



Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Estudio comparativo de aceros inoxidables y aceros de rodamientos en presencia de nuevos tipos de lubricantes sintéticos

Titulación: Ingeniería Industrial
Alumno/a: Alejandro Martínez Muñoz
Directoras: Dra. D^a. María Dolores Bermúdez Olivares
D^a. Tulia Espinosa Rodríguez

Cartagena, 2 de Octubre de 2013

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis directoras de proyecto, la doctora D^a. M^a Dolores Bermúdez Olivares y a D^a. Tulia Espinosa Rodríguez, que me han dado la oportunidad de aprender de ellas y que sin su ayuda y dedicación, no hubiese podido realizar este proyecto.

En segundo lugar, al departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena, en especial al Grupo de Investigación de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica por permitirme utilizar sus instalaciones y por toda la ayuda y amabilidad que me han mostrado a lo largo de este tiempo.

Además, quiero dar las gracias por todo el cariño que me han dado a lo largo de toda mi carrera a las personas más especiales de mi vida:

- A Laura, que ha estado a mi lado en todo momento y la quiero con locura. Sin ella no habría sido capaz de terminar. GRACIAS.
- A mis padres, Diego y Pepita, porque han sufrido todos y cada uno de mis exámenes y me han apoyado siempre.
- A mis hermanos y hermana, que me motivabais para que siguiera adelante.
- Y Como olvidarme de mis “ *penkys* ”, mis 4 sobrinas. Jugar con ellas me ha ayudado a desconectar de los estudios que a veces se agradece.

Y mucha más gente, amigos, compañeros de clase, departamento, etc. gracias por todo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	24
ÍNDICE DE FIGURAS	28
ÍNDICE DE TABLAS.....	31
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	32
I. MEMORIA.....	19
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	19
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	19
1.3. TRIBOLOGÍA.....	20
1.3.1. Definición.....	20
1.3.2. Historia de la tribología	21
1.3.3. Situación actual de la tribología	26
1.3.4. Fricción.....	27
1.3.4.1. Fricción estática.....	30
1.3.4.2. Fricción cinética	31
1.3.4.3. Situación actual de la fricción	34
1.3.5. Lubricación.....	35
1.3.5.1. Regímenes de lubricación	36
1.3.5.2. Tipos de lubricantes	41
1.3.5.3. Aditivos en lubricantes.....	44
1.3.5.4. Propiedades de los lubricantes	45
1.3.5.5. Situación actual y futura.....	54
1.3.6. Desgaste.....	55
1.3.6.1. Tasa de desgaste	56

ESTUDIO COMPARATIVO DE ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DE RODAMIENTOS EN
PRESENCIA DE NUEVOS TIPOS DE LUBRICANTES SINTÉTICOS

ÍNDICE GENERAL

1.3.6.2.	Tipos de desgaste	56
1.3.6.3.	Tipos de partículas de desgaste	72
1.3.6.4.	Situación actual del desgaste.....	74
1.3.6.5.	Relación entre fricción y desgaste.....	75
1.4.	LÍQUIDOS IÓNICOS	75
1.4.1.	Definición	75
1.4.2.	Composición de los LIs	76
1.4.3.	Propiedades de los LIs	79
1.4.4.	Historia de los LIs	82
1.4.5.	Utilidades de los LIs	84
1.4.6.	Uso de LIs como lubricantes	86
1.4.7.	Uso de LIs con aceros.....	89
2.	MATERIALES, MÁQUINAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES ...	93
2.1.	MATERIALES UTILIZADOS	93
2.1.1.	Acero AISI 52100.....	93
2.1.1.1.	Condiciones iniciales.....	93
2.1.1.2.	Condiciones finales	94
2.1.2.	Acero AISI 316L	95
2.1.3.	Zafiro	96
2.1.3.1.	Composición química	96
2.1.3.2.	Propiedades	96
2.2.	LUBRICANTES.....	97
2.2.1.	Líquido iónico EM-638	97
2.2.2.	Líquido iónico EM-642	99
2.3.	MÁQUINAS UTILIZADAS	100
2.3.1.	Pulidora metalográfica.....	100

2.3.2.	Tribómetro	101
2.3.3.	Rugosímetro	102
2.3.4.	Microscopio óptico	103
2.3.5.	Microscopio electrónico de barrido (SEM)	103
2.3.6.	Microperfilómetro	104
2.3.7.	Reómetro	106
2.3.8.	Instrumento de medida del ángulo de contacto (DSA).....	107
2.4.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL SEGUIDO	110
2.4.1.	Preparación de las probetas	111
2.4.2.	Medida de la rugosidad.....	111
2.4.3.	Condiciones de los ensayos	112
2.4.4.	Determinación de la fricción y el desgaste	112
3.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	117
3.1.	ENSAYO AISI 52100 / EM-638.....	117
3.1.1.	Coeficiente de fricción.....	117
3.1.2.	Desgaste.....	118
3.1.3.	Mecanismos de desgaste.....	118
3.2.	ENSAYO AISI 52100 / EM-642.....	123
3.2.1.	Coeficiente de fricción.....	123
3.2.2.	Desgaste.....	124
3.2.3.	Mecanismos de desgaste.....	124
3.3.	ENSAYO AