acero AISI 1018 y acero SAE 52100 sumergidos en aceite mineral durante el asentamiento (breaking in). Por otro lado, estudios realizados en acero por T. Quinn et al [27-29], han demostrado que a temperaturas menores a  $\sim 600$  °C se generan energías de activación necesarias para la obtención de los óxidos previamente descriptos, pero no para formar FeO (Wustita), que se genera por encima de  $\sim 600$ °C. Esta fase no ha sido encontrada en ninguna de las partículas de desgaste analizadas.

Cabe destacar que la presencia de Nitruro de Silicio (ver Fig. 8.10) refuerza la teoría sobre el proceso de generación propuesto, ya que el punto de fusión de esta fase es aún mayor que el

del acero AISI-SAE 52100 (mayor a 1500 °C [30]), postergando aún más la teoría de mecanismo de generación por fusión superficial.

De modo análogo, durante la etapa de desgaste estacionaria, la generación de partículas esféricas se promueve por el mismo mecanismo de formación que el establecido para la etapa asentamiento.

Finalmente en la última etapa de desgaste acelerado que conduce a la falla, se produce el daño superficial producto de FRC, en el cual coexisten varios mecanismos de formación actuando simultáneamente.

Por un lado, el incremento abrupto de partículas esféricas observado en esta última etapa podría explicarse por el mismo mecanismo de aglomeración de las etapas previas.

Sin embargo, a medida que el régimen de lubricación tiende hacia marginal, el espesor de película lubricante y el espesor de óxido se reduce (ver resultados de XPS) con lo cual, se desarrollan zonas cercanas a las fisuras (ver Fig. 8.34), que propician la generación de gran cantidad de partículas esféricas, siendo responsables del incremento abrupto observado en los ferrogramas. Esto permitiría explicar el período de incubación entre la aparición de las fisuras, y el aumento abrupto en la cantidad de partículas esféricas ya que a medida que las fisuras crecen, las zonas mencionadas aumentan. Además, estos cambios morfológicos puntuales no se detectan para fisuras menores a ~20  $\mu\text{m}$  de longitud, lo cual justifica el retardo en la generación de partículas esféricas. Asimismo también la generación de partículas con cromo podría explicarse con este mecanismo, dado que en esta etapa los carburos de cromo están más expuestos a la superficie, lo cual aumenta la posibilidad de participación en la generación de partículas esféricas.

La Figura 8.44 muestra un esquema de las teorías enunciadas para la generación de partículas esféricas con el elemento Cr. Como se ve en la imagen, existe una zona aledaña a la fisura donde los carburos están cercanos a la superficie, con lo cual se posibilita la transferencia a las partículas esféricas. Estas partículas se diferencian de las partículas generadas en las etapas anteriores, debido a que los carburos ricos en Cr permanecían cubiertos por los tribo-óxidos superficiales generados en el contacto (ver Fig. 8.43).

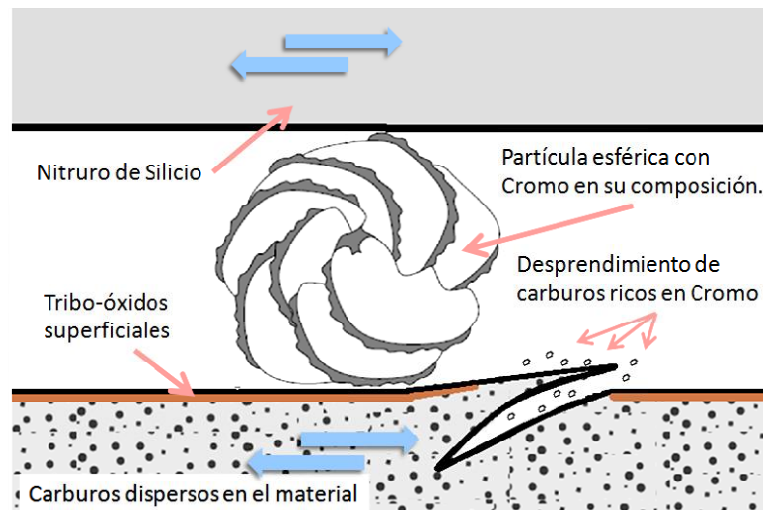


Figura 8.44: Esquema simplificado del proceso de generación de partículas esféricas con cromo en su composición.

Si bien, de acuerdo a la evidencia experimental, resultaría altamente probable que la presencia de cromo en las partículas esféricas se nutra por la posible aglomeración de partículas desprendidas en los labios de fisura, también es posible la participación de otro mecanismo. El mismo incluiría la generación de partículas esféricas por desprendimiento del interior de la fisura. Las partículas desprendidas de material con posible presencia de carburos de cromo luego se aglomerarían produciéndose esferas mediante el mismo mecanismo de generación propuesto para las etapas de asentamiento y estacionaria.

Este segundo mecanismo de formación, también podría explicar la aparición de gran cantidad de partículas esféricas en la etapa final de FCR, además de la aparición de la presencia de cromo en las mismas. B. Loy et al. y D Scott et al. [31-32] han demostrado que partículas esféricas podrían producirse además en el interior de las fisuras debido al movimiento relativo de las superficies de fractura. En este mecanismo, a diferencia del planteado anteriormente para las otras etapas de desgaste, las superficies de generación (interiores de las fisuras) estarían libres de los tribo-óxidos detectados sobre las superficies de rodadura, con lo cual, partículas con carburos de Cr podrían participar libremente en la formación de partículas esféricas. La Figura 8.45 muestra una representación del modo de formación propuesto.



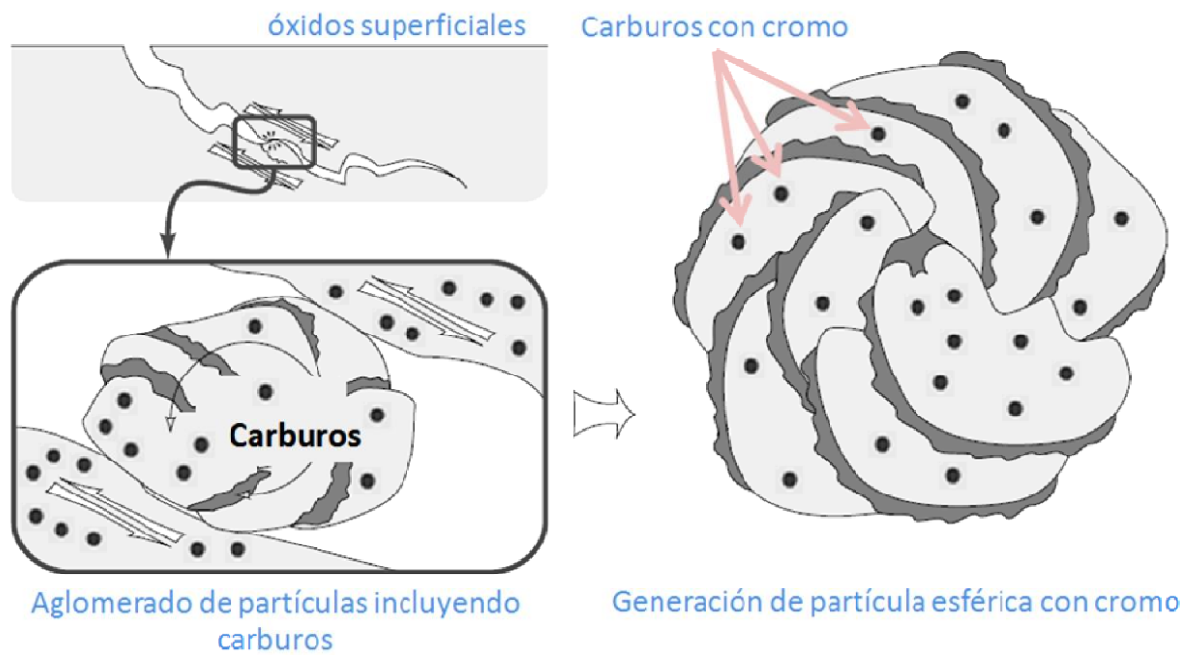


Figura 8.45: Esquema simplificado del proceso de generación de partículas esféricas en el interior de la fisura con cromo en su composición [adaptado de 33].

#### 8.4 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el estudio de contacto tribológico puntual, es posible concluir que:

- Las partículas esféricas menores de 12  $\mu\text{m}$  con elementos constitutivos hierro-oxígeno se generan en todas las etapas de desgaste, en diferentes cantidades. Los resultados sugieren que estas partículas tienen el mismo modo de formación en las diferentes etapas del desgaste y además el mecanismo de formación propuesto establece que su generación es causada por un proceso de aglomeración, redondeo y pulido de partículas de óxido desprendidas en las superficies de los caminos de rodadura.

- En la degradación de la superficie por la fatiga de contacto por rodadura también se generan partículas esféricas menores a 12  $\mu\text{m}$  con hierro, cromo y oxígeno.

- La aparición de fisuras en los caminos de rodadura producto de la rodadura de contacto es seguido por una aparición masiva de partículas esféricas de desgaste. Además existe un intervalo de tiempo de incubación, entre las primeras fisuras y la aparición masiva de partículas esféricas.

- Con este estudio, se aporta al conocimiento en el área de mantenimiento predictivo por análisis de partículas, dado que la identificación de partículas esféricas con hierro, oxígeno y

romo realizados sobre equipos industriales con rodamientos lubricados, permite conocer el estado de los rodamientos, detectar el daño por fatiga de contacto por rodadura y prevenir roturas más severas.

## 8.5 REFERENCIAS

- [1] Hertz, H. (1986). *Miscellaneous Papers on the Contact of Elastic Solids*. Translation by Jones, De McMillan.
- [2] Blau, P. J. (1992). *ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. vol. 18. USA: ASM International Handbook Committee.
- [3] ALGOR. *ALGOR Software V21*, 2009
- [4] Holmberg K., Matthews A. "Coatings Tribology", Ed Elsevier Science, 15 Apr (2009) - 576 pages ISBN : 9780080931463, 9780444527509
- [5] Shebanova, O. N., y Lazor, P. (2003). Raman spectroscopic study of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): a new assignment for the vibrational spectrum. *Journal of Solid State Chemistry*, 174; 2424-430.
- [6] Lafuente B, Downs R T, Yang H, Stone N (2015) The power of databases: the RRUFF project. In: *Highlights in Mineralogical Crystallography*, T Armbruster and R M Danisi, eds. Berlin, Germany, W. De Gruyter, pp 1-30
- [7] Quinn, T. F. J., Sullivan, J. L., y Rowson, D. M. (1984). Origins and development of oxidational wear at low ambient temperatures. *Wear*, 94(2), 175-191.
- [8] Perkin-Elmer *INFRARED Bulletin 20, IRB-20*, Perkin-Elmer, Norwalk, CT
- [9] *Friction, Lubrication, and Wear Technology Fatigue and Fracture Properties of Stainless Steels*, ASM Metals Handbook, vol. 19 ASM International, Ohio (1996) pp. 1826–1827 ASM Metals Handbook Volume 18
- [10] Anderson, D. P. (1982) *Wear Particle Atlas (Revised)* prepared for the Naval Air Engineer, ing Center, Lakehurst, NJ 08733, (pp. 125-134). Report NAEC-92-163, Approved for Public Release.
- [11] Scott, D. (1975). Debris examination—a prognostic approach to failure prevention. *Wear*, 34(1), 15-22.
- [12] Seifert, W. W., y Westcott, V. C. (1972). A method for the study of wear particles in lubricating oil. *Wear*, 21(1), 27-42.
- [13] Westcott, V., y Seifert, W. W. (1973). Investigation of iron content of lubricating oil using a ferrograph and an emission spectrometer. *Wear*, 23(2), 239-249.
- [14] Filipek, J. W., y Rincón, E. (2005). Influencia del tamaño de los carburos del acero para cojinetes de bolas relacionada con estabilización de diámetros y las propiedades mecánicas después del tratamiento térmico final. *Revista de metalurgia*, 41(Extra), 324-329.
- [15] Conor, P. C., y McRobie, D. E. (1981). Wear debris generated during high velocity sliding contact. *Wear*, 69(2), 189-204.
- [16] Christensen, C. (1979). On the origin of spherical particles found on fatigue fracture surfaces and ferrograms. *Wear*, 53(1), 189-193.
- [17] Scott, D., y Mills, G. H. (1973). Spherical debris—its occurrence, formation and significance in rolling contact fatigue. *Wear*, 24(2), 235-242.
- [18] Komanduri, R., y Shaw, M. C. (1975). Formation of spherical particles in grinding. *Philosophical Magazine*, 32(4), 711-724.
- [19] Hurricks, P. L. (1974). The occurrence of spherical particles in fretting wear. *Wear*, 27(3), 319-328.

- [20] Broszeit, E., y Hess, F. J. (1971). Diskussion zu "A scanning electron microscope study of fracture phenomena associated with rolling contact surface fatigue failure". *Wear*, 17(4), 314-315.
- [21] Jones, W. R. (1976). Spherical artifacts on ferrograms. *Wear*, 37(1), 193-195.
- [22] Hack, K., y Fellar, H. G. (1970). Friction and wear characteristics of gold single crystals subjected to low-pressure sliding contact. *Z metallkunde*, 61(5), 394-400.
- [23] Swain, M. V., y Jackson, R. E. (1976). Wear-like features on natural fault surfaces. *Wear*, 37(1), 63-68.
- [24] Doyle, E. D. (1974). Mechanism of Spherical Particle Formation in Wear Debris. *J. Australian Inst. Metals*, 19(4), 276-279.
- [25] Hsu, S. M., Shen, M. C., Klaus, E. E., Cheng, H. S., y Lacey, P. I. (1994). Mechano-chemical model: reaction temperatures in a concentrated contact. *Wear*, 175(1), 209-218.
- [26] S. C. Kang and K. C. Ludema, "The "breaking-in" of lubricated surfaces", *Wear*, 108 (1985) 375-384.
- [27] Quinn, T. F. J. (1971). Oxidational wear. *Wear*, 18(5), 413-419.
- [28] Quinn, T. F. J. (1983). Review of oxidational wear: Part I: The origins of oxidational wear. *Tribology International*, 16(5), 257-271.
- [29] Quinn, T. F. J. (1983). Review of oxidational wear part II: recent developments and future trends in oxidational wear research. *Tribology international*, 16(6), 305-315.
- [30] Goodfellow.com. (2016). Nitruro de Silicio Esfera - Catalogo en línea - Materiales en pequeñas cantidades para el diseño - Goodfellow. [online] Available at: <http://www.goodfellow.com/S/Nitruro-de-Silicio'-Esfera.html> [Accessed 18 Mar. 2016].
- [31] Loy, B., y McCallum, R. (1973). Mode of formation of spherical particles in rolling contact fatigue. *Wear*, 24(2), 219-228.
- [32] Scott, D., y Mills, G. H. (1970). A scanning electron microscope study of fracture phenomena associated with rolling contact surface fatigue failure. *Wear*, 16(3), 234-237.
- [33] Bhushan, B. (2000). *Modern Tribology Handbook*, Two Volume Set. Crc Press.

# Capítulo 9

## *Resultados contacto lineal*

---

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y la discusión a partir de los ensayos de contacto lineal. Se incluyen los resultados de los modelos TEHD y parámetro lambda para las condiciones de los ensayos realizados. Se analiza la morfología de las superficies de fractura como así también el reconocimiento de los trazadores que permiten determinar la penetración del lubricante en el proceso de apertura y cierre de fisuras en rodadura de contacto (FCR) para diferentes lubricantes y tamaños de fisuras. Además, se realizan ferrografías del lubricante para detectar partículas de desgaste esféricas, y analizar su degradación mediante espectroscopia FTIR.

Si bien existen algunos trabajos experimentales sobre la interacción líquido-sólido en fisuras abiertas post-fatiga de contacto, hasta el presente no se había desarrollado un método que permita el estudio sistemático con probetas metálicas a escala de laboratorio del fenómeno mencionado.

### **9.1 CALCULOS TEHD DE CONTACTO LINEAL (PISTA AISI-SAE 4140/RUEDA AISI-SAE 4140)**

Materiales en contacto para esta sección:

- *Pista de Acero AISI-SAE 4140*
- *Elemento rodante: AISI-SAE 4140 (Denominación: AC)*

### 9.1.1 Contacto sin lubricación: Teoría de Hertz

Las presiones de contacto fueron calculadas de acuerdo a la teoría de Hertz [1-2] para una carga aplicada de 3000 Kgen los ensayos realizados con las probetas de acero. Luego, los resultados obtenidos se utilizan como parámetros de inicio en los modelos TEHD con el fin de disminuir el tiempo de convergencia. Mediante el uso del modelo, pudo ser estimado el espesor de película lubricante generado, la presión de contacto modificada y la distribución de temperatura sobre la superficie del contacto lubricado.

Los parámetros más relevantes del contacto, como resultado de la teoría de Hertz se presentan en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1: Resultados de los parámetros del contacto según la teoría de Hertz.

a	Semi-amplitud de contacto	0.603	[mm]
L	Longitud de contacto	25	[mm]
A	Área de contacto	30.15	[mm <sup>2</sup> ]
P <sub>max</sub>	Presión máxima	877.27	[MPa]
P <sub>prom</sub>	Presión promedio	584.84	[MPa]

### 9.1.2 Resultados del modelo TEHD de contacto lineal

Los resultados obtenidos de la presión de Hertz se utilizaron como base para los cálculos TEHD. Se incluyeron en los mismos todas las condiciones ensayadas.

Lubricantes utilizados:

- 100% Glicerina (Denominación: 100%Gl)
- Mezclas de glicerina 75% y agua 25% (Denominación: 75%Gl)
- Mezclas de glicerina 50% y agua 50% (Denominación: 50%Gl)
- 100% agua (Denominación: 100%Ag)

En las Figuras 9.1 y 9.2 se observa el espesor de película lubricante resultante y la presión generada por el contacto. No se muestran los resultados obtenidos para el agua como fluido lubricante a causa de problemas de inestabilidad en la convergencia del modelo. Prácticamente, para las condiciones ensayadas, no se observan diferencias entre las presiones de contacto generadas y la presión de Hertz. Si se analiza la Figura 9.1, el pico de presión propio de la rodadura con lubricación (zona marcada con flecha) es muy pequeño para las condiciones del ensayo de contacto lineal. Este resultado es muy satisfactorio, ya que al ser

prácticamente despreciable, la máxima presión de contacto es equivalente a la calculada por Hertz, sin la distorsión producida por una variable adicional en el estudio.

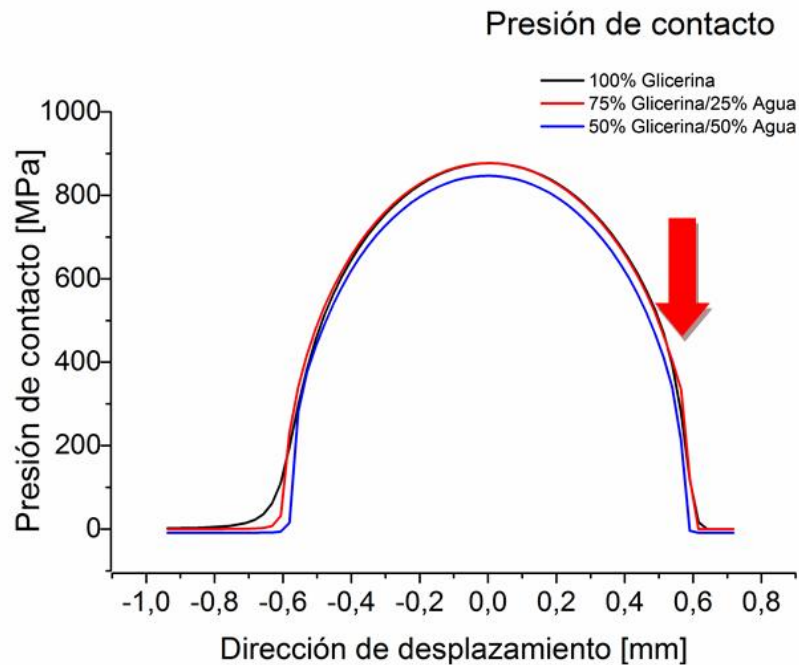
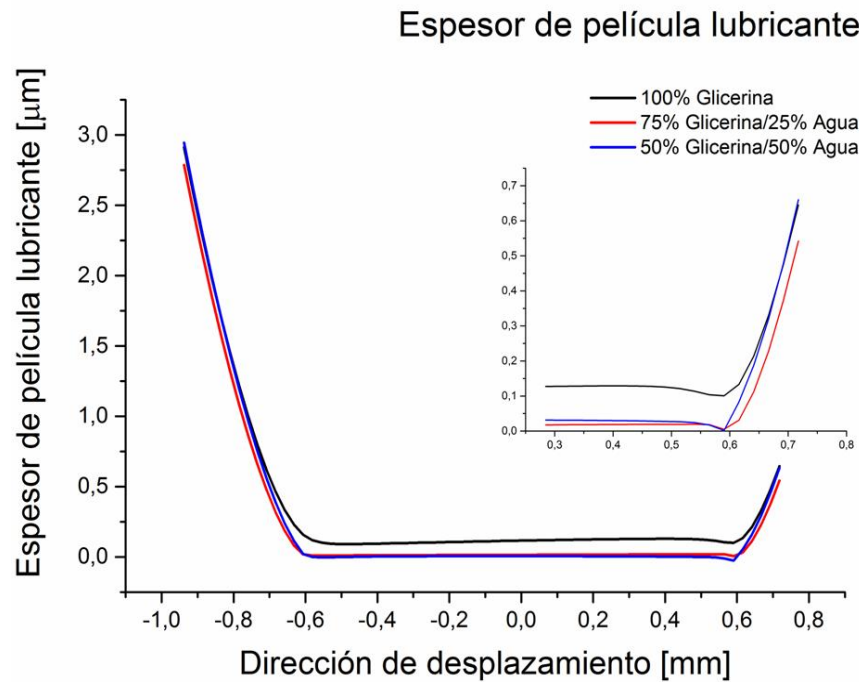


Figura 9.1: Resultados del modelo TEHD para la presión de contacto generada.

Se observa en la Figura 9.2 que el espesor de película lubricante se ve abruptamente disminuido con una disolución del 25% con agua. Pasando de un espesor mínimo de  $0.100 \mu\text{m}$  con glicerina a  $0.001 \mu\text{m}$  con una disolución del 25% con agua. La disolución del 50% con agua tiene un espesor de  $0.005 \mu\text{m}$ .

El espesor de película lubricante es prácticamente cercano a 0 para las condiciones ensayadas con agua como lubricante, y este valor es el responsable de generar la inestabilidad en el modelo.





*Figura 9.2: Resultados del modelo TEHD para la distribución de la presión de contacto.*

En la Figura 9.3 se presenta el gráfico de temperatura resultante del modelo TEHD correspondiente a glicerina disuelta en un 50% con agua como fluido lubricante. Este fluido es el que presentó la mayor temperatura de los tres casos ensayados. Como se ve, aún siendo el mayor, el incremento de temperatura es ínfimo, siendo menor a  $2.5^{\circ}\text{C}$  sobre los  $25^{\circ}\text{C}$  de base para el cálculo. Las termocuplas instaladas en el ensayo experimental no detectaron el incremento calculado a causa del error aparente de las mismas.

El cálculo de la temperatura se realizó en capas separadas de forma equidistante. La “capa 1” corresponde a la superficie de la rueda, y la “capa 3” a la superficie de la probeta. La “capa 2” es la intermedia.

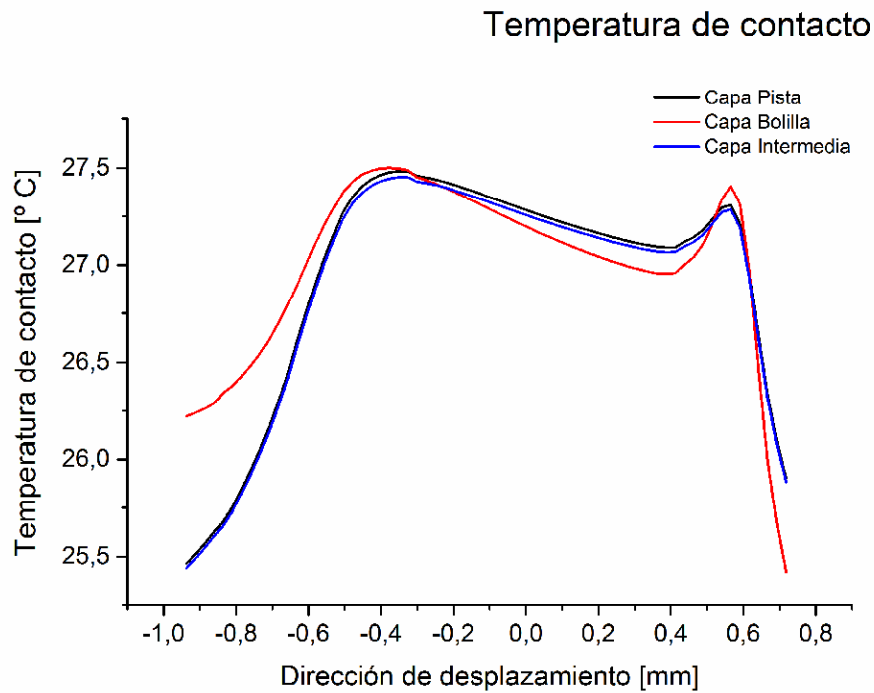


Figura 9.3: Resultados del modelo TEHD para la distribución de la temperatura de contacto. Fluido 50% glicerina/50% agua.

### 9.1.3 Relación de película lubricante

En función de los resultados obtenidos por el modelo, junto con la rugosidad de las superficies en contacto, se calcula el coeficiente  $\lambda$ . En la tabla 9.2 se presenta las rugosidades iniciales promedio de las probetas. El tipo de lubricación es marginal para todos los ensayos (ver tabla 9.3)

Tabla 9.2: Rugosidad de las superficies iniciales.

Parámetro	Rugosidad promedio inicial $\mu\text{m}$	
	Rueda	Probeta
Ra	2.74	0.36
Rz	11.47	3.05
Rp	7.39	2.03
Rq	3.44	0.65

Tabla 9.3: Espesor de película lubricante inicial y parámetro  $\lambda$ .

Ra rueda [ $\mu\text{m}$ ]	Ra Probeta [ $\mu\text{m}$ ]	Ra prom [ $\mu\text{m}$ ]	
2.74	0.36	2.76	
Esesor de película [ $\mu\text{m}$ ]	Glicerina	Glicerina al 75%	Glicerina al 50%
	0.10	0.0052	0.0018
Parámetro $\lambda$ inicial	0.036	0.0019	0.00067

## 9.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTACTO (pistas de acero)

En la tabla 9.4 se resumen los diferentes ensayos realizados para las probetas de acero AISI-SAE 4140 con una carga aplicada de 3000 Kg y una duración de 250 horas, equivalente a 1002000 de ciclos. Se muestran los diferentes lubricantes utilizados y los diferentes tamaños de fisuras.

Tabla 9.4: Ensayos realizados sobre acero AISI-SAE 4140 (Carga aplicada 3000 Kg).

Ensayo	Denominación ensayo	Profundidad de fisura [mm]			Lubricante
		Zona (A)	Zona (B)	Zona (C)	
1	AC-100%GL-3000-N01	0.0	0.25	0.0	100% Glicerina
2	AC-75%GL-3000-N01	1.1	2.2	2.0	75% Glicerina
3	AC-50%GL-3000-N01	2.1	2.3	1.8	50% Glicerina
4	AC-100%AG-3000-N01	2.3	3.0	1.9	100% Agua

## 9.3 SUPERFICIES DE FRACTURA Y RECONOCIMIENTO DEL TRAZADOR

### 9.3.1 Fluido lubricante: Glicerina

#### Ensayo AC-100%GL-3000-N01

Las Figura 9.4 muestra el interior de la fisura del ensayo AC-100%GL-3000-N01. En el mismo fue utilizada como lubricante glicerina. No se observa la penetración de los trazadores en ningún sector de la zona central analizada. En las zonas laterales no se desarrolló un crecimiento de fisura para su análisis. Un espectro EDS de la zona central se puede observar en la Figura 9.5. La morfología muestra marcas de playa típicas de fatiga, y no se detectaron indicios sobre la presencia de restos de lubricante, que hubiesen quedado atrapados en los valles o sobre la superficie.

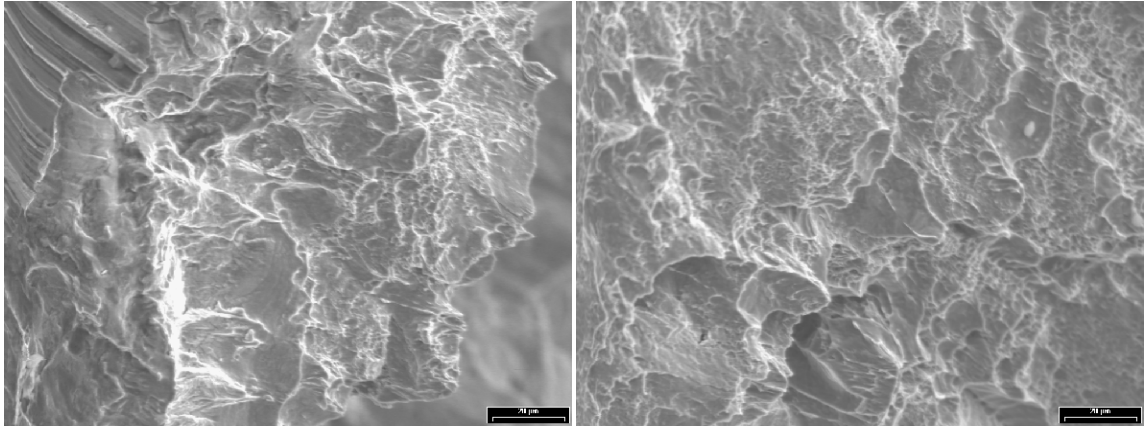


Figura 9.4: Morfología de las superficies de fisura pertenecientes al ensayo AC-100%GL-3000-N01. Fluido lubricante: 100% Glicerina (Mag: 1500x).

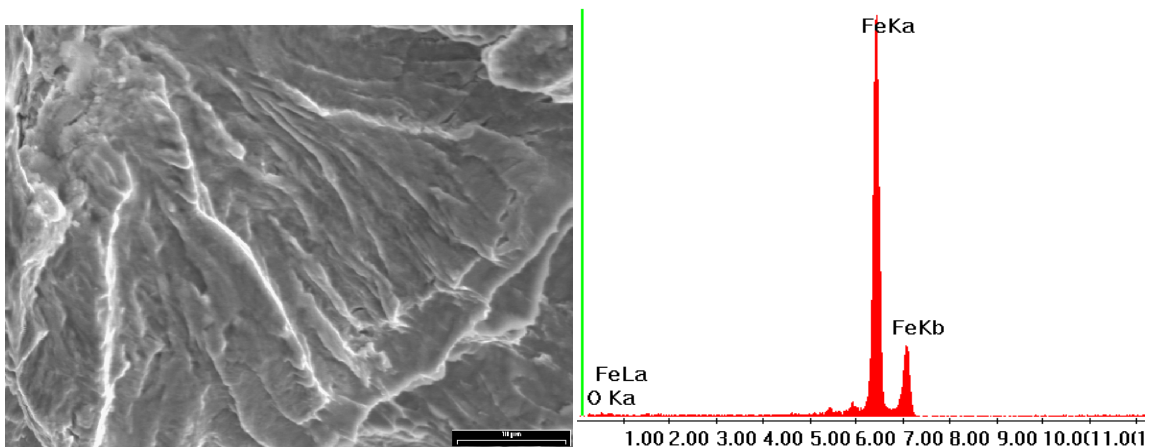


Figura 9.5: Morfología de la superficie de fisura pertenecientes al ensayo AC-100%GL-3000-N01. Fluido lubricante: 100% Glicerina Der.) Espectro EDS donde no se observa presencia de los trazadores(Mag: 3000x).

### 9.3.2 Fluido lubricante: 75% Glicerina / 25% Agua

#### Ensayo AC-75%GL-3000-N01

Las Figuras 9.6y 9.7 muestran el interior de la fisura del ensayo AC-75%GL-3000-N01. En el mismo fue utilizado como lubricante una mezcla de composición 75% glicerina y 25% agua. Un espectro EDS de la zona central se puede observar en la Figura 9.7.No se observa la penetración de los trazadores en ningún sector de lastres zonas analizadas. La morfología muestra una superficie típica de fractura por fatiga, y visualmente no se detectan indicios de presencia de restos de lubricante. Se observan fisuras superficiales (zonas marcadas).

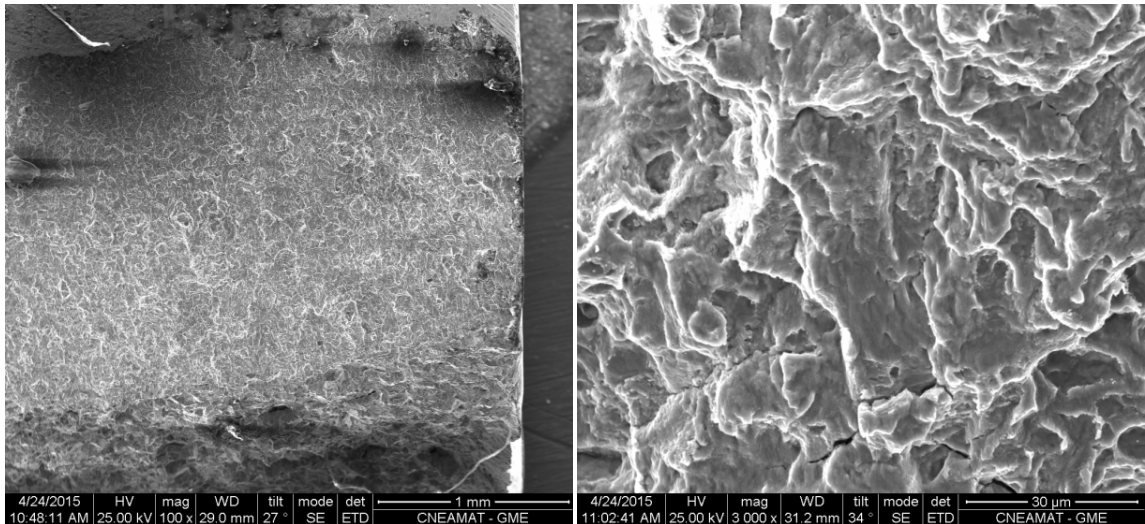


Figura 9.6: Morfología de las superficies de fisura pertenecientes al ensayo AC-75%GL-3000-N01. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag: 100x ; 3000x).

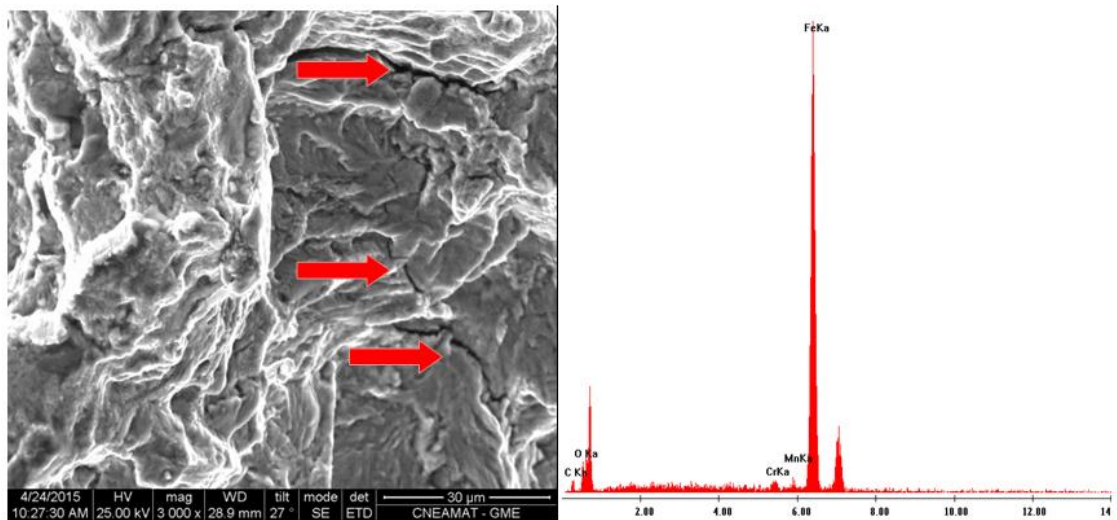


Figura 9.7: Morfología de la superficie de fisura pertenecientes al ensayo AC-100%GL-3000-N01. Fluido lubricante: 100% Glicerina (Mag: 3000x) Der.) Espectro donde no se observa presencia de los trazadores.

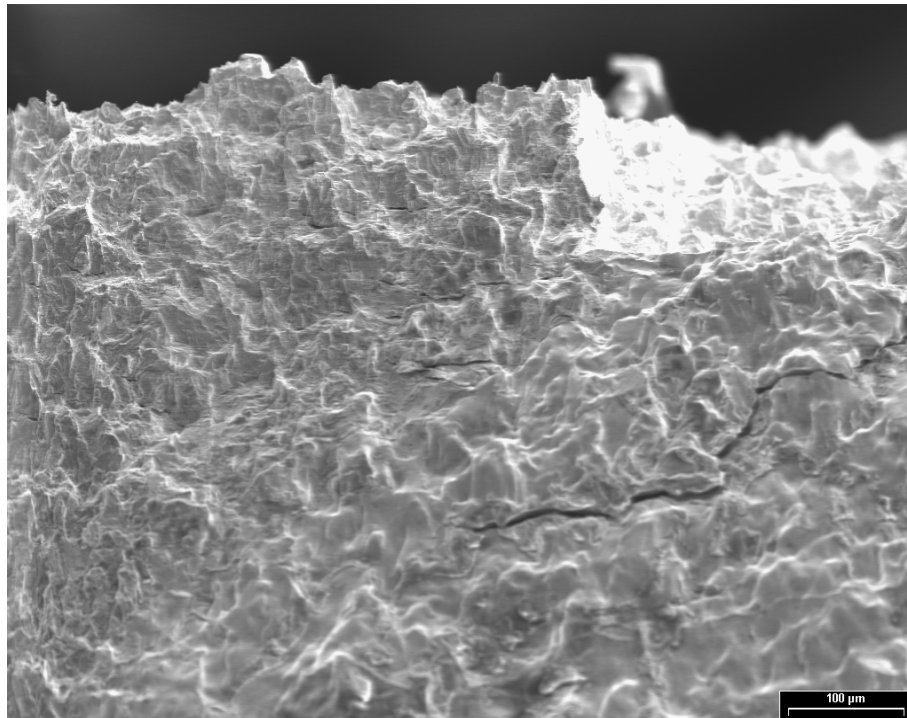
### 9.3.3 Fluido lubricante: 50% Glicerina / 50% Agua

#### Ensayo AC-50%GL-3000-N01

Las Figura 9.8 muestra el interior de la fisura del ensayo AC-50%GL-3000-N01. En el mismo fue utilizada una mezcla como lubricante de composición 50% glicerina y 50% agua. Se observa la penetración de los trazadores en una zona lateral (A) y central (B). No se observó penetración de líquido en la zona lateral (C). La Figura presenta la interfaz de

penetración del fluido. La superficie cubierta por restos de fluido lubricante se ve con ángulos más suaves en comparación con las zonas de fractura características del acero AISI-SAE 4140 [3].

Un espectro EDS de la zona central se puede observar en la Figura 9.9 donde se presenta el límite de penetración del fluido. En la misma se identifican dos zonas. La zona 1 no presenta la aparición de trazadores, en cambio, en la zona 2 cubierta por lubricante, es detectada rápidamente la presencia de los trazadores cloro y titanio. La Figura 9.10 muestra un espectro EDS lineal realizado sobre el límite, donde se observa una clara diferenciación de la composición superficial. Se eligieron los elementos Fe y C para el análisis. La disminución de Fe y el aumento de C (compuesto mayoritario del lubricante) muestra la zona cubierta por restos de lubricante.



*Figura 9.8: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AC-50%GL-3000-N01. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag: 600x).*



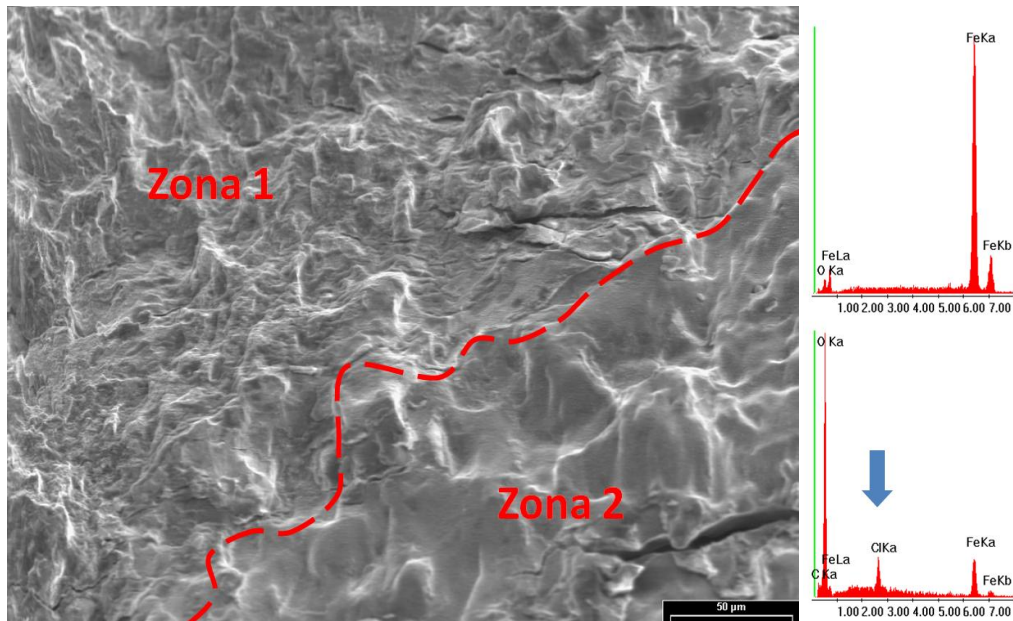


Figura 9.9: Morfología de la superficies donde se observa el límite de penetración del lubricante. Se observa los EDS de la zona 1 (Sup.) y la zona 2 (Inf.) con el pico sobre el trazador de cloro (Mag.: 1500x).

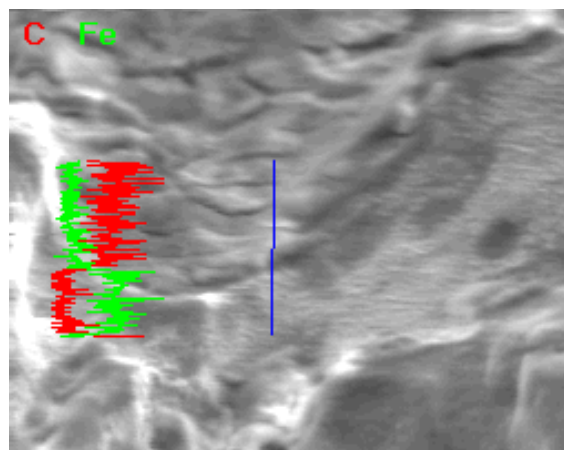


Figura 9.10: Morfología de la superficie donde se realizó un análisis EDS lineal. Se observa un claro incremento del carbono donde ha ingresado lubricante.

La Figura 9.11 muestra la morfología superficial de las superficies de fisura cubiertas por una capa de restos del lubricante utilizado junto a su respectivo espectro EDS donde se reconocen los trazadores aluminio, titanio y cloro.

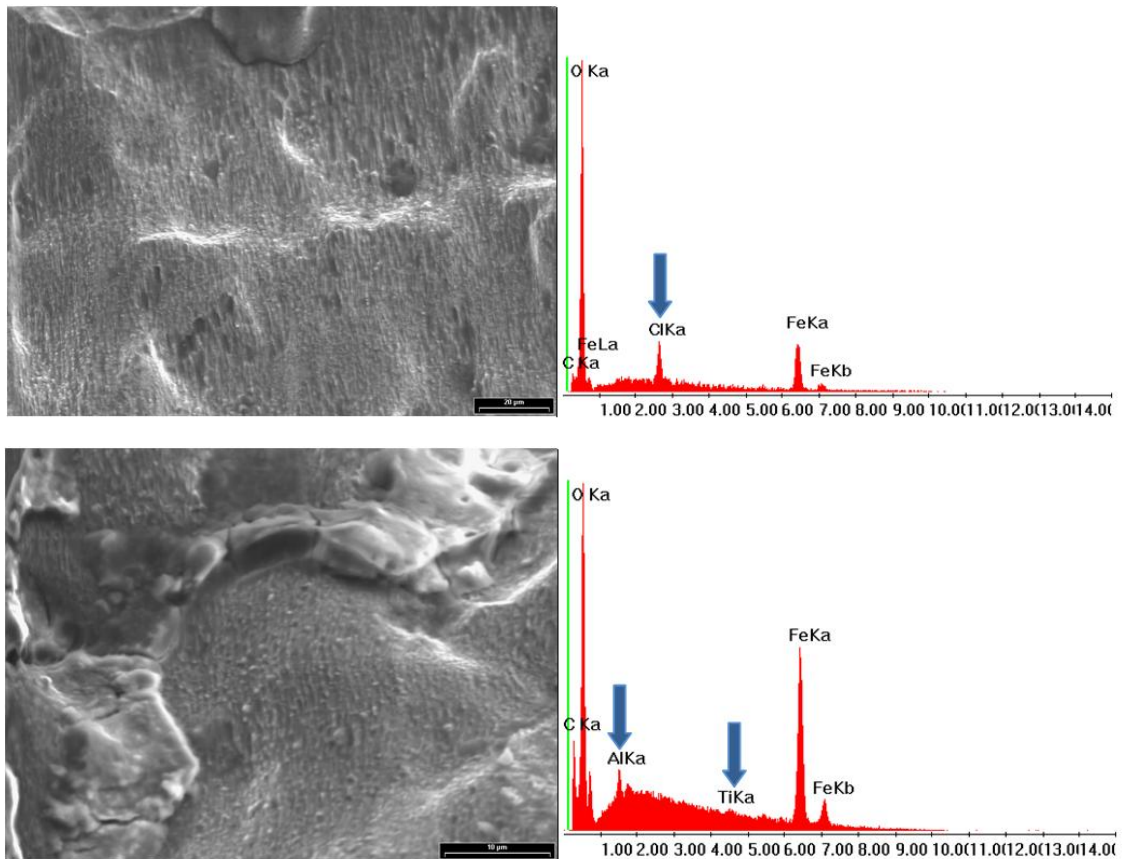


Figura 9.11: Morfología de las superficies recubiertas por el fluido lubricante. Los análisis EDS muestran los trazadores Cl, Ti y Al (Mag.: 1500x; 3000x).

Cabe destacar que los ensayos AC-50%GL-3000-N01 y AC-75%GL-3000-N01 no fueron realizados con sellado lateral, con lo cual, es posible que la penetración del fluido no haya sido por la cara superior, si no, por un lateral abierto. A partir de estos resultados, se decidió sellar la totalidad de los laterales con material epoxi, para garantizar la posible penetración sólo sobre la cara superior.

### 9.3.4 Fluido lubricante: 100% Agua

#### Ensayo AC-100%AG-3000-N01

Las Figura 9.12 muestra el interior de la fisura del ensayo AC-100%AG-3000-N01. En el mismo fue utilizada agua como lubricante.

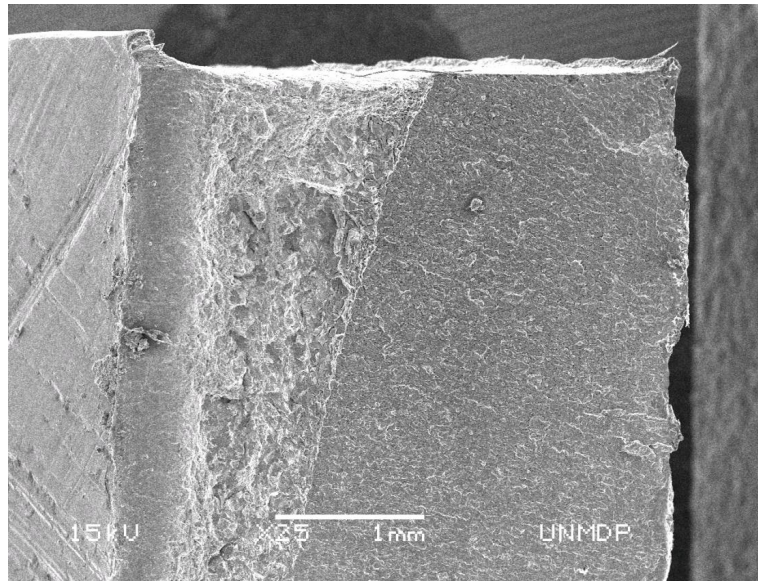


Figura 9.12: Morfología de las superficies (Mag.: 25x).

Se detectó en este ensayo la penetración del lubricante debida a la aparición de los trazadores en una zona lateral (A) y central (B). No se observó penetración de líquido en la zona lateral (C). La superficie cubierta por restos de fluido lubricante se puede observar en las Figuras 9.13 y 9.14 correspondiente a la zona lateral y central respectivamente. Se observa la retención del lubricante en los valles de la zona topográfica lateral (valles con poca definición y de color oscuro marcados sobre la imagen). Además, se puede apreciar en la Figura 9.14, una zona claramente reconocida sin la presencia de restos de lubricantes. La zona lateral (C) muestra la fractura característica de cuasi-clivaje con zonas facetadas de acero AISI-SAE 4140 [3]. Algunos espectros EDS de la zona central se puede observar en la Figura 9.15, donde revelan la presencia de trazadores titanio y aluminio en las zonas (A) y (B).

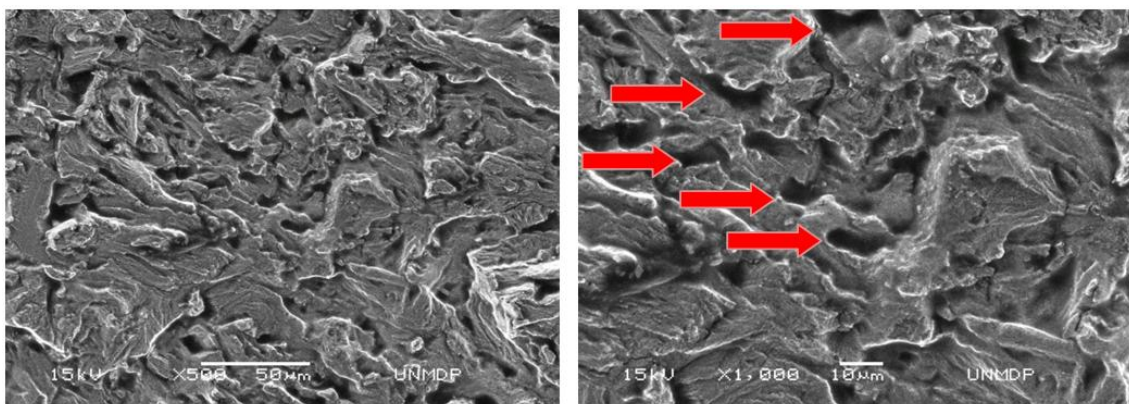


Figura 9.13 Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AC-100%AG-3000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x).



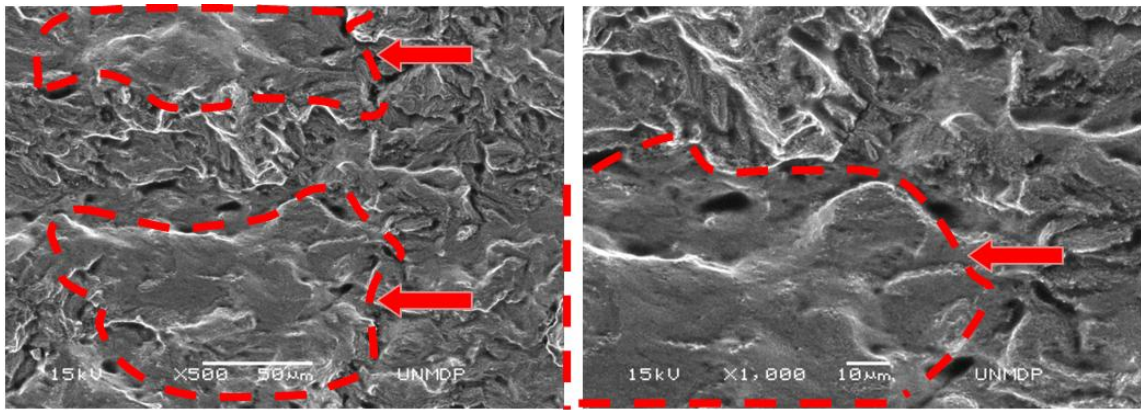


Figura 9.14: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AC-100%AG-3000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x).

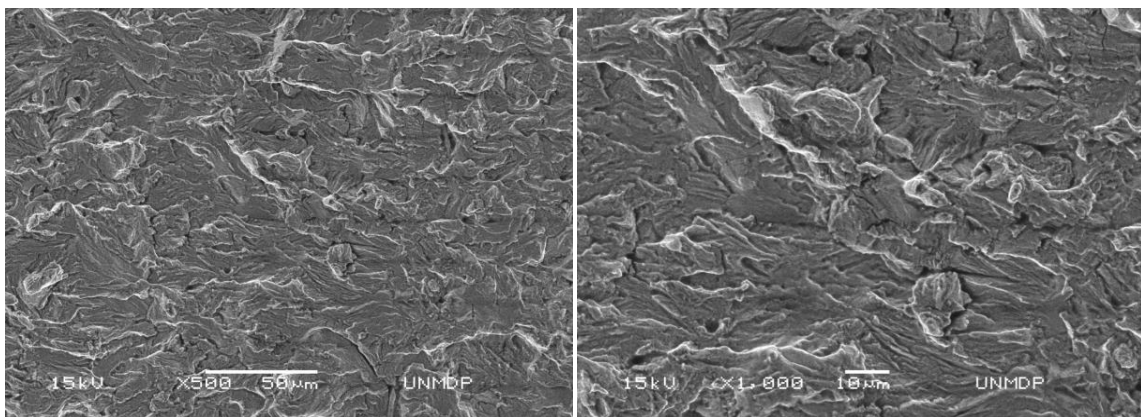


Figura 9.15: Morfología de la superficies de fisura sin restos de lubricante pertenecientes al ensayo AC-100%AG-3000-N01 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x).

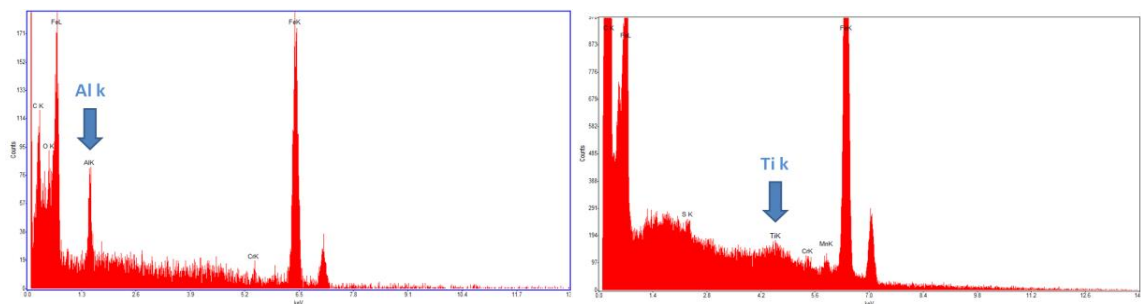
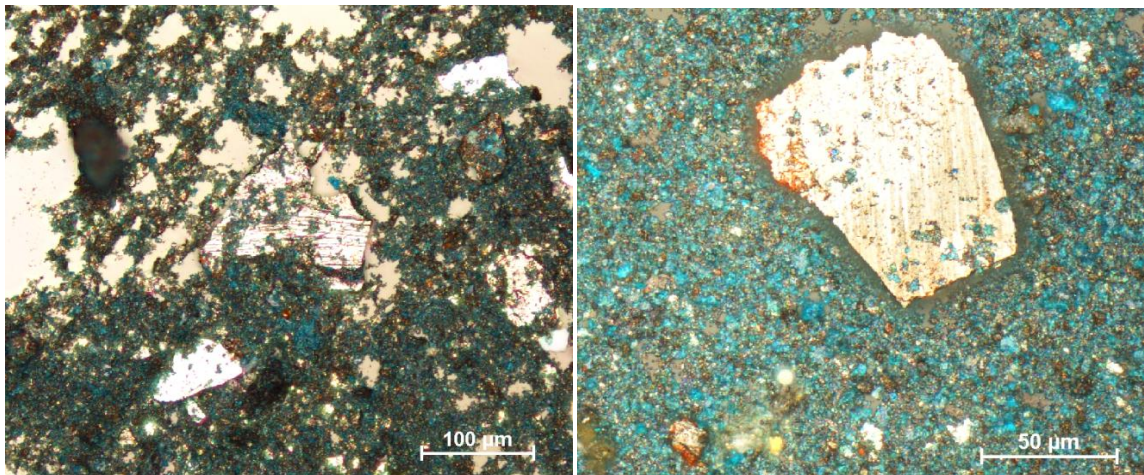


Figura 9.16: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AC-100%AG-3000-N01 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Al.

## 9.4 PARTÍCULAS DE DESGASTE ESFÉRICAS

Muestras de lubricante fueron obtenidas en diferentes intervalos de tiempo para el análisis de las partículas de desgaste. No se observaron partículas esféricas en los ferrogramas realizados en el transcurso de los ensayos para ninguno de los cuatro lubricantes utilizados. Se visualizaron partículas de descascarillado o llamadas “spalls” típicas de degradación de superficie por rodadura (ver Figura 9.17).



*Figura 9.17: Imágenes de ferrogramas tomados a los  $1 \times 10^6$  ciclos para Der.) Glicerina pura y Izq.) mezcla de glicerina y agua (50% en peso) como lubricante.*

Una observación muy importante es que aún cuando no se encontraron partículas esféricas en los ferrogramas, se visualiza en el interior de las fisuras, algunas en posible formación. La imagen 9.18 muestra una partícula semi-esférica quizás en proceso de formación perteneciente a el ensayo AC-75%GL-3000-N01.

Otras partículas con forma esférica fueron vistas en el ensayo AC-50%GL-3000-N01. Las mismas pueden observarse en la Figura 9.19 donde además se presenta un análisis EDS realizado sobre la partícula número 3. La misma presenta una composición con elementos Fe y O típica de partículas generadas por aglomerado de óxidos.

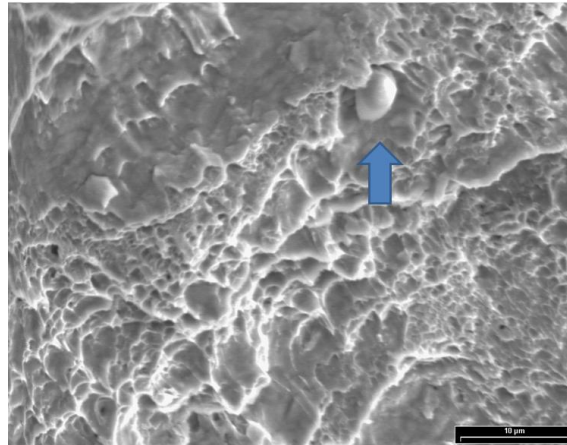


Figura 9.18: Morfología de la fisura correspondiente al ensayo AC-75%GL-3000-N01 donde se observa una posible formación de partícula esférica (3000x).

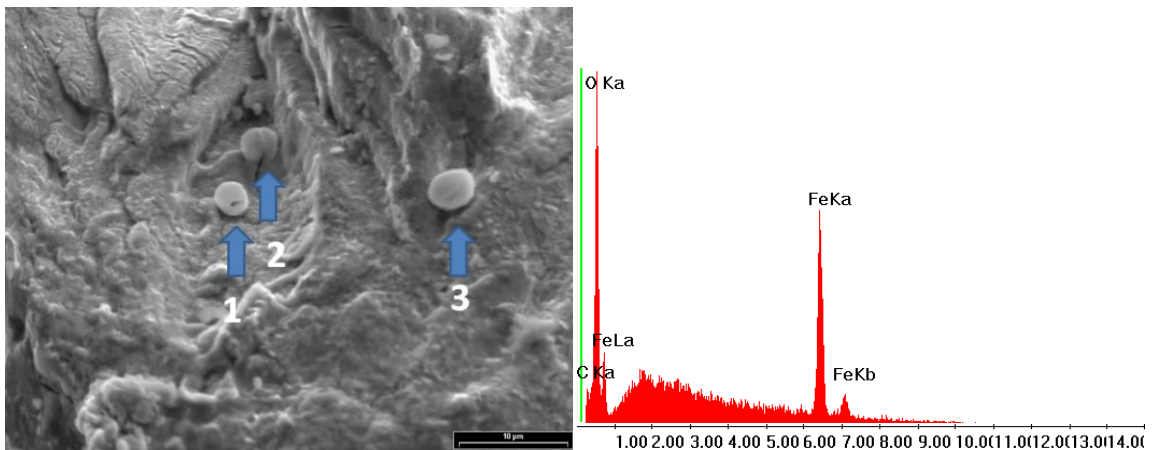


Figura 9.19: Morfología de la fisura correspondiente al ensayo AC-50%GL-3000-N01 donde se observan algunas partículas con forma aparentemente esférica (3000x Der.) Espectro EDS sobre la partícula n°3 con elementos Fe-O.

## 9.5 CALCULOS TEHD DE CONTACTO LINEAL (PISTA CAMPLO 2005 T3/RUEDA AISI 4140)

Materiales en contacto para esta sección:

- Pista: CAMPLO 2005 T3
- Elemento rodante: AISI-SAE 4140.



### 9.5.1 Contacto sin lubricación: Teoría de hertz

Las presiones de contacto fueron calculadas de acuerdo a la teoría de Hertz [1-2] para una carga aplicada de 1000 Kg en los ensayos realizados con las probetas de CAMPLO 2005 T3.

Los parámetros más relevantes del contacto, se presentan en la tabla 9.5.

*Tabla 9.5: Resultados de los parámetros del contacto según la teoría de Hertz.*

a	Semi-amplitud de contacto	0.476 mm
L	Longitud de contacto	25 mm
A	Área de contacto	23.8 mm <sup>2</sup>
P <sub>max</sub>	Presión máxima	370.29 MPa
P <sub>prom</sub>	Presión promedio	246.88 MPa

### 9.5.2 Resultados del modelo TEHD de contacto lineal

Los resultados obtenidos de la presión de Hertz se utilizaron como base para los cálculos TEHD. Se emplearon los mismos lubricantes ya descritos en las probetas de acero AISI-SAE 4140.

Las Figuras 9.20 y 9.21 presentan el espesor de película lubricante resultante y la presión generada por el contacto. No se presentan los resultados de contacto obtenidos para el agua como fluido lubricante a causa de problemas de inestabilidad en la convergencia. Prácticamente no se observan diferencias entre las presiones de contacto generadas y la presión de Hertz para las condiciones ensayadas. Si se analiza la Figura 9.20, el pico de presión generado por la rodadura con lubricación es prácticamente despreciable para las condiciones del ensayo de contacto puntual.

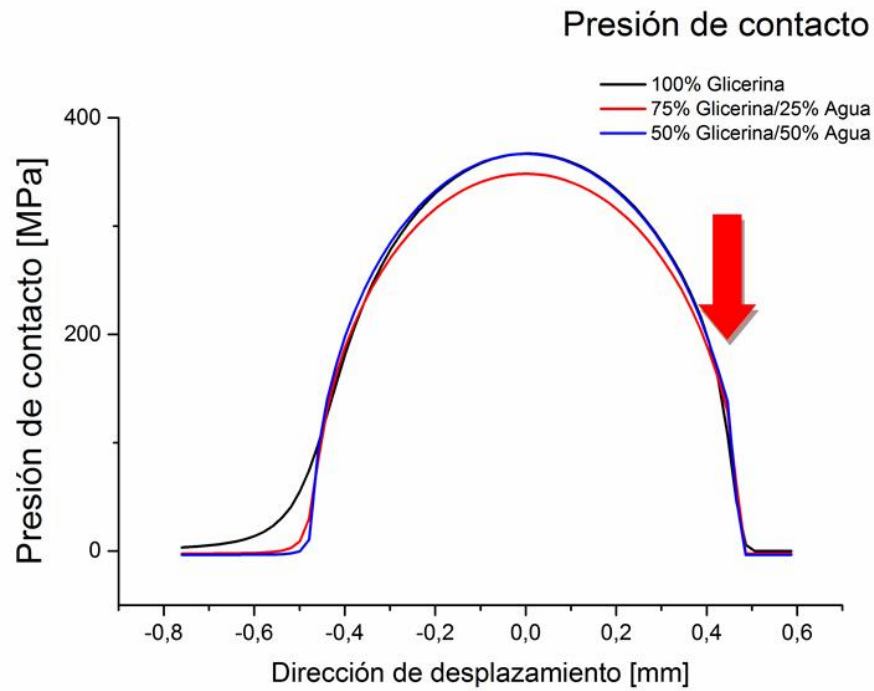


Figura 9.20: Resultados del modelo TEHD para la distribución de la presión de contacto.

Se observa en la Figura 9.21 que el espesor de película lubricante se ve abruptamente disminuido con una disolución del 25% con agua. Pasando de un espesor mínimo de  $0.110 \mu\text{m}$  con glicerina a  $0.014 \mu\text{m}$  con una disolución del 75% con agua. La disolución del 50 % con agua tiene un espesor de  $0.003 \mu\text{m}$ .

El espesor de película lubricante es prácticamente igual a  $0 \mu\text{m}$  para las condiciones ensayadas con agua como lubricante, y este valor es el responsable de generar la inestabilidad en el modelo.

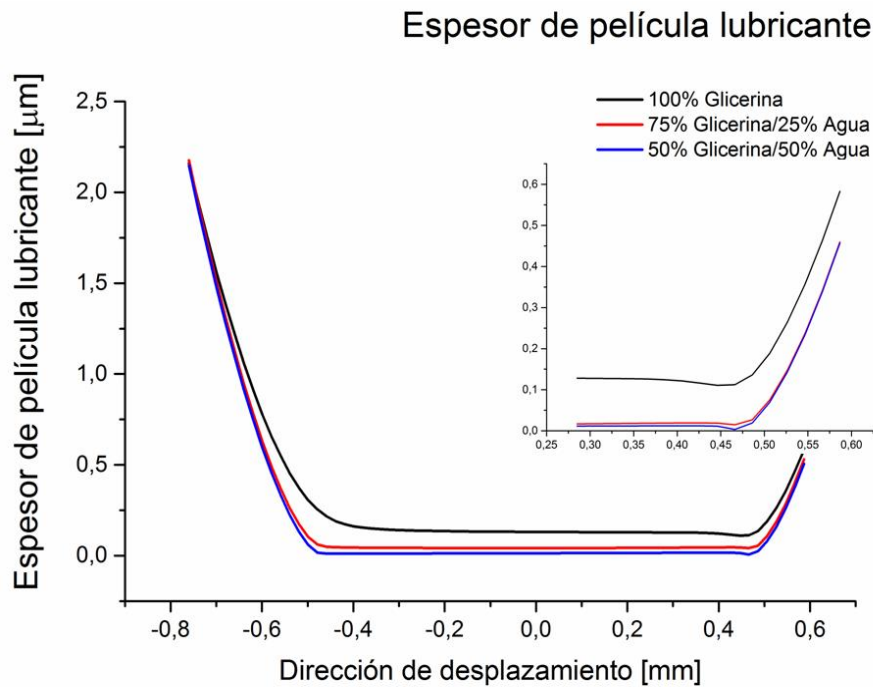


Figura 9.21: Resultados del modelo TEHD para el espesor de película lubricante.

En la Figura 9.22 se observa el gráfico de la temperatura para la glicerina disuelta en un 50% con agua como fluido lubricante. Este fluido es el que presentó la mayor temperatura de los tres casos ensayados. Como vemos, aún siendo el de mayor temperatura, presenta un incremento de temperatura ínfimo, siendo menor a 1.2 °C sobre los 25 °C de base para el cálculo. Las termocuplas instaladas en el ensayo experimental no detectaron el incremento calculado.

El cálculo de la temperatura se realizó en capas separadas de forma equidistante. La “Capa Bolilla” pertenece a la superficie de la rueda, y la “Capa Pista” pertenece a la superficie de la probeta. La “Capa Intermedia” es la intermedia.

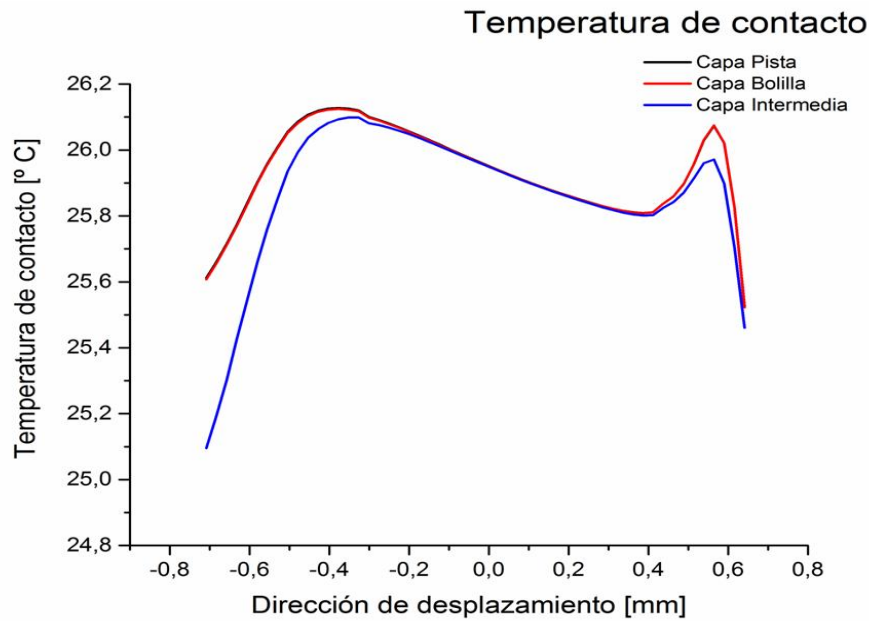


Figura 9.22: Resultados del modelo TEHD para la distribución de la temperatura de contacto. Fluido 50% glicerina/50%agua.

### 9.5.3 Relación de película lubricante

En función de los resultados obtenidos por el modelo, junto a la rugosidad de las superficies en contacto, se calcula el coeficiente  $\lambda$ . En la tabla 9.6 se presentan las rugosidades iniciales promedio de las probetas determinadas mediante el rugosímetro. El tipo de lubricación es marginal para todos los ensayos (ver tabla 9.3)

Tabla 9.6: Rugosidad de las superficies iniciales.

Parámetro	Rugosidad promedio inicial [ $\mu\text{m}$ ]	
	Rueda	Probeta
Ra	2.74	0.18
Rz	11.47	1.47
Rp	7.39	0.92
Rq	3.44	0.23

Tabla 9.7: Espesor de película lubricante inicial y parámetro  $\lambda$ .

Ra rueda [ $\mu\text{m}$ ]	Ra Probeta [ $\mu\text{m}$ ]	Ra prom [ $\mu\text{m}$ ]	
2.74	0.18	2.74	
	Glicerina	Glicerina al 75%	Glicerina al 50%
Espesor de película [ $\mu\text{m}$ ]	0.11	0.014	0.0032
Parámetro $\lambda$ inicial	0.040	0.0053	0.0011

## 9.6 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTACTO (Pistas base aluminio)

En la tabla 9.8 se resumen los diferentes ensayos realizados para las probetas de CAMPLO 2005 T3 con una carga aplicada de 1000 Kg. Se muestran los diferentes lubricantes utilizados para los diferentes tamaños de fisuras. La generación de fisuras para el estudio sobre las probetas de CAMPLO no presentó un crecimiento parejo, con lo cual es necesario un gran número de ensayos para realizar un análisis exhaustivo sobre la penetración del lubricante en rodadura.

Tabla 9.8: Ensayos realizados sobre CAMPLO 2005 T3 (Carga aplicada 1000 Kg)

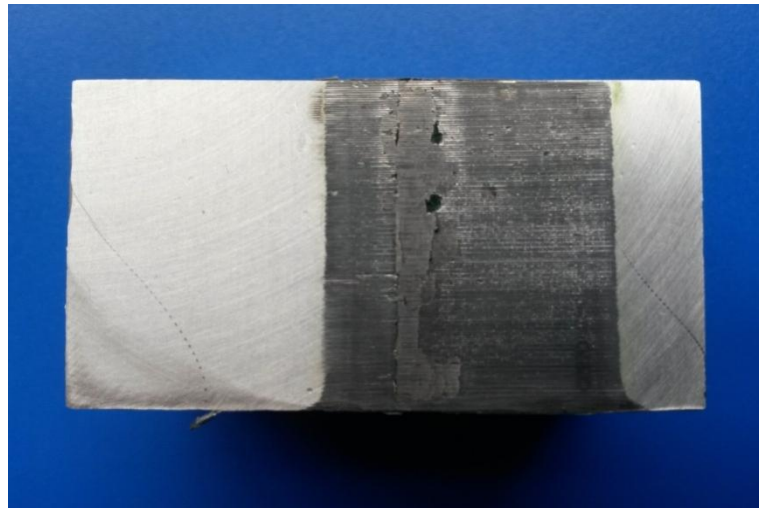
Ensayo	Denominación ensayo	Profundidad de fisura [mm]			Lubricante
		Zona (A)	Zona (B)	Zona (C)	
<b>A</b>	<b>AL-100%GL-1000-N0A</b>	-	-	-	100% Glicerina
<b>B</b>	<b>AL-50%GL-1000-N0B</b>	-	-	-	50% Glicerina
1	AL-100%GL-1000-N01	4.3	2.4	0	100% Glicerina
2	AL-100%GL-1000-N02	2.5	3.2	1.5	100% Glicerina
3	AL-100%GL-1000-N03	0	2.4	3.8	100% Glicerina
4	AL-75%GL-1000-N01	1.1	2.1	2.5	75% Glicerina
5	AL-75%GL-1000-N02	2.1	1.9	2.3	75% Glicerina
6	AL-75%GL-1000-N03	2.9	2.1	1.1	75% Glicerina
7	AL-50%GL-1000-N01	5	3.5	1.9	50% Glicerina
8	AL-50%GL-1000-N02	0	2	2.5	50% Glicerina
9	AL-50%GL-1000-N03	6.2	5	1	50% Glicerina
10	AL-100%AG-1000-N01	3.1	2	0.5	100% Agua
11	AL-100%AG-1000-N02	1.5	1.1	2	100% Agua

Los primeros ensayos A y B denominados AL-100%GL-1000-N0A y AL-50%GL-1000-N0B se realizaron con una carga de 1000kg y una duración de 125 horas (501000 ciclos). Mitad del tiempo adoptado para el acero, ya que el crecimiento de la fisura en CAMPLO es más rápida que en el acero.

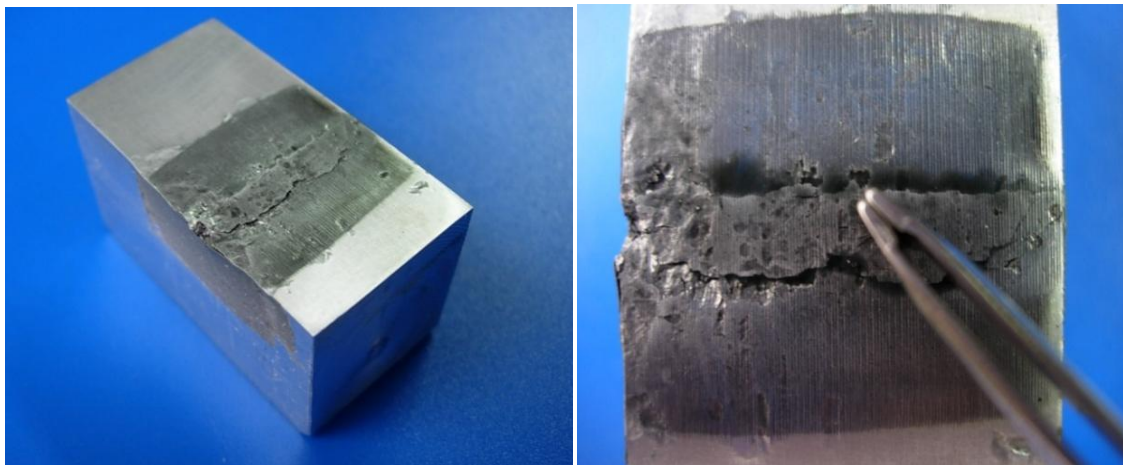
Los ensayos debieron ser abortados y descartados del análisis ya que el crecimiento del frente de fisura fue descontrolado llegando al descascarillado de la superficie. La Figura 9.23 muestra la probeta perteneciente al ensayo AL-100%GL-1000-N0A, abortada a las 38 horas de ensayo (152304 ciclos). En la misma se observa cómo la fisura llega a incidir hasta la superficie, produciendo el desprendimiento de material. La Figura 9.24 muestra una imagen aún más clara donde el material desprendido prácticamente está flotando en el fluido

lubricante. La misma corresponde al ensayo AL-50%GL-1000-N0B el cual debió ser abortado a las 28 horas (112224 ciclos).

A partir de estos resultados se determinó un nuevo límite de tiempo para los ensayos, estableciéndose un tiempo máximo de 12 horas para los ensayos de penetración equivalente a los 48096 ciclos.



*Figura 9.23: Probeta correspondiente al ensayo AL-100%GL-1000-N0A abortado a las 38 h. donde se observa el descascarillado superficial producto de FCR.*



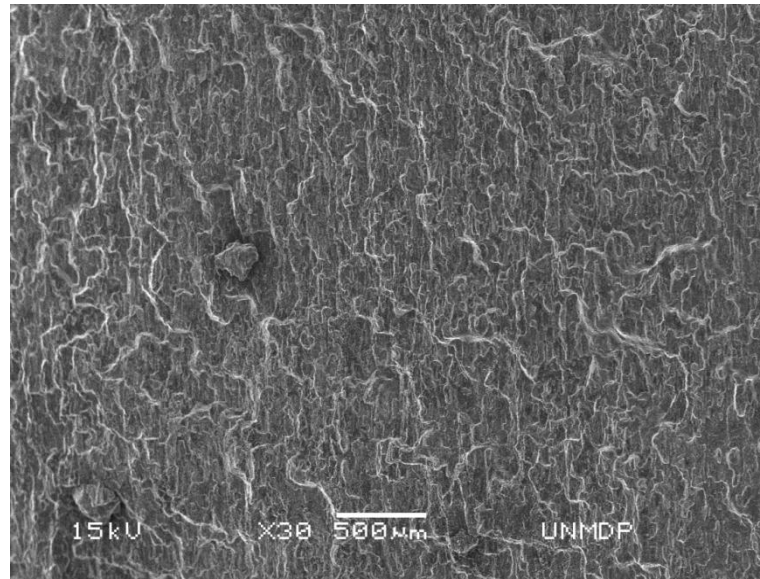
*Figura 9.24: Probeta correspondiente al ensayo AL-50%GL-1000-N0B abortado a las 28 h. donde se observa el descascarillado superficial producto de FCR.*

### **9.6.1 Fluido lubricante: Glicerina**

#### **Ensayo AL-100%GL-1000-N01**

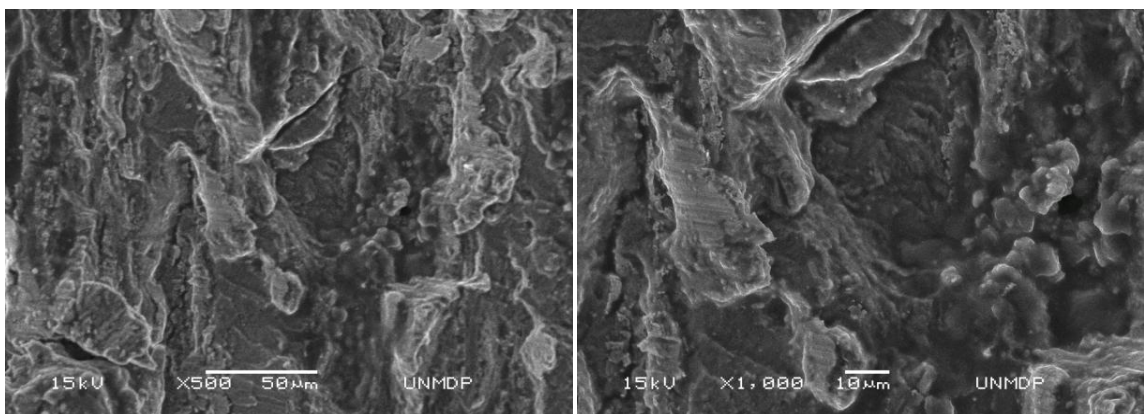
Las Figura 9.25 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-100%GL-1000-N01. En el mismo fue utilizada glicerina como lubricante.





*Figura 9.25: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N01. Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 30x).*

Se observa la penetración de los trazadores en una zona lateral (A) y central (B). En la zona lateral (C) no se desarrolló un crecimiento de fisura para su análisis. La superficie cubierta por restos de fluido lubricante se puede observar en las Figuras 9.26 y 9.27 correspondiente a la zona lateral y central respectivamente. Se observa la clara retención del lubricante en los valles de la zona topográfica lateral (valles con poca definición, de color oscuro). Un espectro EDS de la zona central se puede observar en la Figura 9.15. Se detectan los trazadores titanio y cloro en las zonas (A) y (B).



*Figura 9.26: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x).*

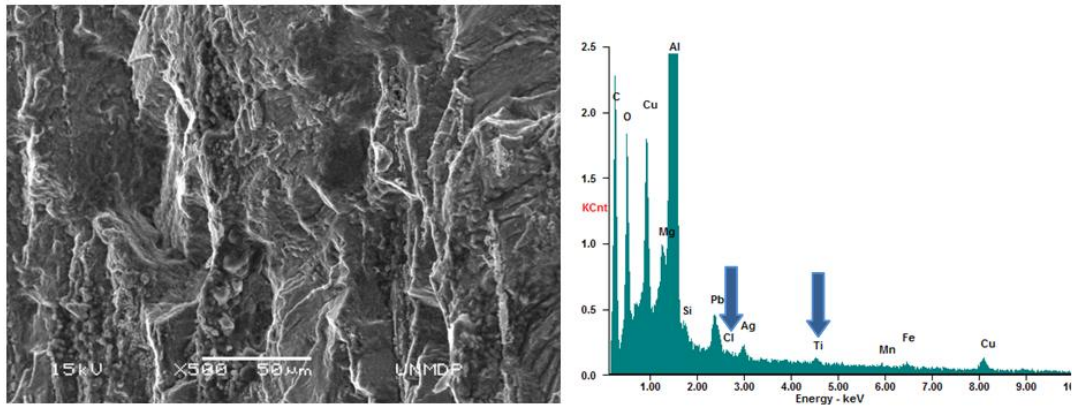


Figura 9.27: Morfología de la superficie de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x).

### Ensayo AL-100%GL-1000-N02:

La Figura 9.28 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-100%GL-1000-N02. En el mismo fue utilizada como lubricante glicerina.

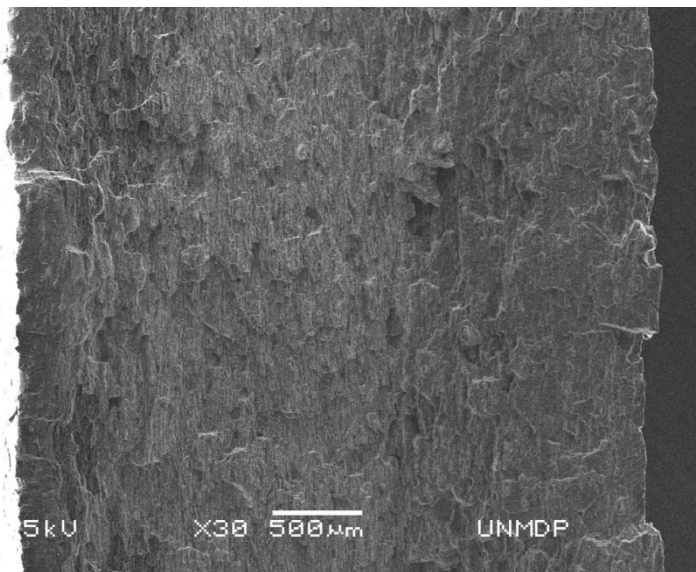


Figura 9.28: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02. Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 30x).

La superficie cubierta por restos de fluido lubricante se puede observar en las Figuras 9.29; 9.30 y 9.31 correspondiente a la zona lateral A, central B, y lateral C respectivamente. Si bien no se observa una clara retención del lubricante sobre las superficies de la fisura, los trazadores fueron detectados en las tres zonas de análisis. Un espectro EDS de la zona central



se puede observar en la Figura 9.15. Se detectan picos pertenecientes a los trazadores titanio y cloro.

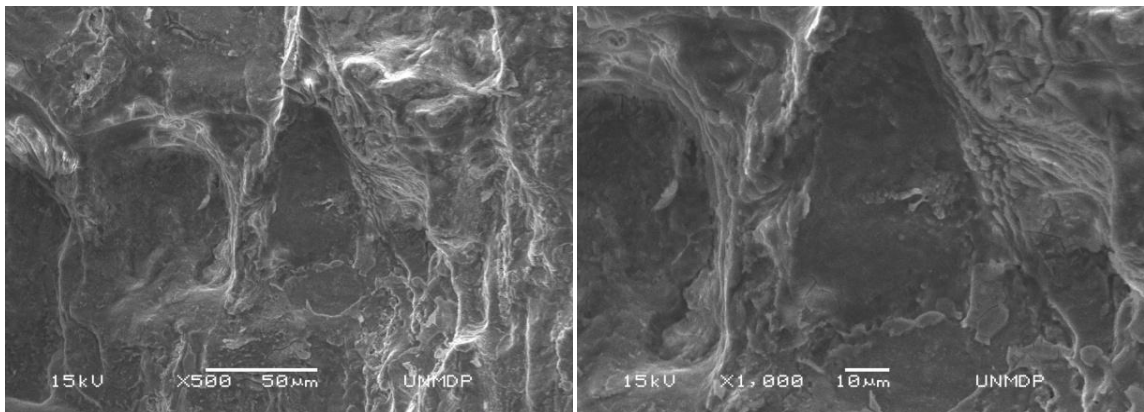


Figura 9.29: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x).

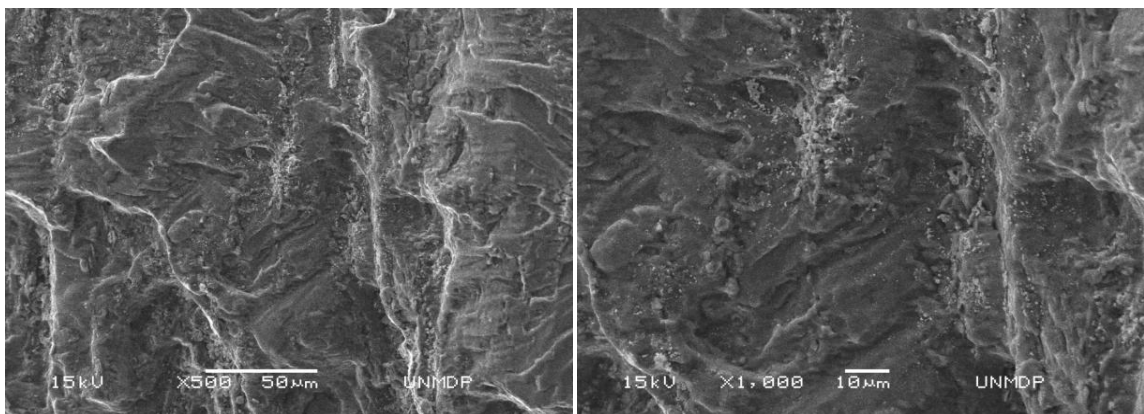


Figura 9.30: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x).

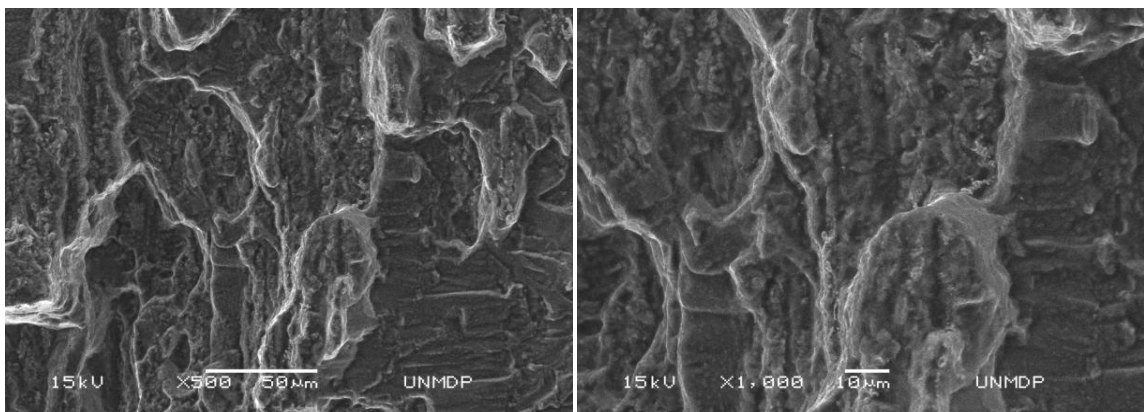


Figura 9.31: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x)

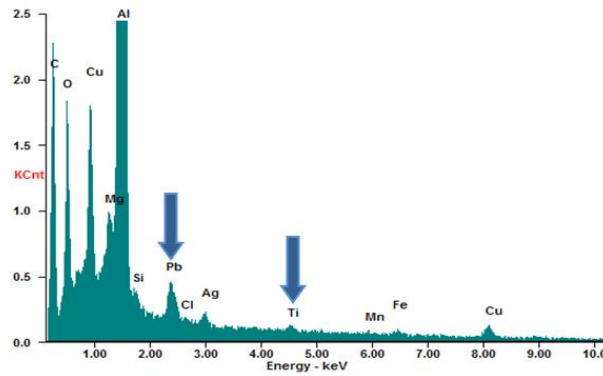


Figura 9.32: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl.

### Ensayo AL-100%GL-1000-N03

La Figura 9.33 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-100%GL-1000-N03. En el mismo fue utilizada glicerina como lubricante.

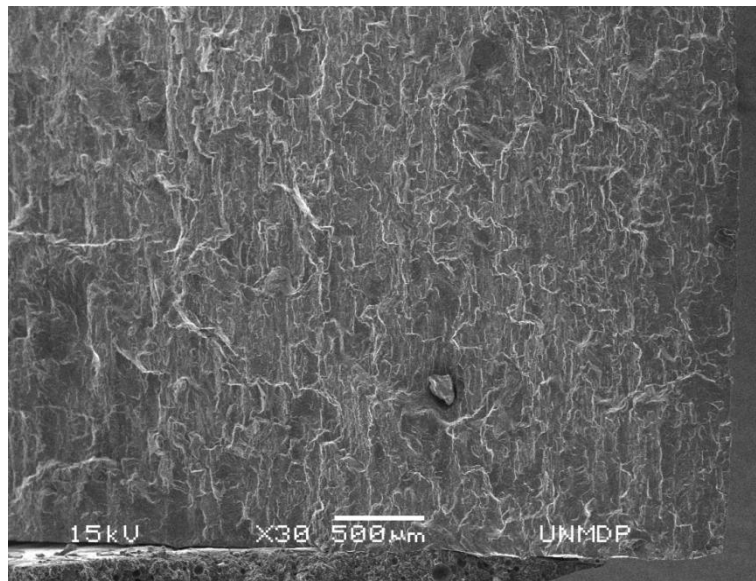


Figura 9.33: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N03. Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 30x).

En la zona lateral (A) no se desarrolló un crecimiento de fisura para su análisis. La superficie cubierta por restos de fluido lubricante se puede observar en las Figuras 9.34 y 9.35 correspondiente a la zona central B y lateral C, respectivamente. Se observa la clara retención del lubricante sobre las superficies de fisura lo cual es demostrado por la presencia de los trazadores en el espectro EDS.

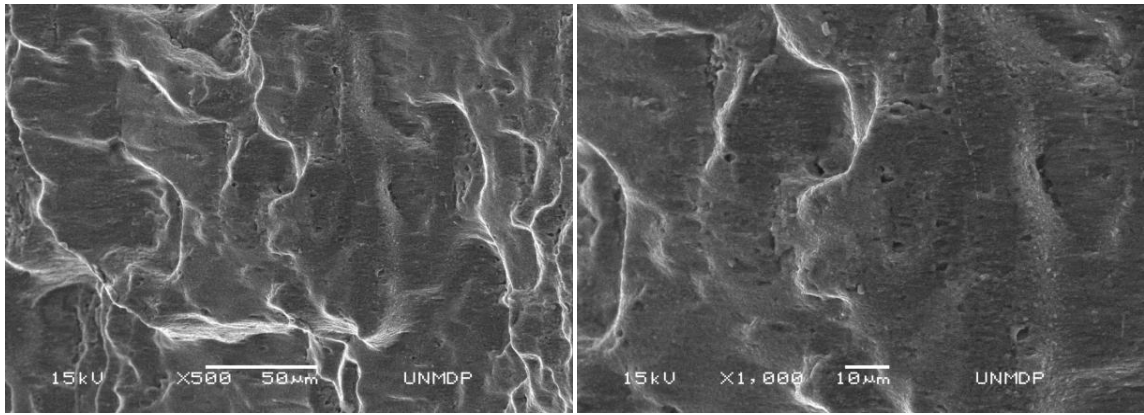


Figura 9.34: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N03 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x).

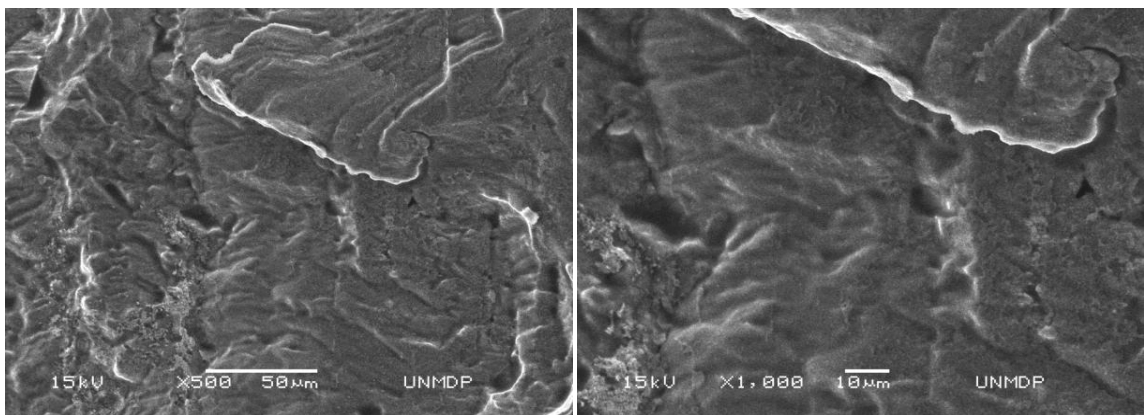


Figura 9.35: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: glicerina (Mag.: 500x; 1000x).

Un espectro EDS realizado en la zona central se puede observar en la Figura 9.36. Se detectan los trazadores titanio y cloro en las zonas (B) y (C).

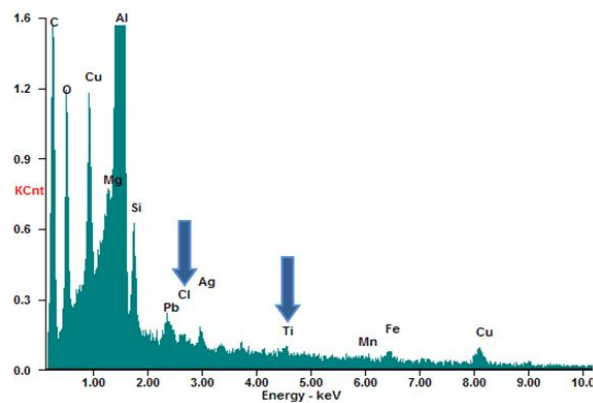


Figura 9.36: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-100%GL-1000-N02 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl.



### 9.6.2 Fluido lubricante: 75% Glicerina / 25% Agua

#### Ensayo AL-75%GL-1000-N01

Las Figura 9.37 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-75%GL-1000-N01. En el mismo fue utilizada como lubricante una mezcla de 75% glicerina y 25% agua.



Figura 9.37: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 50x).

Las tres zonas analizadas presentan una morfología superficial en la cual se aprecia una clara presencia de restos de fluido lubricante. Las Figuras 9.38, 9.39 y 9.40 corresponden a la zona lateral A, central B y lateral C, respectivamente. El espectro EDS demuestra la presencia de los trazadores cloro y titanio (ver Figura 9.41).

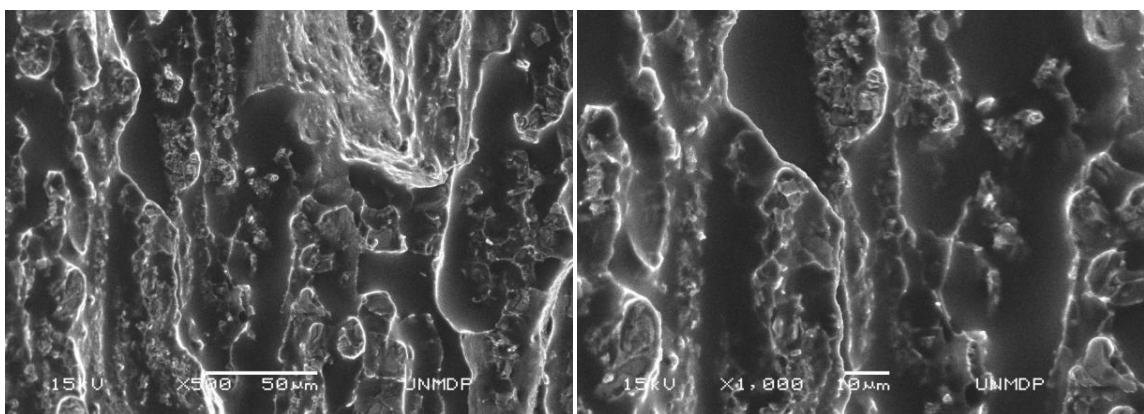


Figura 9.38: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x).



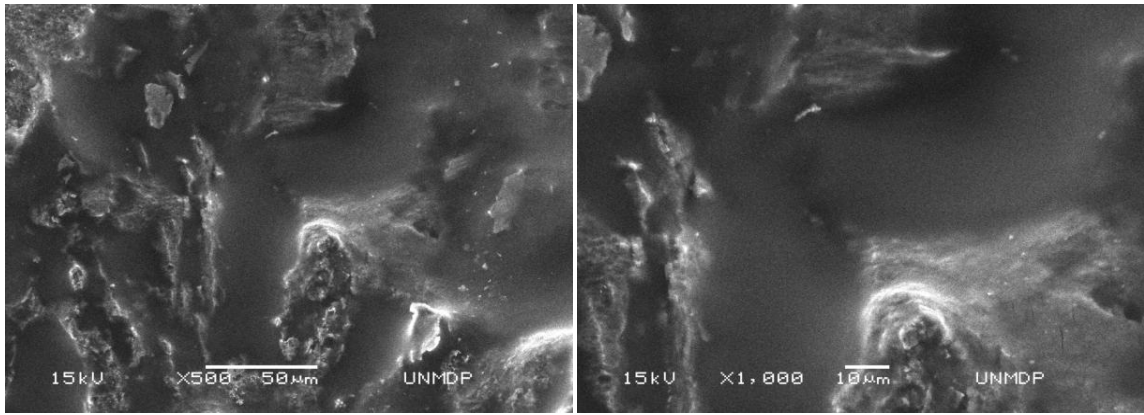


Figura 9.39: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x).

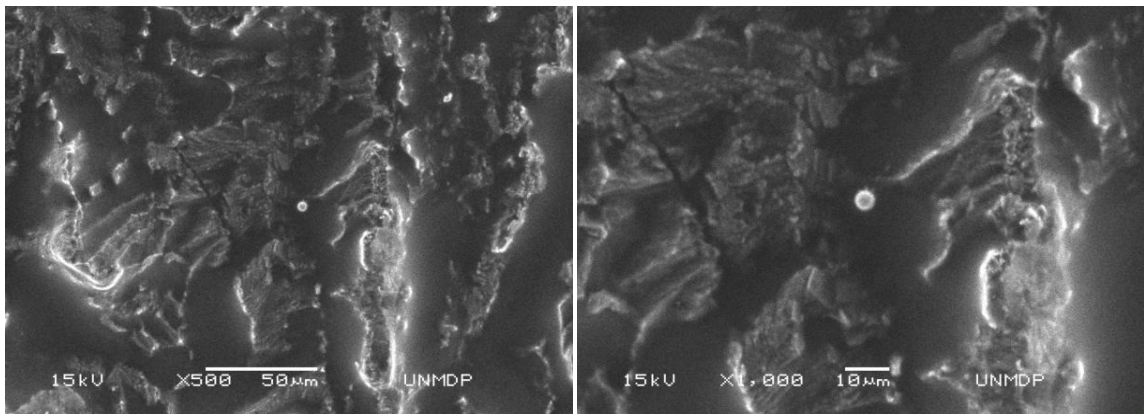


Figura 9.40: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x).

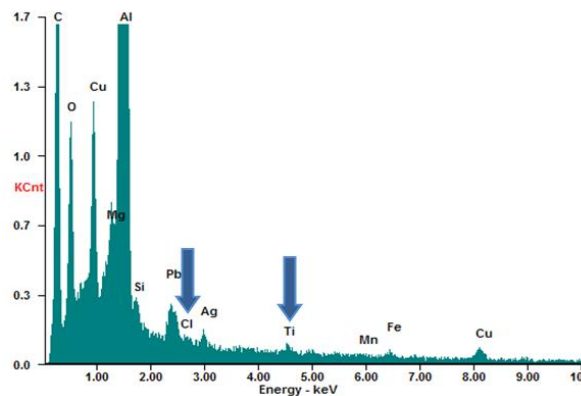
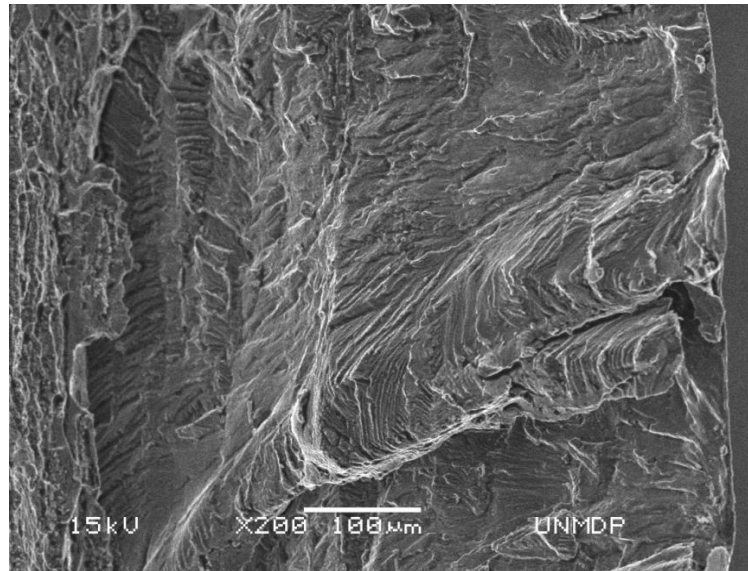


Figura 9.41: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl.

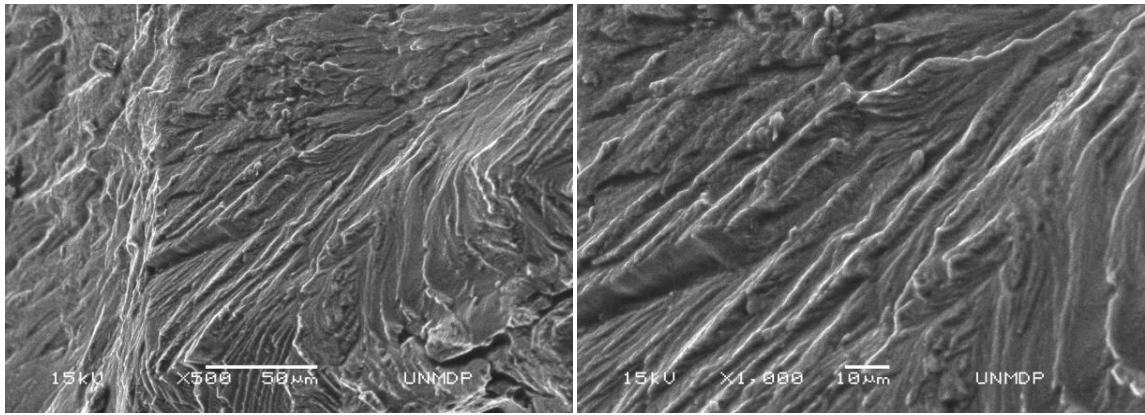
### **Ensayo AL-75%GL-1000-N02**

Las Figura 9.42 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-75%GL-1000-N02. En el mismo fue utilizada como lubricante una mezcla de 75% glicerina y 25% agua.

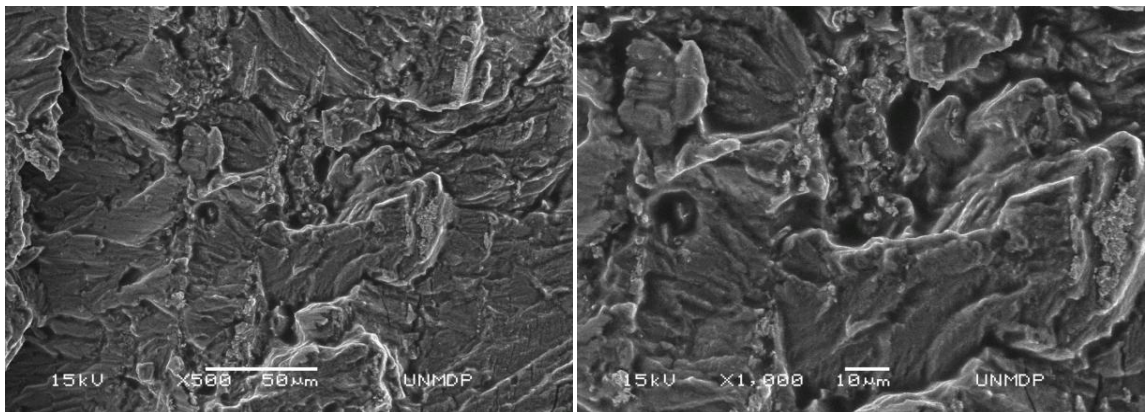


*Figura 9.42: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 200x).*

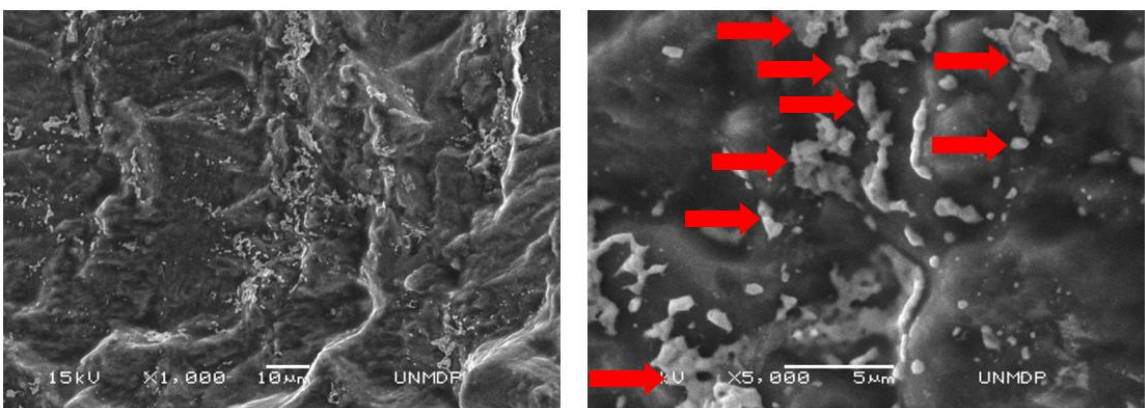
Las superficies analizadas se pueden observar en las Figuras 9.43; 9.44 y 9.45 correspondientes a la zona lateral A, central B, y lateral C respectivamente. No se encontró ningún trazador sobre la zona lateral A. Las zonas B y C muestran una morfología claramente cubierta por restos de lubricante. Los trazadores fueron detectados en estas dos zonas de análisis. Un espectro EDS de la zona central donde se detectan picos pertenecientes a los trazadores titanio y cloro, esto se puede observar en la Figura 9.46. Además, se ha encontrado sobre la superficie de fractura zonas contaminadas con partículas, las cuales tienen alto contenido de plomo desconociéndose su procedencia de formación (flechas sobre la imagen). Un espectro sobre estas partículas se puede observar en la Figura 9.47.



*Figura 9.43: Morfología de la superficies de fisura sin restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x).*



*Figura 9.44: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x).*



*Figura 9.45: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x).*



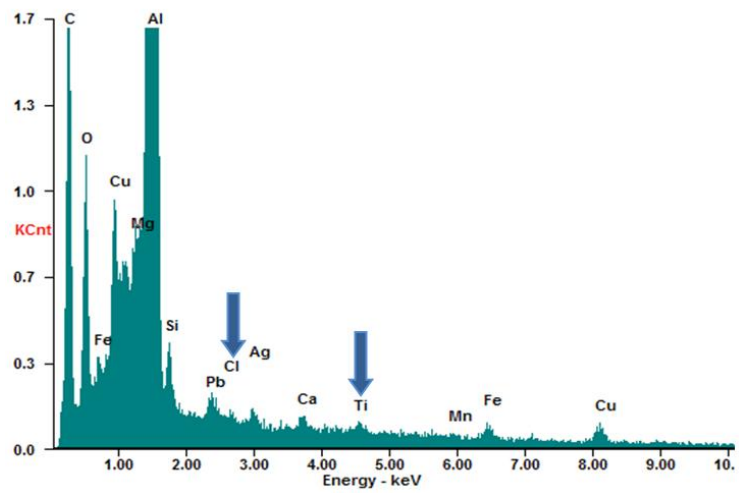


Figura 9.46: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl.

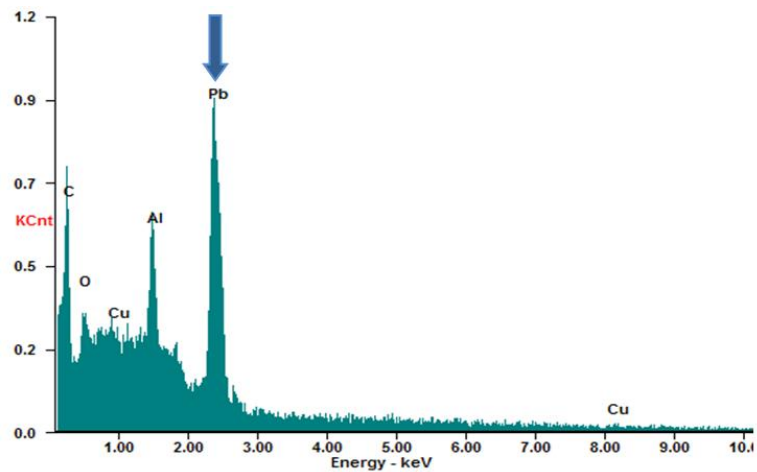
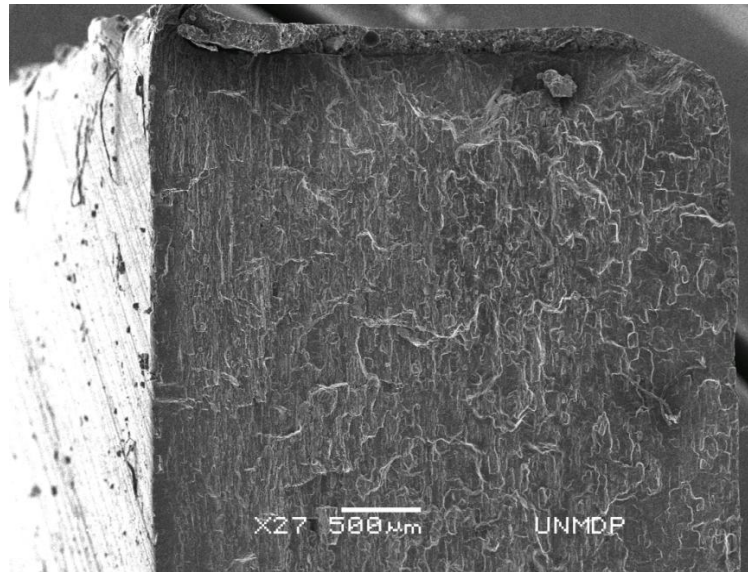


Figura 9.47: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre partículas detectadas en la zona lateral (C) (flecha azul) donde se observa la presencia de un alto contenido de plomo.

### Ensayo AL-75%GL-1000-N03

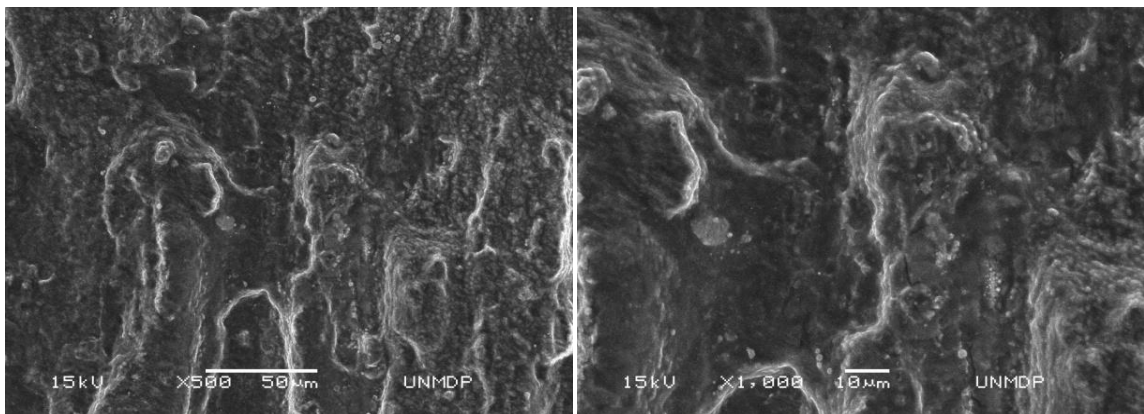
Las Figura 9.48 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-75%GL-1000-N03. En el mismo fue utilizada como lubricante una mezcla de composición 75% glicerina y 25% agua.



*Figura 9.48: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 200x).*

Las superficies analizadas se pueden observar en las Figuras 9.49, 9.50 y 9.51 correspondiente a la zona lateral A, central B, y lateral C respectivamente.

Si bien no se observa una clara retención del lubricante sobre la zona lateral (C), los trazadores fueron detectados en las tres zonas de análisis. Un espectro EDS de la zona lateral C se puede observar en la Figura 9.51 (Der.). Se detectan picos pertenecientes del trazador titanio.



*Figura 9.49: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x).*

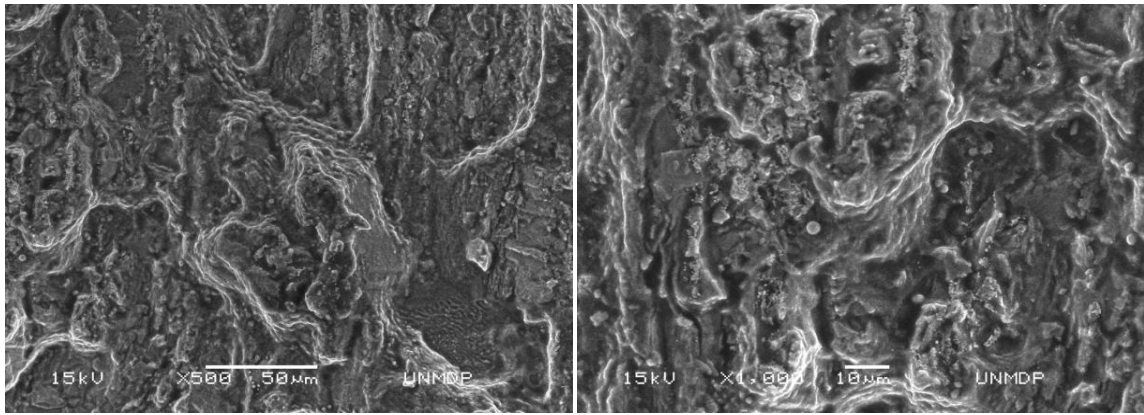


Figura 9.50: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x; 1000x).

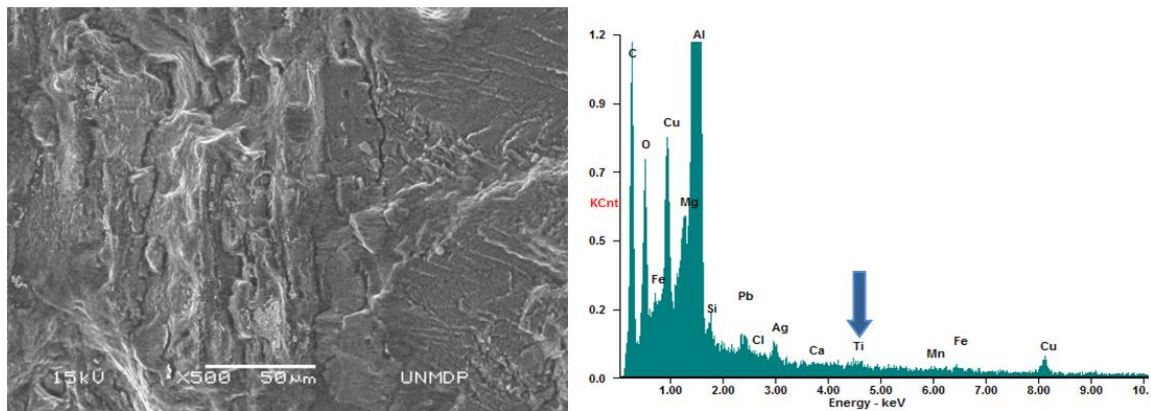


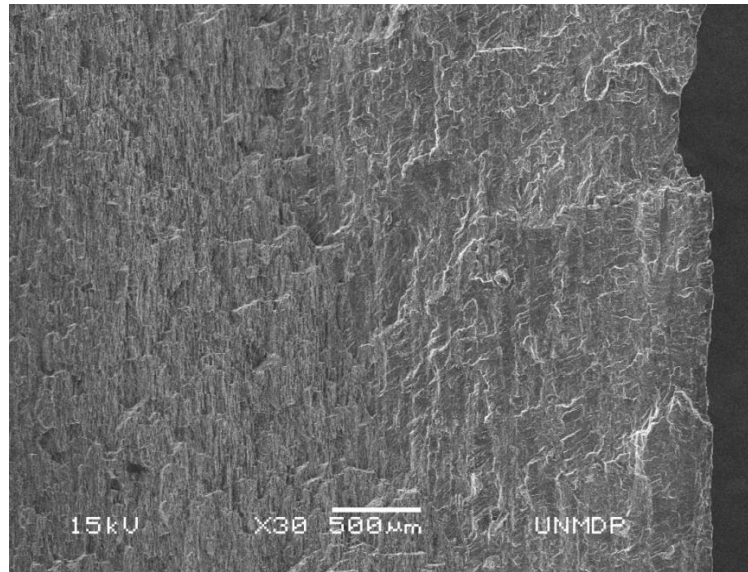
Figura 9.51: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 500x); espectro EDS sobre la superficie lateral con presencia de Ti.

### 9.6.3 Fluido lubricante: 50% Glicerina / 50% Agua

#### Ensayo AL-50%GL-1000-N01

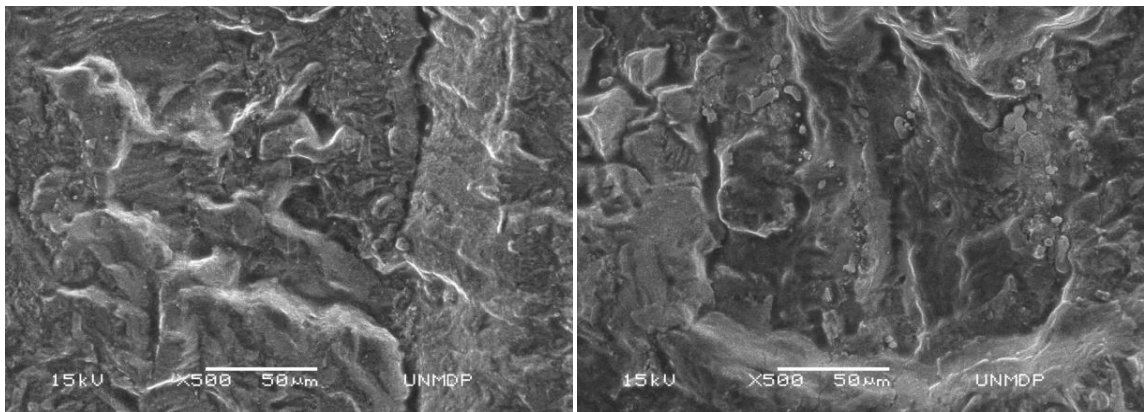
Las Figura 9.52 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-50%GL-1000-N01. En el mismo fue utilizada como lubricante una mezcla de 50% glicerina y 50% agua.





*Figura 9.52: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N01. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 200x).*

Las superficies analizadas se pueden observar en las Figuras 9.53, 9.54 y 9.55 correspondiente a la zona lateral A, central B, y lateral C respectivamente. Se observa un significativo cambio morfológico en las diferentes zonas de análisis. Los trazadores fueron detectados en las tres zonas de análisis. Un espectro EDS de la zona lateral C se puede observar en la Figura 9.56. Se detectan picos pertenecientes a los trazadores cloro y titanio.



*Figura 9.53: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x).*

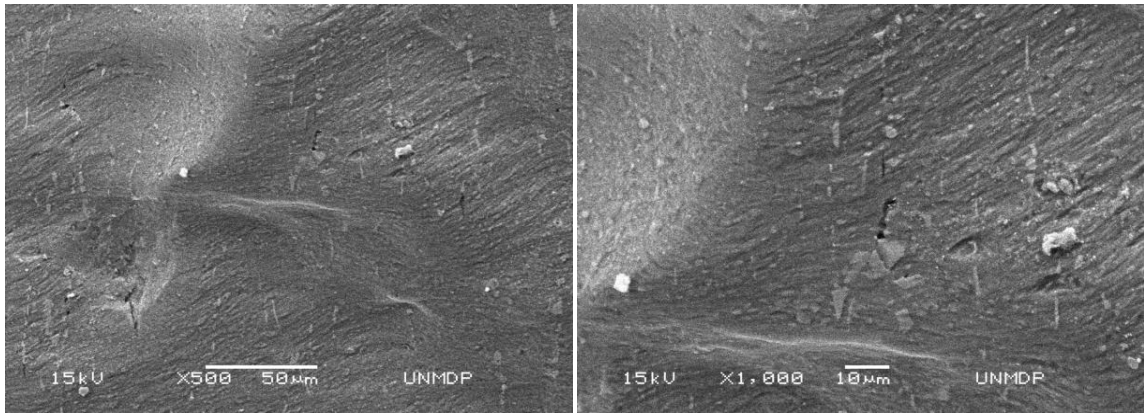


Figura 9.54: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x).

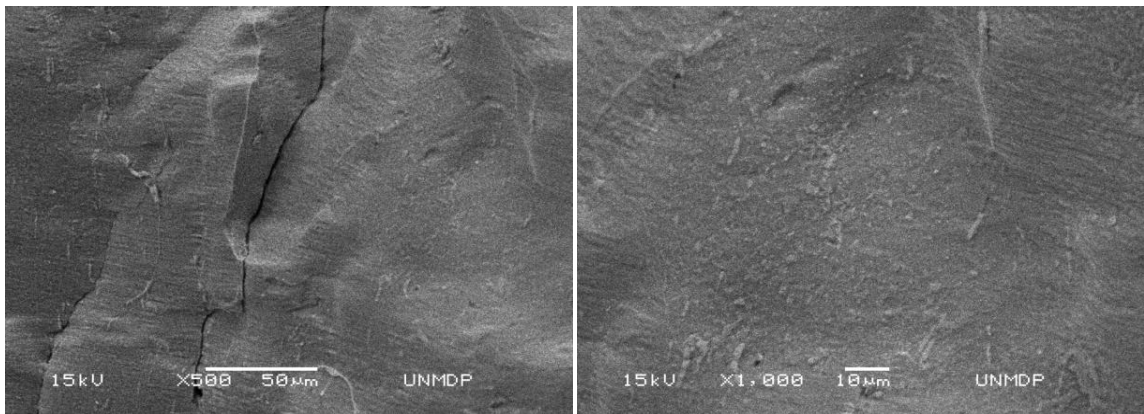


Figura 9.55: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N01 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x).

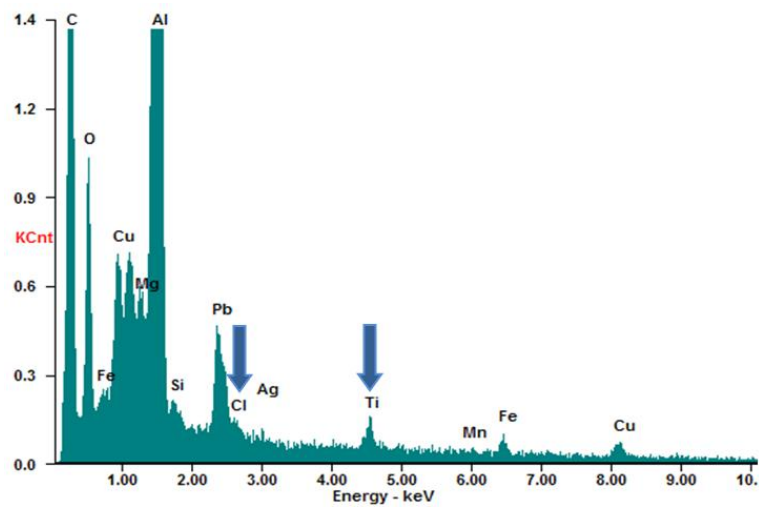


Figura 9.56: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-75%GL-1000-N02 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl.



### Ensayo AL-50%GL-1000-N02

Las Figura 9.57 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-50%GL-1000-N02. En el mismo fue utilizada una mezcla como lubricante con composición 50% glicerina y 50% agua.

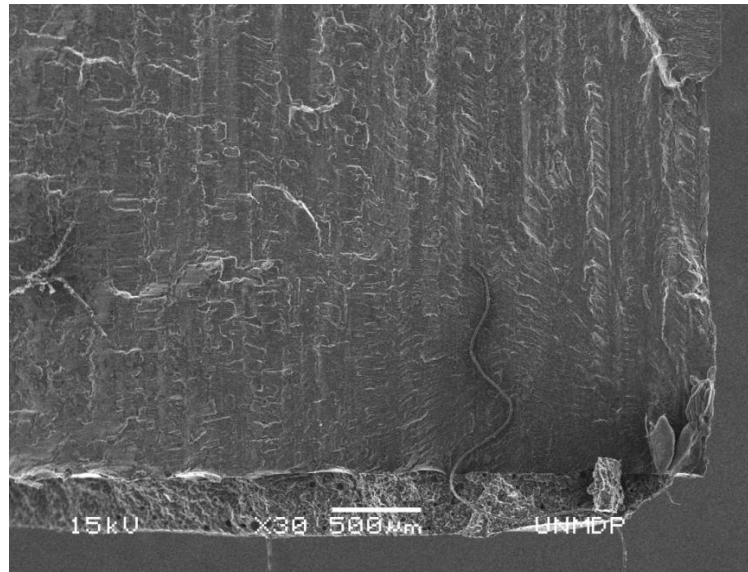


Figura 9.57: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N02. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 30x).

Las superficies analizadas se pueden observar en las Figuras 9.58 y 9.59 correspondiente a la zona central B, y lateral C respectivamente. Sobre la zona lateral A no se desarrolló crecimiento de fisura. Los trazadores fueron detectados en las dos zonas de análisis. Un espectro EDS de la zona lateral C se puede observar en la Figura 9.59 (Der.). Se detectan picos pertenecientes a los trazadores cloro y titanio.

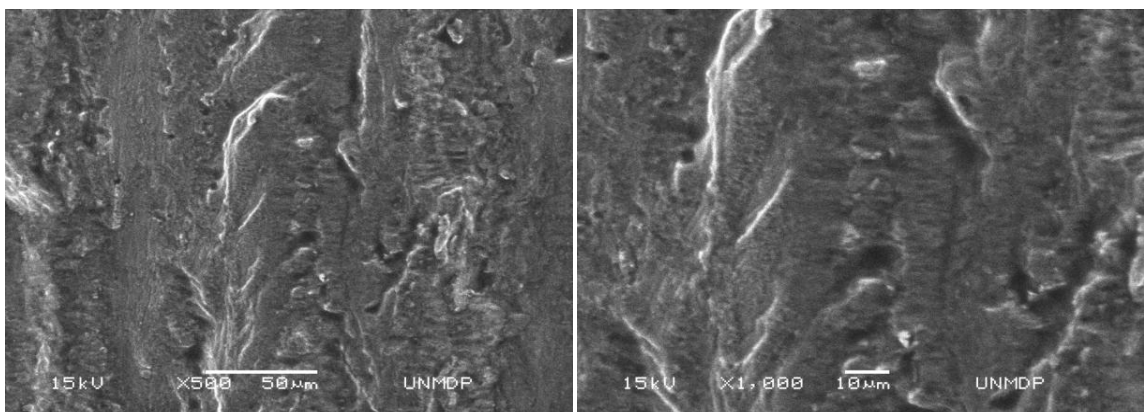
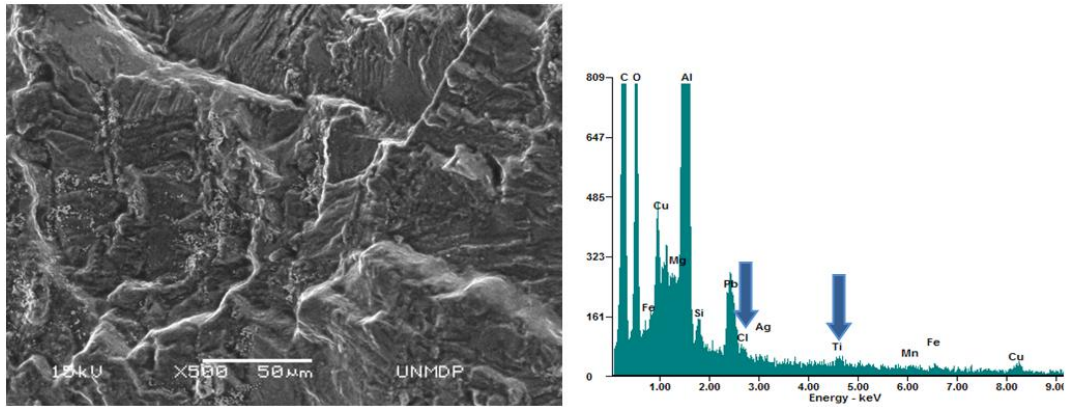


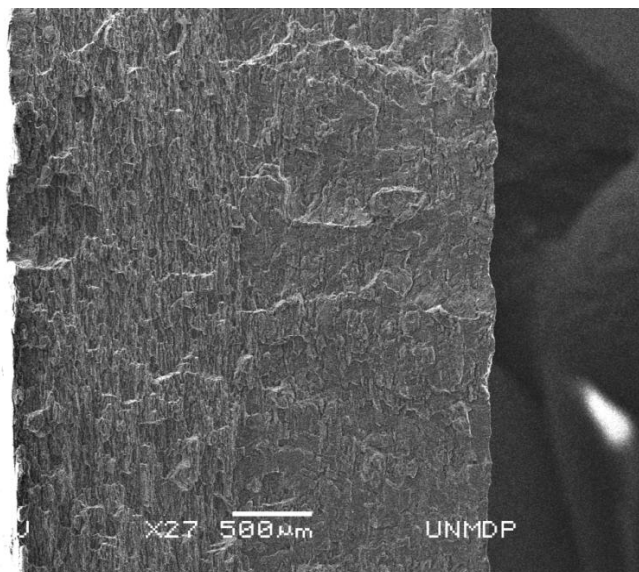
Figura 9.58: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N02 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x).



*Figura 9.59: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N02 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x).*

### **Ensayo AL-50%GL-1000-N03**

Las Figura 9.60 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-50%GL-1000-N02. En el mismo fue utilizada una mezcla como lubricante de composición 50% glicerina y 50% agua.



*Figura 9.60: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N03. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 27x).*

Las superficies analizadas se pueden observar en las Figuras 9.61, 9.62 y 9.63 correspondiente a la zona lateral A, central B, y lateral C respectivamente. Los trazadores fueron detectados en las tres zonas de análisis. Un espectro EDS de la zona central B se puede observar en la Figura 9.64. Se detectan picos pertenecientes a los trazadores cloro y titanio.

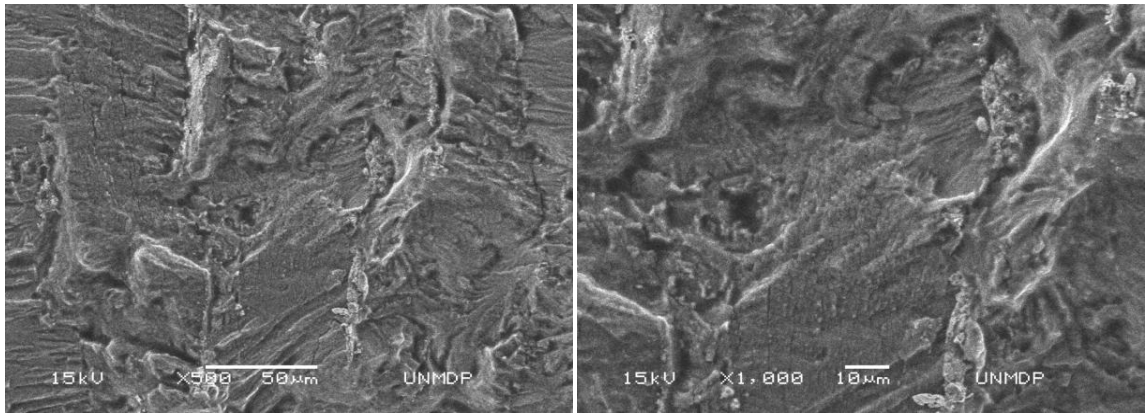


Figura 9.61: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x).

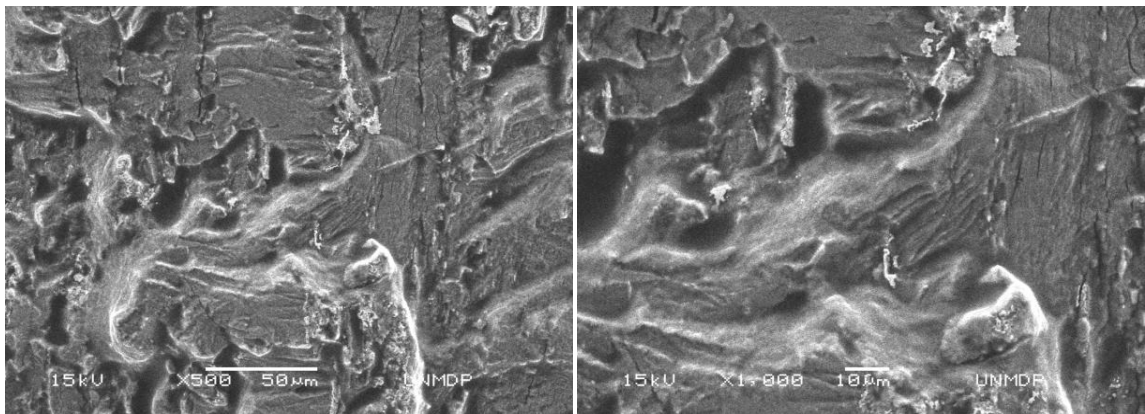


Figura 9.62: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N03 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x).

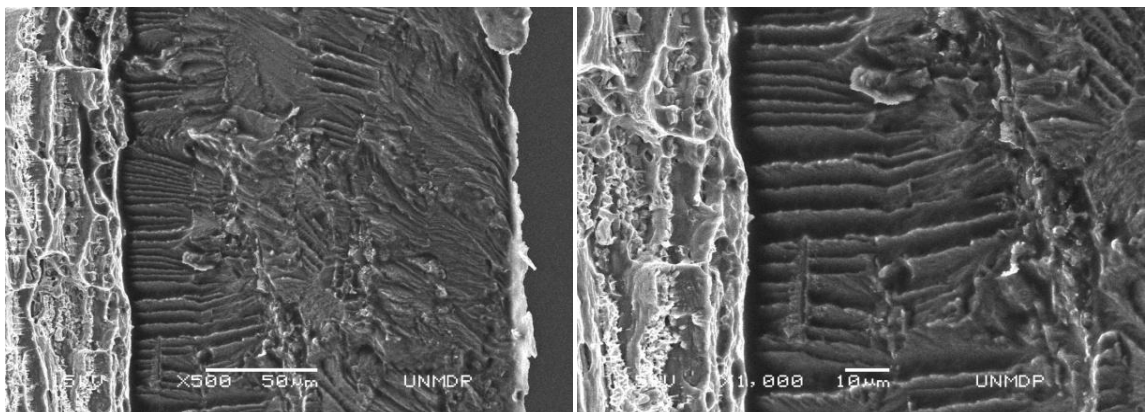


Figura 9.63: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-50%GL-1000-N03 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 500x; 1000x).



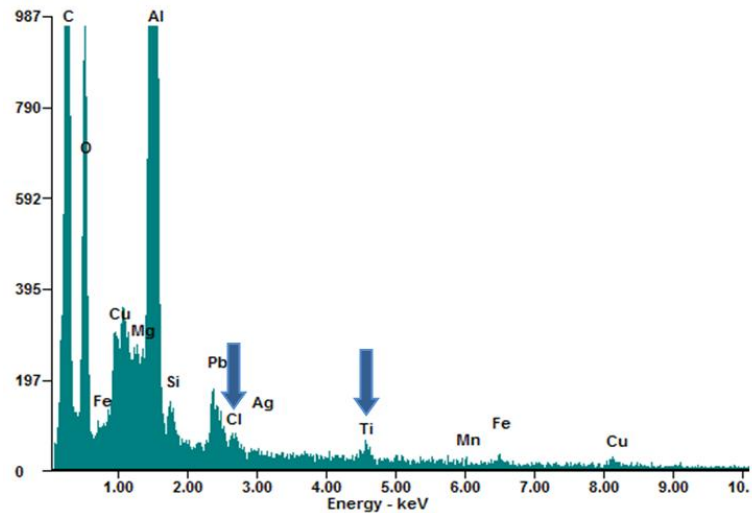


Figura 9.64: Análisis EDS pertenientes al ensayo AL-75%GL-1000-N03 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl.

#### 9.6.4 Fluido lubricante: Agua

##### Ensayo AL-100%AG-1000-N01

Las Figura 9.65 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-75%GL-1000-N01. En el mismo fue utilizada agua desmineralizada como lubricante.

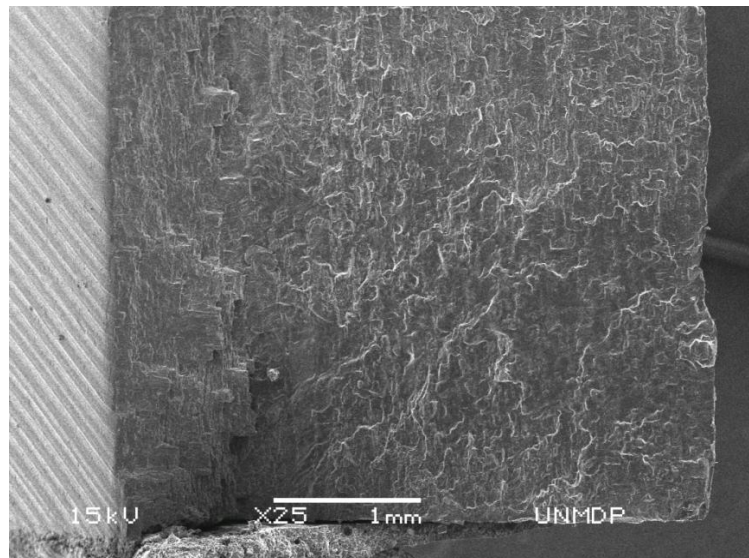


Figura 9.65: Morfología de la superficies de fisura pertenientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01. Fluido lubricante: agua (Mag.: 25x).

Las superficies analizadas se pueden observar en las Figuras 9.66, 9.67 y 9.68 correspondiente a la zona lateral A, central B, y lateral C respectivamente. Los trazadores fueron detectados en las tres zonas de análisis. Un espectro EDS de la zona central B se puede



observar en la Figura 9.69, donde se detectaron picos pertenecientes a los trazadores cloro y titanio.

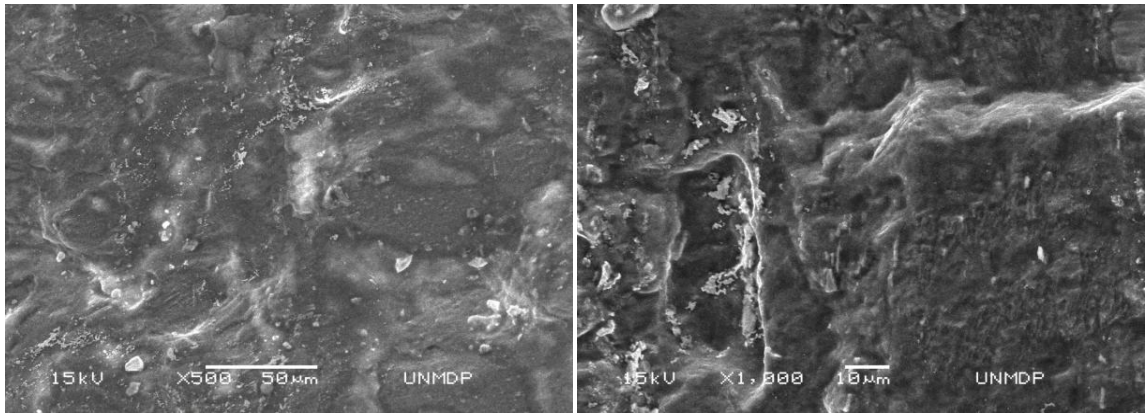


Figura 9.66: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x).

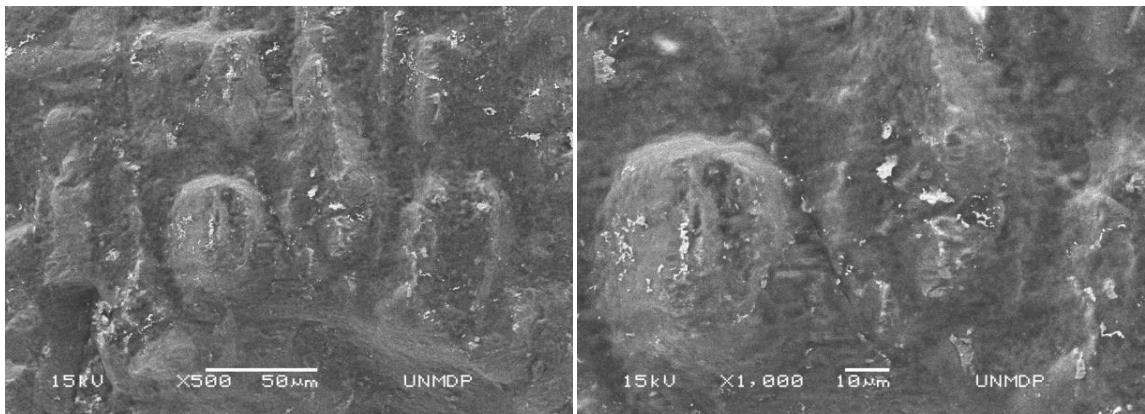


Figura 9.67: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01 sobre la zona central (B). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x).

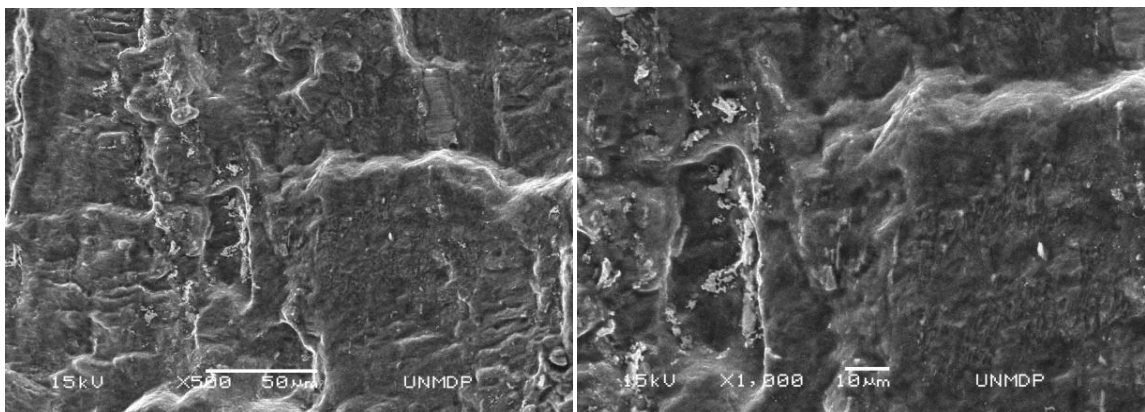


Figura 9.68: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01 sobre la zona lateral (C). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x).

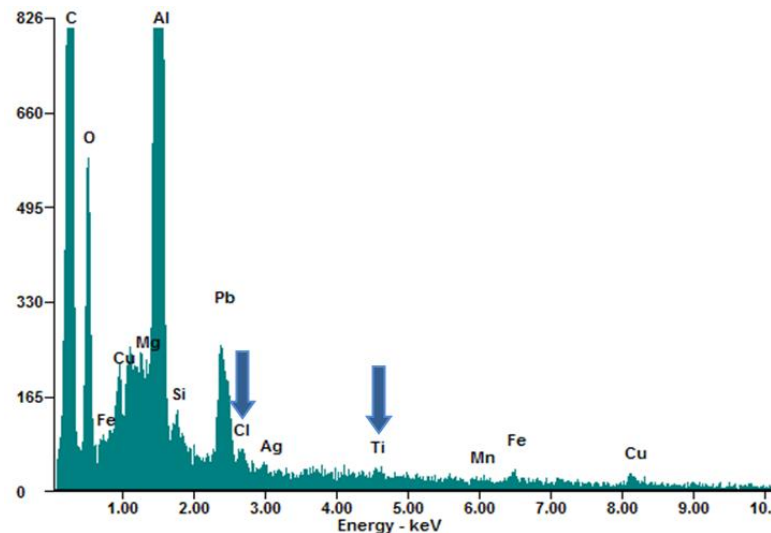


Figura 9.69: Análisis EDS pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N01 sobre la zona central (B) donde se observan los trazadores Ti y Cl.

### Ensayo AL-100%AG-1000-N02

Las Figura 9.70 muestra el interior de la fisura del ensayo AL-100%AG-1000-N02. En el mismo fue utilizada agua desmineralizada como lubricante.

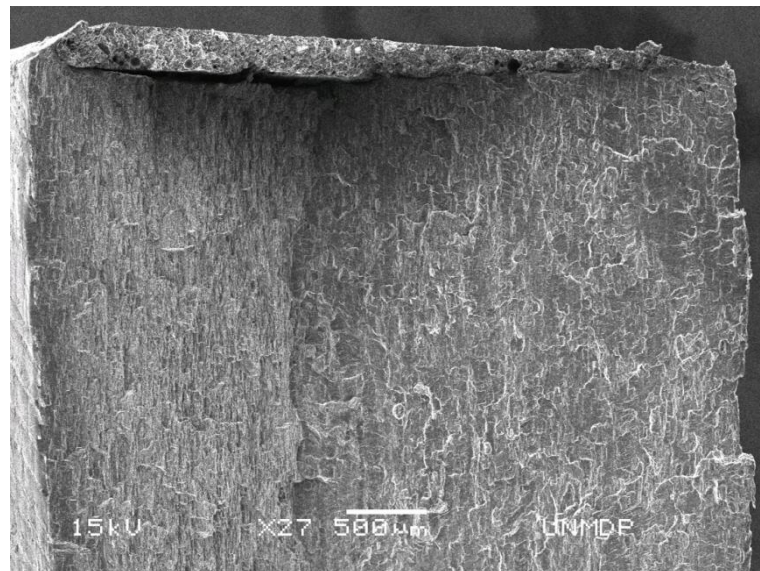


Figura 9.70: Morfología de la superficies de fisura pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N02. Fluido lubricante: agua (Mag.: 25x).

Las superficies analizadas se pueden observar en las Figuras 9.71; 9.72 y 9.73 correspondiente a la zona lateral A, central B, y lateral C respectivamente. Los trazadores fueron detectados en las tres zonas de análisis. Un espectro EDS de la zona central se puede observar en la Figura 9.72 (Der.). Se detectan picos pertenecientes al trazador cloro. Además, se han encontrado algunas zonas contaminadas con partículas, las cuales tienen alto contenido



de plomo al igual que lo presentado en el ensayo AL-75%GL-1000-N02. Un análisis mediante electrones retrodifundidos permite diferenciar las partículas con alto contenido de plomo dispersas sobre la superficie (ver Figura 9.73 Der.). Además, las mismas fueron coloreadas mediante un software de edición gráfica (Gimp 2.8) de un color verde contrastante para facilitar su identificación.

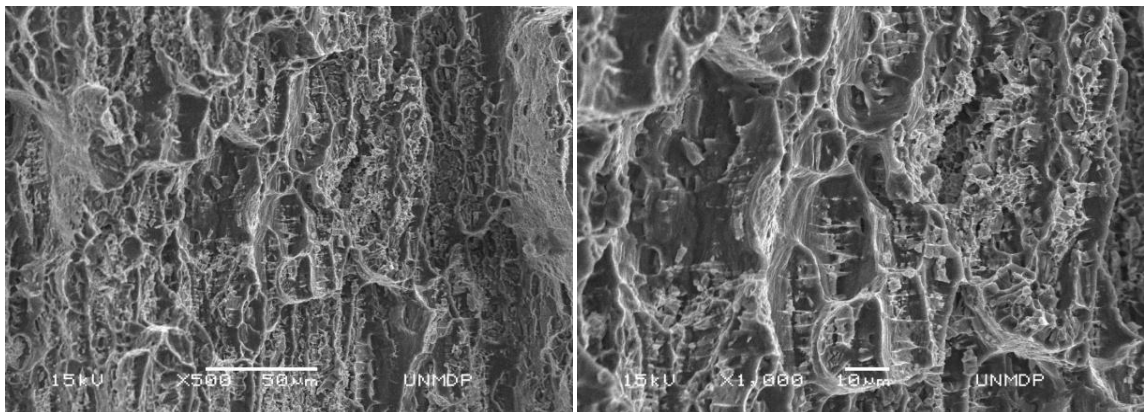


Figura 9.71: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N02 sobre la zona lateral (A). Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x; 1000x).

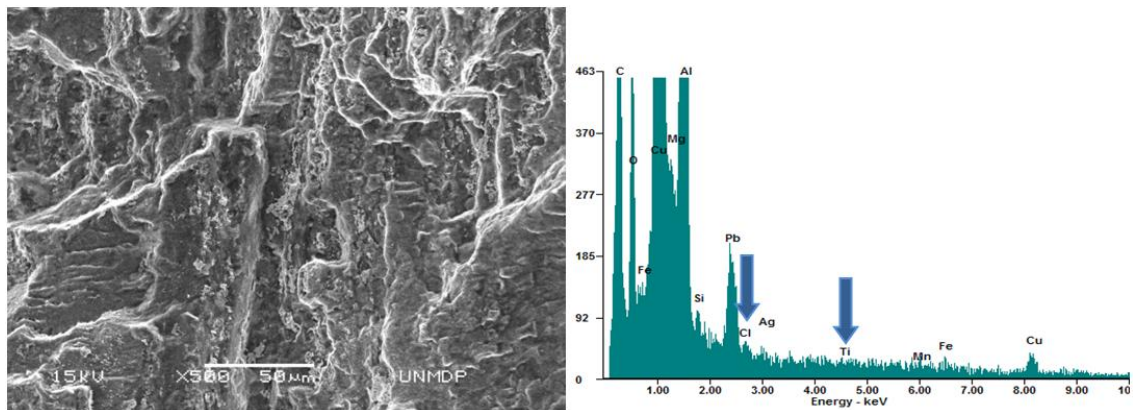


Figura 9.72: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N02 sobre la zona central (A). Análisis EDS sobre la zona central donde se observa el trazador Cl (Der.) (Mag.: 500x).

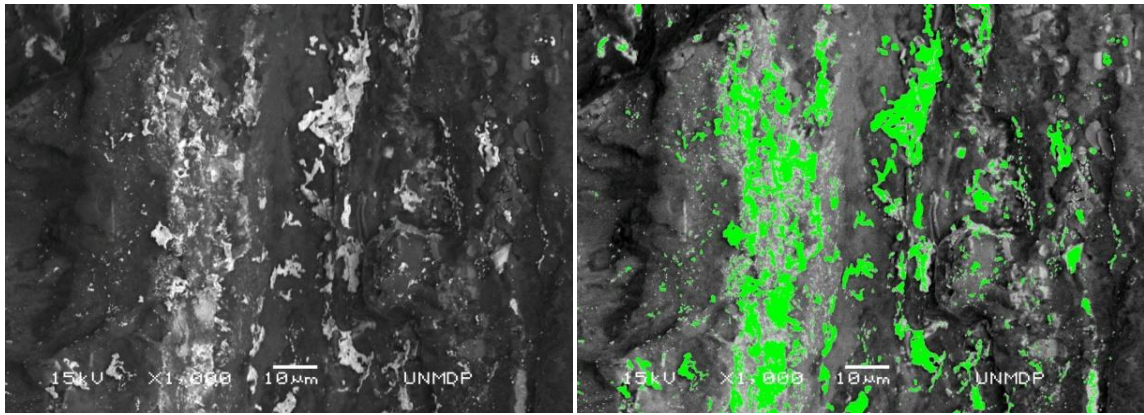


Figura 9.73: Morfología de la superficies de fisura con restos de lubricante pertenecientes al ensayo AL-100%AG-1000-N02 sobre la zona lateral (C). Electrones retrodifundidos (Der.) (Mag.: 500x).

## 9.7 PARTÍCULAS DE DESGASTE ESFÉRICAS

### 9.7.1 Fluido lubricante: Glicerina

#### *Ensayos AL-100%GL-1000-N01; AL-100%GL-1000-N02 y AL-100%GL-1000-N03*

No se observaron partículas esféricas en los ferrogramas realizados, ni tampoco se han detectado en los análisis morfológicos de las superficies de fisura. Se observaron partículas de descascarillado (llamadas “spalls”) típicas de degradación de superficie por rodadura (ver Figura 9.74).

Se han observado en los ferrogramas algunas partículas de forma cuasi-esférica que pudiesen generarse por aglomerado de óxidos. Las mismas se pueden visualizar en la imagen 9.75. El tamaño aproximado es de 25  $\mu\text{m}$  de diámetro, el cual es mucho mayor a las típicas esféricas de rodadura.

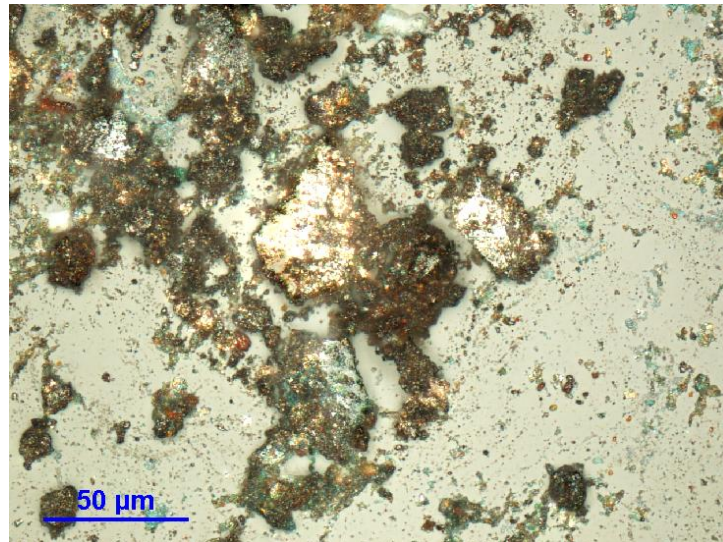


Figura 9.74: Ferrografía de ensayo AL-100%GL-1000-N01 realizada a los  $48 \times 10^3$  ciclos. Fluido lubricante: Glicerina (Mag.:500x).

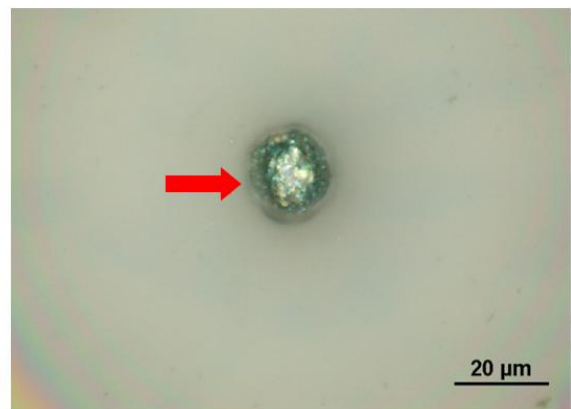
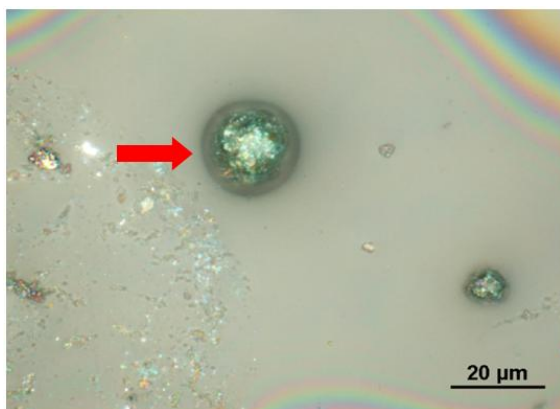
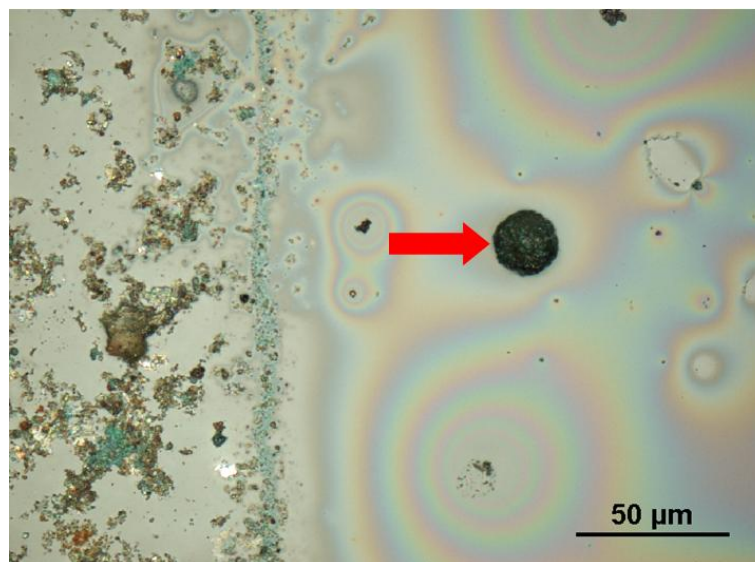


Figura 9.75: Ferrografía de ensayo AL-100%GL-1000-N01 realizada a los  $48 \times 10^3$  ciclos. Fluido lubricante: Glicerina (Mag.: Sup. 500x; Inf. 1000x).



### 9.7.2 Fluido lubricante: 75% Glicerina/25% agua

#### Ensayos AL-75%GL-1000-N01; AL-75%GL-1000-N02 y AL-75%GL-1000-N03

Una gran cantidad de partículas esféricas de aproximadamente 2  $\mu\text{m}$  han sido observadas en los ferrogramas (ver Figura 9.76). También, se ha detectado gran cantidad de partículas esféricas sobre las superficies de fractura con diferentes elementos en su composición. Mayoritariamente se han encontrado compuestas de plomo como elemento principal. Además, se vió en el ensayo AL-75%GL-1000-N02 se ha observado una gran contaminación de partículas de forma irregular con alto contenido de plomo sobre las superficies de fractura. El mecanismo de generación de estas partículas esféricas puede correlacionarse con lo propuesto por los autores Loy et al y Scott et al [4-5] donde se atribuye su generación a un aglomerado de partículas en el interior de las fisuras. Las Figuras 9.77 y 9.78 muestran tres partículas detectadas sobre las superficies de fisura correspondientes al ensayo AL-75%GL-1000-N01. Claramente se observa en los espectros EDS la presencia de plomo en su composición.

Otras partículas esféricas con elementos Fe y O se han encontrado, las cuales, por su composición, no podrían generarse en el interior de la fisura. Claramente provienen de la superficie de rodadura. Es decir, indefectiblemente esta partícula se habría generado sobre la superficie y penetrado hacia el interior de la fisura junto con el lubricante. Esto refuerza el mecanismo de generación planteado en el capítulo 8 para las partículas de la etapa de asentamiento (observada en todas las etapas de desgaste). Una imagen de una partícula con elementos Fe y O junto a su espectro EDS se puede observar en la Figura 9.79, detectada sobre las superficies de fisura del ensayo AL-75%GL-1000-N03.

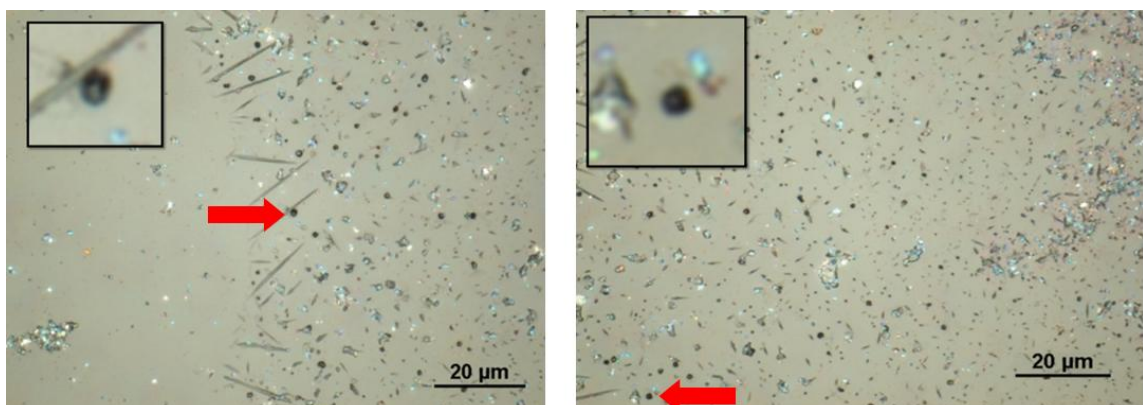


Figura 9.76: Ferrografía del ensayo AL-75%GL-1000-N01 realizada a los  $48 \times 10^3$  ciclos. Fluido lubricante: 75% Glicerina / 25% agua (Mag.: Sup. 500x; Inf. 1000x).



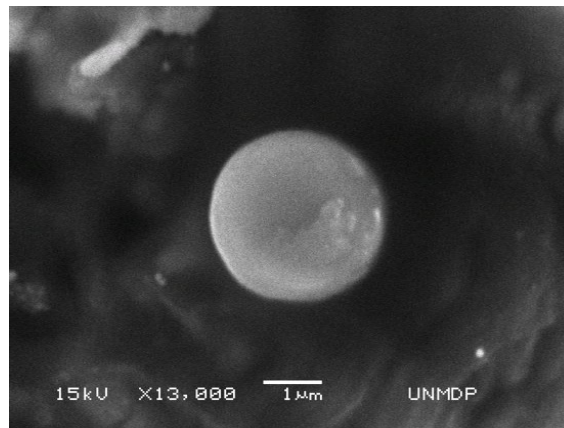


Figura 9.77: Partícula esférica detectada sobre la zona central (B) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-75%GL-1000-N01. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 13000x).

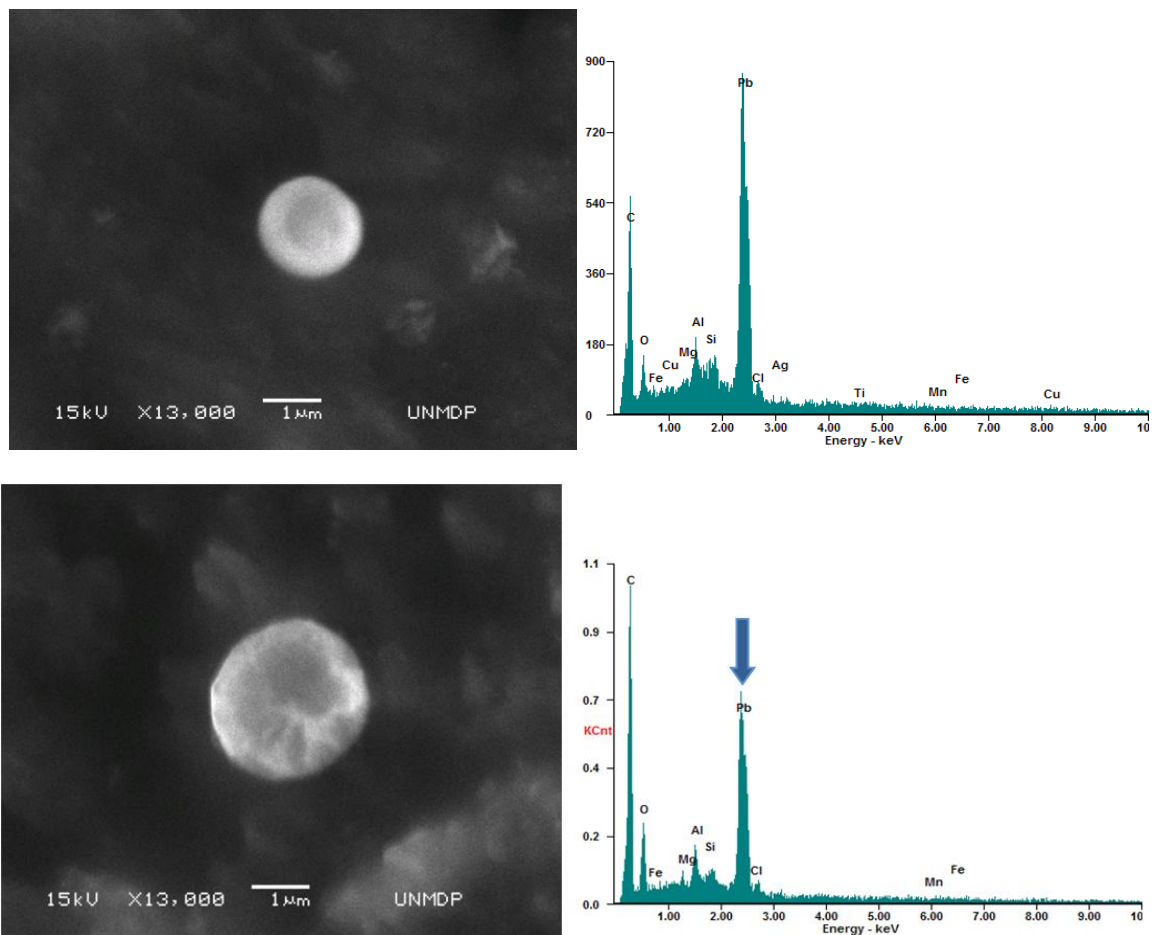


Figura 9.78: Partículas esféricas detectada sobre la zona central (B) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-75%GL-1000-N01 junto a sus espectros EDS. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: 13000x).

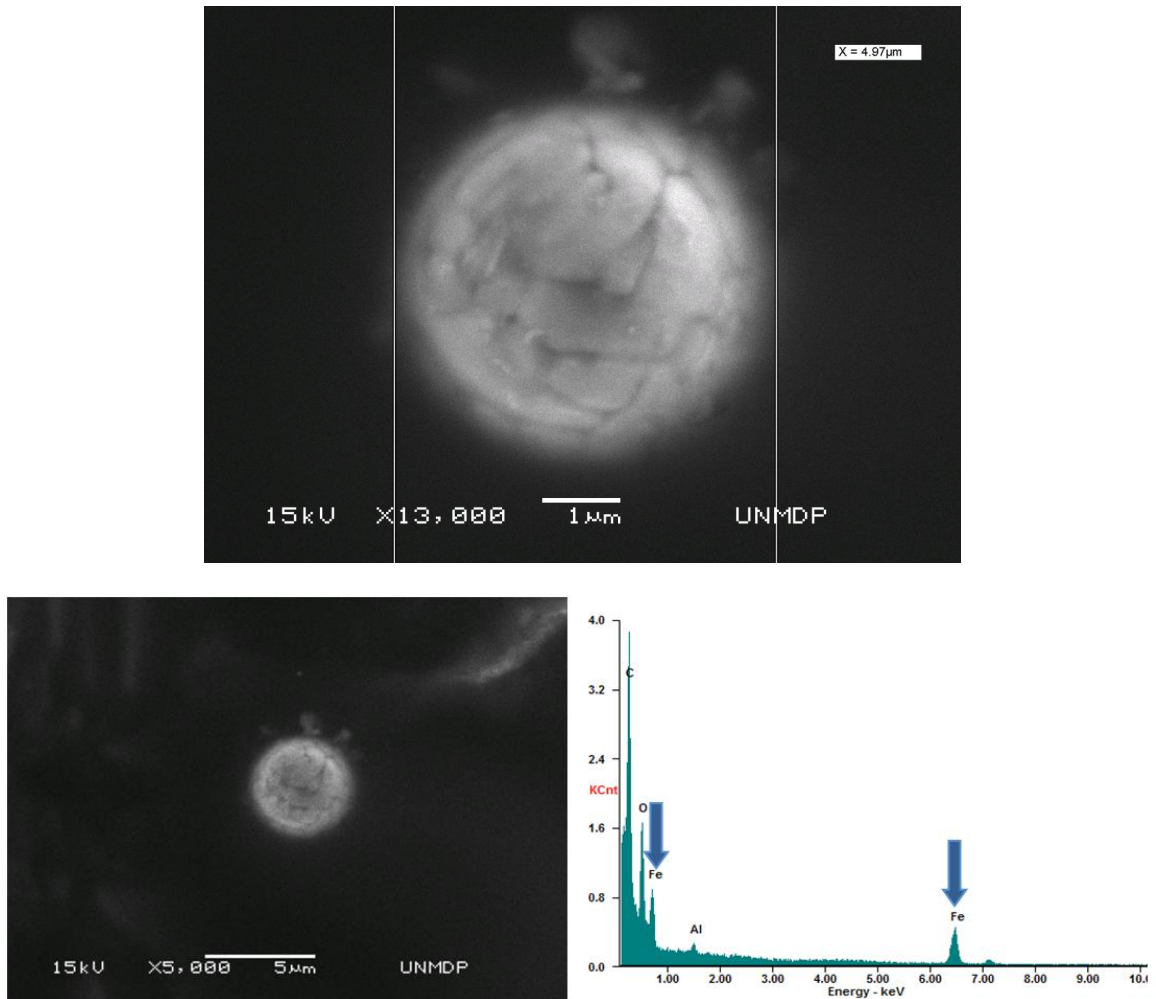


Figura 9.79: Partícula esférica detectada sobre la zona lateral (C) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-75%GL-1000-N01 junto a su espectro EDS. Fluido lubricante: 75% glicerina/25% agua (Mag.: Sup. 13000x; Inf. 5000x).

### 9.7.3 Fluido lubricante: 50% Glicerina/50% agua

#### Ensayos AL-50%GL-1000-N01; AL-50%GL-1000-N02 y AL-50%GL-1000-N03

Una elevada cantidad de partículas esféricas de aproximadamente 2 μm han sido observadas en los ferrogramas (ver Figura 9.80). Las partículas esféricas detectadas tienen alto contenido de plomo como las detectadas en los ensayos anteriores.

La Figura 9.81 muestra una partícula detectada sobre la superficie de fisura del ensayo AL-50%GL-1000-N01 junto a su espectro EDS, exhibiéndose la presencia de alto contenido de plomo en su composición.

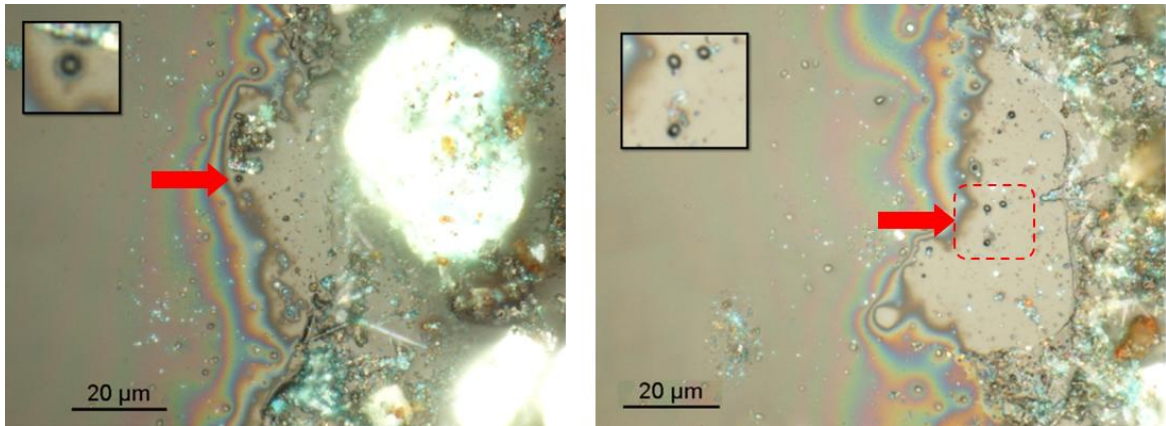


Figura 9.80: Ferrografía del ensayo AL-50%GL-1000-N01 realizada a los  $48 \times 10^3$  ciclos. Fluido lubricante: 50% Glicerina / 50% agua (Mag.: Sup. 500x; Inf. 1000x).

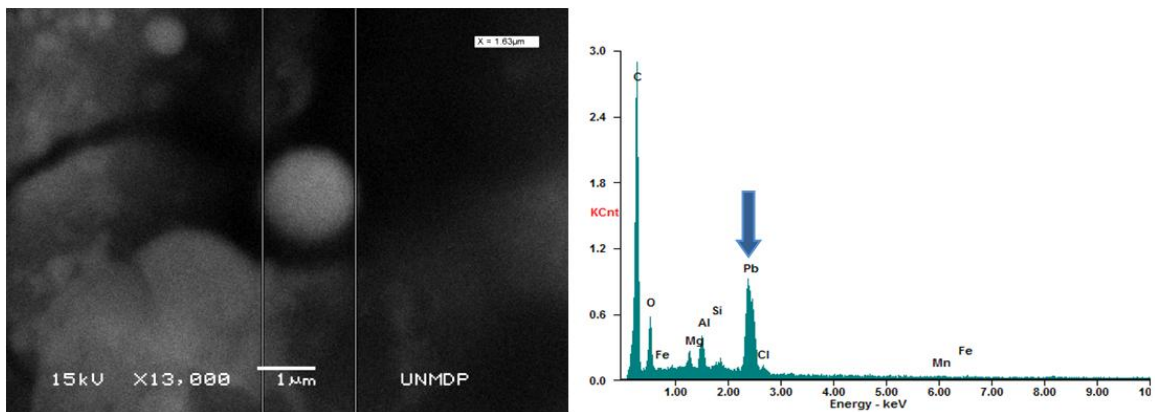


Figura 9.81: Partícula esféricas detectada sobre la zona central (B) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-50%GL-1000-N01 junto a su espectro EDS. Fluido lubricante: 50% glicerina/50% agua (Mag.: 13000x).

### 9.7.4 Fluido lubricante: agua

#### Ensayos AL-100%AG-1000-N01; AL-100%AG-1000-N02

Se han observado esporádicamente partículas esféricas en los ferrogramas realizados y sobre las superficies de fisura. Algunas partículas detectadas en los ferrogramas pueden verse en la imagen 9.82. Las partículas esféricas detectadas tienen alto contenido de plomo como las detectadas en los ensayos anteriores. La Figura 9.83 muestra una partícula sobre las superficies de fisura del ensayo AL-100%AG-1000-N01 junto a su espectro EDS donde se observa lo mencionado.

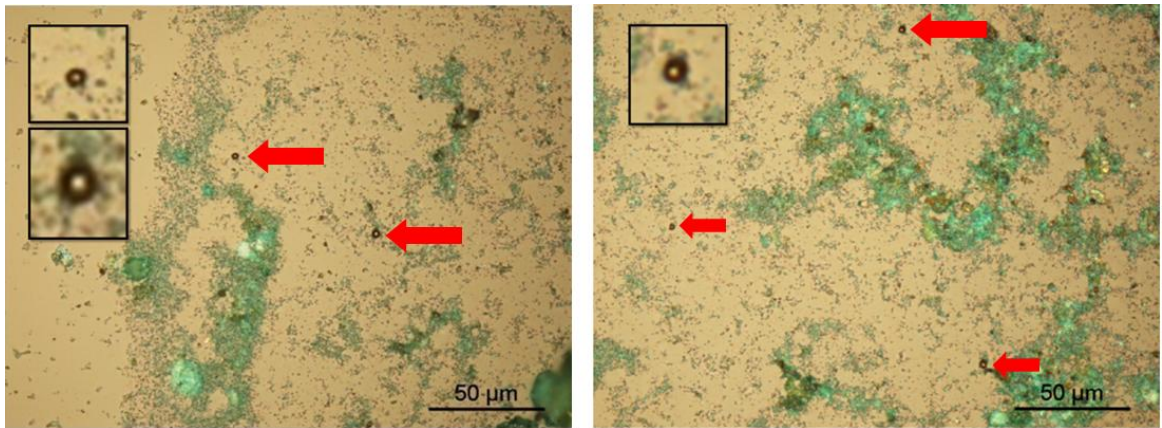


Figura 9.82: Ferrografía del ensayo AL-100%GL-1000-N01 realizada a los  $48 \times 10^3$  ciclos. Fluido lubricante: agua (Mag.: 500x).

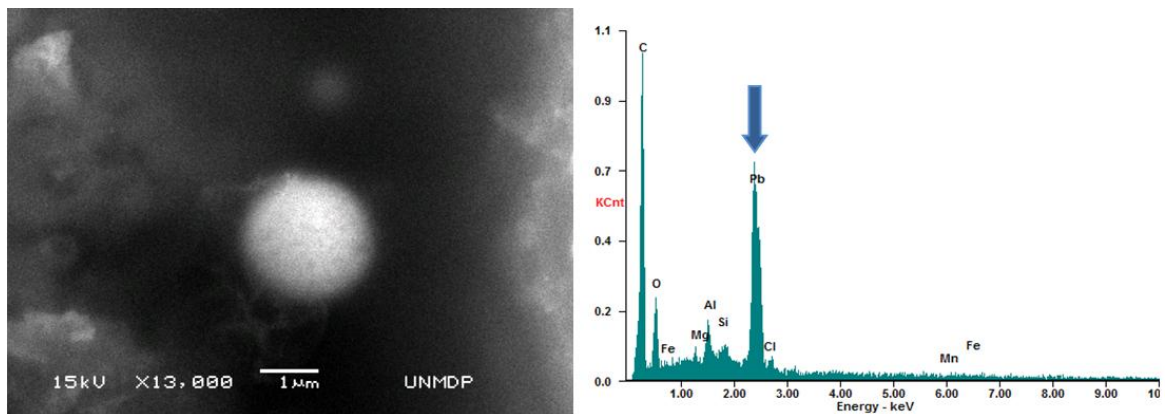


Figura 9.83: Partícula esférica detectada sobre la zona central (B) de la superficie de fractura perteneciente al ensayo AL-100%AG-1000-N01 junto a su espectro EDS. Fluido lubricante: agua (Mag.: 13000x).

## 9.8 ANÁLISIS DEL LUBRICANTE

Los análisis realizados mediante espectrometría FTIR no presentancambios estructurales en el lubricante para los ensayos realizados con las probetas de CAMPLO 2005 T3. En contraparte, se han detectado indicios de pequeños cambios para los ensayos de acero AISI-SAE 4140. La Figura 9.84 muestra un espectro FTIR del lubricante con composición 50% glicerina/50% agua, antes de comenzar los ensayos. La Figura 9.85 correspondiente a una muestra tomada al finalizar el ensayo AL-50%GL-1000-N01 ( $12 \text{ horas}/48 \times 10^3$

ciclos). Comparando el espectro FTIR con el realizado antes de comenzar el ensayo, no se observan rasgos de oxidación.

Una pequeña degradación en el lubricante puede notarse en la Figura 9.86 correspondiente a una muestra tomada al finalizar el ensayo AC-50%GL-3000-N01 (250 horas/ $10^6$  ciclos). Comparando el espectro FTIR con el realizado antes de comenzar el ensayo, se observa un pequeño rasgo de oxidación característico producto de las sollicitaciones realizadas en el ensayo. Se identifica por el ruido sobre la zona marcada, la cual es característica de grupos carbonilo que se asocian con la oxidación del lubricante [6-7].

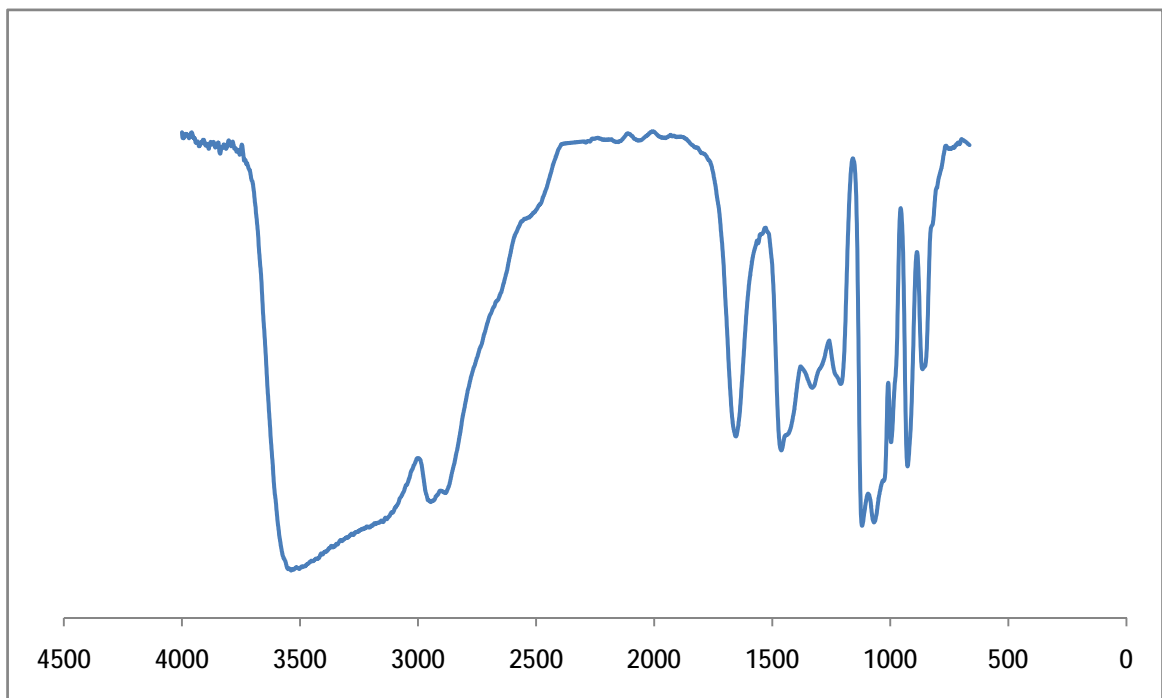


Figura 9.84: Espectro FTIR del lubricante (Mezcla Glicerina y agua 50% en peso) antes de realizar los ensayos.



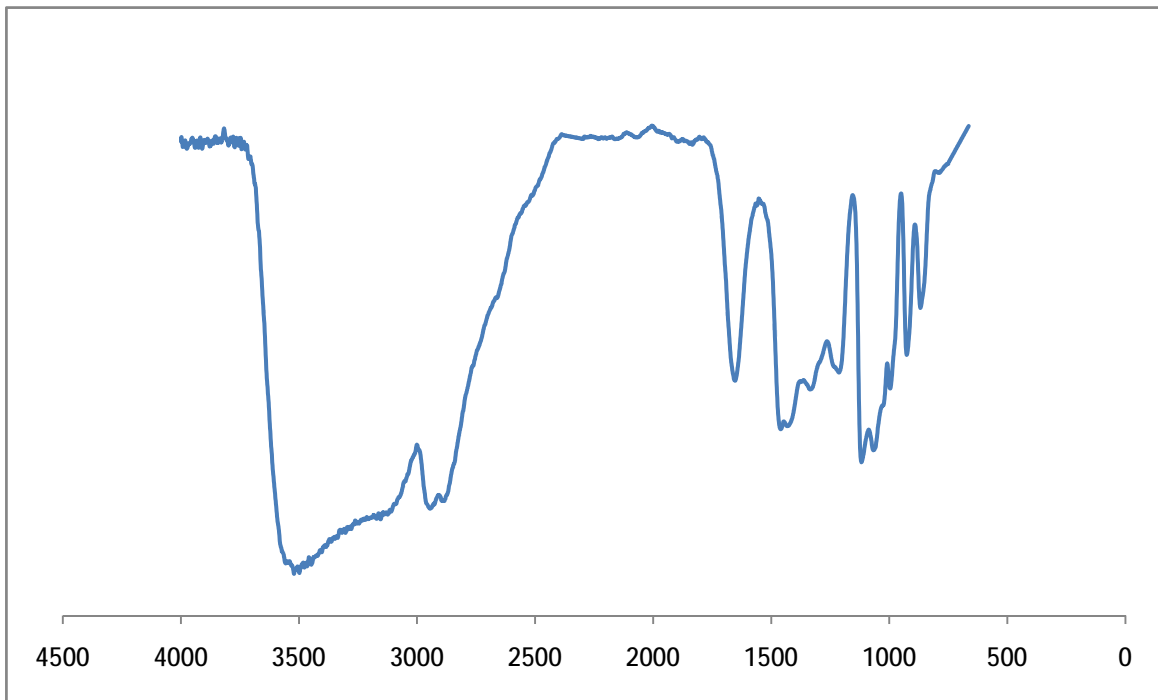


Figura 9.85: Espectro FTIR del lubricante (Mezcla Glicerina y agua 50% en peso) luego del ensayo realizado AL-50%GL-1000-N01 ( $48 \times 10^3$  ciclos).

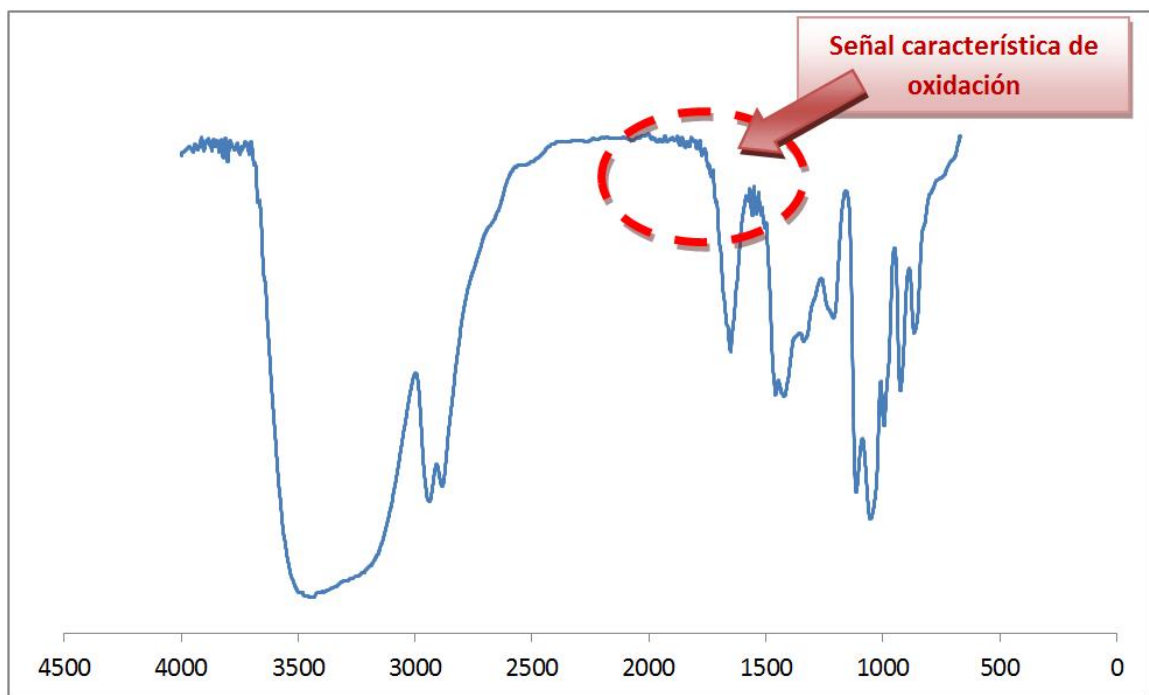


Figura 9.86: Espectro FTIR del lubricante (Mezcla Glicerina y agua 50% en peso) luego del ensayo realizado AC-50%GL-3000-N01 ( $10^6$  ciclos).

## 9.9 DISCUSIÓN

### 9.9.1 Interacción líquido en fisuras abiertas por fatiga de contacto

Los ensayos realizados permitieron determinar la penetración del lubricante en fisuras por rodadura en diferentes materiales. En las tablas 9.9 y 9.10 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para ambos grupos de materiales ensayados.

Tabla 9.9: Resumen de resultados de ensayos realizados sobre acero AISI-SAE 4140.

Ensayo	Denominación ensayo	Profundidad de fisura [mm]			Lubricante	Penetración
		Zona (A)	Zona (B)	Zona (C)		
1	AC-100%GL-3000-N01	0	0.7	0	100% Glicerina	-
2	AC-75%GL-3000-N01	1	2	1	75% Glicerina	-
3	AC-50%GL-3000-N01	1	2	1	50% Glicerina	A-B
4	AC-100%AG-3000-N01	1	2	1	100% Agua	A-B

Tabla 9.10: Resumen de resultados de ensayos realizados sobre CAMPLO 2005 T3.

Ensayo	Denominación ensayo	Profundidad de fisura [mm]			Lubricante	Penetración
		Zona (A)	Zona (B)	Zona (C)		
A	AL-100%GL-1000-N01	-	-	-	100% Glicerina	-
B	AL-100%GL-1000-N01	-	-	-	100% Glicerina	-
1	AL-100%GL-1000-N01	4.3	2.4	0	100% Glicerina	A-B
2	AL-100%GL-1000-N02	2.5	3.2	1.5	100% Glicerina	A-B-C
3	AL-100%GL-1000-N03	0	2.4	3.8	100% Glicerina	B-C
4	AL-75%GL-1000-N01	1.1	2.1	2.5	75% Glicerina	A-B-C
5	AL-75%GL-1000-N02	2.1	1.9	2.3	75% Glicerina	B-C
6	AL-75%GL-1000-N03	2.9	2.1	1.1	75% Glicerina	A-B-C
7	AL-50%GL-1000-N01	5	3.5	1.9	50% Glicerina	A-B-C
8	AL-50%GL-1000-N02	0	2	2.5	50% Glicerina	B-C
9	AL-50%GL-1000-N03	6.2	5	1	50% Glicerina	A-B-C
10	AL-100%AG-1000-N01	3.1	2	0.5	100% Agua	A-B-C
11	AL-100%AG-1000-N02	1.5	1.1	2	100% Agua	A-B-C

Varios autores han estudiado la influencia del líquido en fisuras abiertas producidas por fatiga de contacto por rodadura. Uno de los pioneros en el estudio ha sido S. Way [8] quien en 1935 presentó un mecanismo experimental, a partir de ensayos de rodadura disco contra disco, en el cual se establecía que la presencia del líquido en el interior de la fisura era el responsable de su crecimiento. En este mecanismo, el crecimiento de la fisura se ve facilitado por la presión generada por el fluido atrapado en el interior de la fisura.

Posteriormente, varias investigaciones teóricas han confirmado que la presencia de líquido en el interior de la fisura genera tensiones mayores (en comparación a las generadas sin líquido) las cuales favorecen el crecimiento. Entre ellas se incluyen trabajos como los presentados por F. Bower [9], Y. Murakami et al. [10], W. Tyfour et al. [11] aplicado a aceros perlíticos de uso en vías de ferrocarril y por P. Clayton [12] sobre aceros perlíticos y bainíticos. Todos ellos elaboraron modelos numéricos para evaluar la influencia del líquido en las fisuras por FCR. En la actualidad estos modelos han incrementado su complejidad, migrando de dos a tres dimensiones, con varios fenómenos simultáneos asociados con la presencia del líquido dentro de la fisura. Algunos modelos confieren el rol principal del fluido a una "presión hidráulica" y una "reducción de la fricción" los cuales han sido discutidos por F. Bower [9], Bogdanski [13] y otros autores [14, 15, 16]. Ellos han enunciado que la influencia de la presión interna a lo largo de las superficies de la fisura debida al líquido atrapado aumenta la máxima tensión tangencial en la dirección de propagación de la fisura (modo KI), como así también generando un cambio en la densidad de energía de deformación. En estos mecanismos, las fuerzas de fricción entre ambas caras de la grieta y las superficies de contacto por rodadura también se modificaron, reduciendo su fricción, y aumentando las tensiones del modo de fractura tipo KI y KII.

Un tercer mecanismo teórico, llamado "fluido atrapado", también ha sido discutido por A. Bower [9], y M. Kaneta y colaboradores [15-17] además de otros autores [18-20]. En este caso, el mecanismo de "atrapado" proporciona altos niveles en el factor de intensidad de tensiones KI, debido a la presión hidráulica que tiende a abrir la grieta cuando el elemento rodante pasa por la superficie de la fisura. Estos tres mecanismos son bastante restringidos a los fenómenos cuasi-estáticos.

Un cuarto modelo teórico, propuesto por S. Bogdanski [21,22], además de considerar la "compresión" de la capa de fluido en el interior de la fisura, incluyó algunos efectos transitorios que tienen lugar dentro de la grieta. A altas velocidades ( $\sim 200$  Km/h), la fisura experimenta una vibración característica a 20 Hz, la cual no era considerada hasta el momento. S. Bogdanski llegó a la conclusión con sus estudios, que las tensiones generadas en la dirección de propagación de la fisura son directamente proporcionales al volumen de líquido atrapado, con lo cual resulta importantísimo estudiar la dinámica de penetración del fluido para diferentes condiciones. Otro trabajo, realizado por S. Bogdanski [23] consideró la dinámica de la apertura de la fisura, y la diferencia de presión generada en el interior de la misma, con el fin de determinar la posibilidad de penetración del líquido bajo diferentes condiciones. Este trabajo encontró una velocidad límite de 0.9 m/s para la penetración de agua

como fluido sobre fisuras de 13,5 mm ( $15^\circ$  sobre la superficie) con una presión de contacto aplicada de 848 MPa.

Si bien se ha visto el gran avance en el estudio teórico respecto del rol del líquido en la rodadura de contacto, hasta el momento existen muy pocos estudios experimentales que analicen el comportamiento del líquido bajo diversas condiciones. También S. Bogdanski et al. [24] han realizado ensayos experimentales con probetas de laboratorio pre-fisuradas, pero del tipo fatiga de sustrato. Las mismas fueron selladas en sus extremos con un material polimérico, se las sumergió en un fluido y fueron sometidas a tensiones cíclicas de tracción-compresión, para analizar la penetración del líquido junto con el crecimiento de la fisura luego de 79000 ciclos. Se analizaron varios fluidos (agua, aceite para transformadores  $v= 132 \text{ mm}^2/\text{s}$  y aceite para cajas reductoras  $v= 169 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) con diferentes tipos de curvas de carga y frecuencias (de 0,01 a 8Hz) para los ensayos. Si bien se supuso que el líquido no penetraba en la fisura, a partir de la poca diferencia en el crecimiento de las fisuras, estos ensayos no son comparables con los fenómenos asociados a la FCR ya que las tensiones a las que se ve sometida el área donde se desarrolla la fisura, fueron totalmente diferentes a las que se producen durante el contacto con movimiento de rodadura. Además, en esos estudios experimentales no se producía el mecanismo de “líquido atrapado” típico de rodadura de contacto.

Otro autor, D. Fletcher [25] ha analizado la penetración de diferentes líquidos sobre rieles de ferrocarril pre-fisurados sacados de servicio, y ensayados mediante rodadura de contacto con 1000 ciclos acumulados. Se encontró que líquidos con base agua de 11 cSt de viscosidad penetraron en las grietas, y no así, con líquidos de base pintura diluidos en agua (emulsión). Si bien los resultados presentados resultaron de gran utilidad práctica, no se desarrollaron más ensayos que permitieran evidenciar influencia de la viscosidad o de velocidad. Otro autor, M. Kaneta [14] ha realizado trabajos experimentales con probetas cilíndricas de acrílico (disco contra disco), con fisuras superficiales pasantes a ciertos ángulos (realizadas artificialmente mediante mecanizado) para analizar la penetración del lubricante en ensayos de FCR. Si bien sus resultados permitieron demostrar la penetración del líquido para varias condiciones, y analizar el crecimiento de fisura, los resultados no son comparables con fisuras producidas por FCR ya que las mismas difieren geométrica y topográficamente de las logradas mediante mecanizado. Estas diferencias modifican las tensiones generadas en la punta de la fisura.

En los ensayos de rodadura realizados en esta tesis la velocidad máxima lineal fue de 0,07 m/s. Si bien, la misma está muy por debajo del límite calculado por S. Bogdanski [23] para fisuras de mayor tamaño, y con agua como fluido lubricante (0.9 m/s), se condice con sus

resultados, ya que se observó una penetración total en los ensayos realizados con material base de aluminio. Además, S. Bogdanski [26] también ha establecido velocidades límites de penetración para otros fluidos lubricantes, aumentando la misma al aumentar la viscosidad. Los resultados obtenidos permiten determinar que para las condiciones ensayadas, con los diferentes lubricantes, la velocidad límite está por encima de 0.07 m/s para todos los fluidos ensayados en las probetas de aleación de base aluminio (ver Figuras 8.27; 8.41; 8.56 y 8.69).

En las probetas de base hierro, no se observó una penetración para la totalidad de los ensayos (ver Figuras 9.5 y 9.7). Se concluye que la presión aplicada y el número de ciclos de los ensayos no permiten la posibilidad de llenado de la fisura ni tampoco el crecimiento en la misma. Se estima que incrementando la carga y/o cantidad de ciclos se observaría una penetración total del fluido lubricante. En trabajos futuros se propone analizar el crecimiento de la fisura conjuntamente con la penetración para diferentes líquidos, ya que lo mencionado excede los objetivos de estesis.

### 9.9.2 Identificación de Partículas de Desgaste Esféricas

En las tablas 9.11 y 9.12 se presenta un resumen de los resultados de determinación de presencia partículas esféricas obtenidas en los ensayos tribológicos realizados.

Tabla 9.11: Partículas esféricas detectadas en ensayos realizados sobre acero AISI-SAE 4140.

Ensayo	Denominación ensayo	Lubricante	Detección de partículas esféricas	
			Ferrograma	Sup. de fractura
1	AC-100%GL-3000-N01	100% Glicerina	NO	NO
2	AC-75%GL-3000-N01	75% Glicerina	NO	SI
3	AC-50%GL-3000-N01	50% Glicerina	NO	SI
4	AC-100%AG-3000-N01	100% Agua	NO	NO

Tabla 9.12: Partículas esféricas detectadas en ensayos realizados sobre CAMPLO 2005 T3.

Ensayo	Denominación ensayo	Lubricante	Detección de partículas esféricas	
			Ferrograma	Sup. de fractura
A	AL-100%GL-1000-N01	100% Glicerina	-	-
B	AL-100%GL-1000-N01	100% Glicerina	-	-
1,2,3	AL-100%GL-1000-N01/02/03	100% Glicerina	NO	NO
4,5,6	AL-75%GL-1000-N01/02/03	75% Glicerina	SI	SI
7,8,9	AL-50%GL-1000-N01/02/03	50% Glicerina	SI	SI
10,11	AL-100%AG-1000-N01/02	100% Agua	SI	SI



En los ensayos realizados sobre probetas de aleación de base aluminio con 100%GL (Glicerina pura) como lubricante, no se han observado partículas esféricas (en los ferrogramas). Tampoco se han detectado partículas esféricas sobre las superficies de fisura para el mismo lubricante. Sin embargo, como se evidencia en las Figuras 9.76, 9.80 y 9.82 una gran cantidad de partículas esféricas de aproximadamente 2  $\mu\text{m}$  han sido observadas para 75%GL, 50%GL y 100%AG. Asimismo, se ha detectado gran cantidad de partículas esféricas sobre las superficies de fractura con diferentes elementos en su composición, aunque mayoritariamente se detectó principalmente Pb (ver Fig. 9.78) y una esporádica aparición de partículas con Fe-O (ver Fig. 9.79). Si bien no se pudo determinar el origen de estas partículas, se especula que cierto contexto favorece la generación de partículas esféricas en el interior de las fisuras, ó la posible generación superficial, y penetración posterior. Estas observaciones son coincidentes con lo reportado por otros autores. D. Scott et al. [27] y C. Christensen [28] han encontrado partículas en el interior de las fisuras en ensayos de rodadura de contacto. Asimismo, Y. Loy et al. [29] ha reportado la presencia de partículas esféricas en proceso de generación en el interior de fisuras. Los estudios se realizaron sobre rodamientos de bolas comerciales. Si bien no se observaron partículas esféricas en los ferrogramas pertenecientes a los ensayos sobre acero AISI-SAE 4140 para los cuatro lubricantes ensayados, se encontraron partículas de aproximadamente 4  $\mu\text{m}$  sobre las superficies de fractura con forma cuasi-esférica en ensayos con 75%GL y 50%GL como lubricantes (ver Figuras 9.18 y 9.19).

## 9.10 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

A partir de los estudios de contacto tribológico lineal efectuados sobre acero AISI-SAE 4140 yCAMPLO 2005 T3 con fisuras abiertas y lubricados con distintas viscosidades, es posible concluir que:

-La metodología presentada permite realizar un análisis sistemático sobre el estudio de la penetración del lubricante en fisuras por rodadura a escala de laboratorio. La elección de los trazadores permite un efectivo reconocimiento mediante microanálisis de composición química puntual.

- En el rango de velocidad y presión de contacto e independientemente de la viscosidad del fluido, éste penetra dentro de las fisuras abiertas en probetas de aleación de base aluminio. En cambio, en probetas de acero no se observa la penetración para la totalidad de los ensayos.

- En el material acero se forman partículas esféricas sobre superficies de fisura de elementos Fe-O en composición. Asimismo, también en el material de base aluminio se forman un gran número de partículas esféricas con plomo, y otras de Fe-O, pero únicamente para los lubricantes de menor viscosidad en la aleación de base aluminio. En todos los casos las partículas esféricas de Fe-O provienen de las superficies de rodadura.

## 9.11 REFERENCIAS

- [1] Hertz, H. (1986). *Miscellaneous Papers on the Contact of Elastic Solids*. Translation by Jones, De McMillan.
- [2] Blau, P. J. (1992). *ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. vol. 18. USA: ASM International Handbook Committee.
- [3] Handbook, M. (1987). vol. 12: *Fractography*. ASM International Metals Park, Ohio, USA.
- [4] Loy, B., & McCallum, R. (1973). Mode of formation of spherical particles in rolling contact fatigue. *Wear*, 24(2), 219-228.
- [5] Scott, D., & Mills, G. H. (1970). A scanning electron microscope study of fracture phenomena associated with rolling contact surface fatigue failure. *Wear*, 16(3), 234-237.
- [6] Perkin-Elmer INFRARED Bulletin 20, IRB-20, Perkin-Elmer, Norwalk, CT
- [7] *Friction, Lubrication, and Wear Technology Fatigue and Fracture Properties of Stainless Steels*, ASM Metals Handbook, vol. 19 ASM International, Ohio (1996) pp. 1826–1827 ASM Metals Handbook Volume 18.
- [8] Way, S. (1935). Pitting due to rolling contact. *J. appl. Mech*, 2(2), 49-58.
- [9] Bower, A. F. (1988). The influence of crack face friction and trapped fluid on surface initiated rolling contact fatigue cracks. *Journal of Tribology*, 110(4), 704-711.
- [10] Murakami, Y., Sakae, C., & Ichimaru, K. (1994). Three-Dimensional Fracture Mechanics Analysis of Pit formation Mechanism Under Lubricated Rolling-Sliding Contact Loading. *Tribology transactions*, 37(3), 445-454.
- [11] Tyfour, W. R., Beynon, J. H., & Kapoor, A. (1996). Deterioration of rolling contact fatigue life of pearlitic rail steel due to dry-wet rolling-sliding line contact. *Wear*, 197(1), 255-265.
- [12] Clayton, P., & Su, X. (1996). Surface initiated fatigue of pearlitic and bainitic steels under water lubricated rolling/sliding contact. *Wear*, 200(1), 63-73.
- [13] Bogdański, S. (1997). Finite element modelling of surface fatigue crack in EHD contact. *Tribology Series*, 32, 325-336.
- [14] Kaneta M., Murakami Y. (1987), Effects of oil hydraulic pressure on surface crack growth in rolling/sliding contact, *Tribol. Int.* 20, 210–217.
- [15] Kaneta M., Yatsuzuka H., Murakami Y., (1985) Mechanism of crack growth in lubricated rolling/sliding contact, *ASLE Trans.* 28 407–414.
- [16] Kaneta M., Murakami Y., (1991) Propagation of semi-elliptical surface cracks in lubricated rolling/sliding elliptical contacts, *J. Tribol. ASME* 113, 270–275.
- [17] Kaneta M., Matsuda K., Murakami K., Nashikawa H., (1998) A possible mechanism for rail dark spot defects, *J. Tribol., Trans. ASME* 120 304–309.
- [18] Cannon D.F., Pradier H., (1996) Rail rolling contact fatigue research by the European Rail Research Institute, *Wear* 191 1–13.

- [19] Bogdański, S., Stupnicki, J., Brown, M. W., & Cannon, D. F. (1999). A two dimensional analysis of mixed-mode rolling contact fatigue crack growth in rails. *European Structural Integrity Society*, 25, 235-248.
- [20] Bogdański S., Brown W., (2002) Modelling the three dimensional behaviour of shallow rolling contact fatigue cracks in rails, *Wear* 253 (1/2) 17–25.
- [21] Bogdański S., (1997) The behaviour of surface breaking contact fatigue crack in EHL conditions, in: *Proceedings of the Fifth Conference on Bi/Multi axial Fatigue and Fracture*, vol. II, Cracow, September 8, , pp. 9–28.
- [22] Bogdański S., (2002) A rolling contact fatigue crack driven by squeeze fluid film, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 25 1061–1071.
- [23] Bogdański, S. (2005). Liquid–solid interaction at opening in rolling contact fatigue cracks. *Wear*, 258(7), 1273-1279.
- [24] Bogdański, S., Lewicki, P., and Szymaniak, M. (2005). Experimental and theoretical investigation of the phenomenon of filling the RCF crack with liquid. *Wear*, 258(7), 1280-1287.
- [25] Fletcher, D. I., Hyde, P., and Kapoor, A. (2007). Investigating fluid penetration of rolling contact fatigue cracks in rails using a newly developed full-scale test facility. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(1), 35-44.
- [26] Bogdański, S. (2014). Quasi-static and dynamic liquid solid interaction in 3D squat-type cracks. *Wear*, 314(1), 20-27.
- [27] Scott, D., and Mills, G. H. (1970). A scanning electron microscope study of fracture phenomena associated with rolling contact surface fatigue failure. *Wear*, 16(3), 234-237.
- [28] Christensen, C. (1979). On the origin of spherical particles found on fatigue fracture surfaces and ferrograms. *Wear*, 53(1), 189-193.
- [29] Loy, B., and McCallum, R. (1973). Mode of formation of spherical particles in rolling contact fatigue. *Wear*, 24(2), 219-228.

# Capítulo 10

## *Conclusiones*

---

### 10.1 CONTACTO PUNTUAL

A partir de los resultados obtenidos en el estudio de caracterización de partículas esféricas durante el proceso tribológico desarrollado bajo condiciones de movimiento de rodadura con lubricación, es posible concluir que:

- En todas las etapas, aunque en diferentes cantidades, se generan partículas esféricas de diámetro menor a 12  $\mu\text{m}$  formadas por hierro-oxígeno. Las mismas se forman por un proceso de aglomeración, redondeo y pulido de partículas de óxido desprendidas en las superficies de los caminos de rodadura.

- Cuando se produce la degradación de la superficie por la fatiga de contacto por rodadura, también se desarrollan partículas esféricas menores a 12  $\mu\text{m}$  formadas por hierro, cromo y oxígeno.

- La aparición de fisuras en los caminos de rodadura producto de la rodadura de contacto es seguido por una aparición masiva de partículas esféricas de desgaste. Además existe un intervalo de tiempo, de incubación de las primeras fisuras y la aparición masiva de partículas esféricas.

- Las conclusiones alcanzadas en esta etapa del estudio representan un aporte al conocimiento tecnológico al mantenimiento predictivo basado en el análisis de partículas de desgaste. Esta metodología es vital en la determinación de estado de componentes en máquinas industriales complejas (que suelen costar millones de dólares). A partir de este nuevo conocimiento es posible establecer que la identificación de partículas esféricas de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro con hierro, oxígeno y cromo en un análisis ferrográfico implica

inevitablemente el desarrollo de daño por fatiga de contacto por rodadura en algún rodamiento. A partir de este conocimiento se facilita la toma de decisiones respecto de acciones que prevengan la falla prematura severa.

## 10.2 CONTACTO LINEAL

A partir de los estudios efectuados respecto de la penetración de líquido en fisuras abiertas y generación de partículas de desgaste esféricas desarrollados bajo condiciones de contacto de rodadura con lubricación, es posible concluir que:

- En probetas de aleación de base aluminio se muestra que para el rango de velocidad y presión de contacto aplicado, la penetración de fluido lubricante en las fisuras no depende de la viscosidad (en el rango entre  $7.99 \times 10^{-4}$  y  $5.9 \times 10^{-1}$  Pa.s) y el mecanismo promueve un significativo número de partículas de desgaste esféricas en el interior de las fisuras.

- En el acero se forman partículas esféricas sobre superficies de fisura de elementos Fe-O en composición. Asimismo, también en el material de base aluminio se forman un gran número de partículas esféricas con plomo, y otras de Fe-O, pero únicamente para los lubricantes de menor viscosidad en la aleación de base aluminio. En todos los casos las partículas esféricas de Fe-O provienen de las superficies de rodadura.

- La metodología desarrollada permite la realización a nivel de laboratorio de estudios sistemáticos sobre la penetración del lubricante y la generación de partículas esféricas generadas en contacto por rodadura. La metodología consiste en la modificación de probetas utilizadas en mecánica de fractura, y la utilización de trazadores en los lubricantes para su posterior reconocimiento. Asimismo los resultados alcanzados permiten concluir que esta nueva metodología propuesta para el análisis de penetración de líquido en diferentes condiciones de ensayo, permitirá identificar experimentalmente el comportamiento de las fisuras por FRC y su influencia de la penetración del líquido para diferentes materiales y condiciones.

# Capítulo 11

## Trabajos futuros

---

De esta tesis doctoral se desprenden diferentes trabajos futuros:

- Analizar el crecimiento de la fisura junto con la penetración del fluido en ensayos de FCR.
- Estudiar la cinemática de la fisura mediante modelos matemáticos para las geometrías ensayadas experimentalmente.

*La desventaja del método de pre-fisurado propuesto en el Capítulo 05 para las probetas de FCR radica en la imposibilidad de realizar fisuras de igual tamaño para su análisis comparativo, por lo cual, el mismo requiere gran cantidad de ensayos experimentales para un análisis completo de las diferentes variables.*

- Cuantificar y comparar el volumen entrampado dentro de la fisura para diferentes condiciones.

*La metodología propuesta en esta tesis no permite determinar el volumen ingresado de fluido en el interior de la fisura, para correlacionarlo con los modelos existentes. Esto podría mejorarse mediante una caracterización por EDS con parámetros invariables (zonas de análisis determinadas, tiempos establecidos, tamaño de ventana, energía aplicada, etc.) que permitiría realizar una comparación entre la cuantificación de los trazadores para diferentes ensayos. Estos valores serían directamente proporcionales al volumen entrampado en la fisura.*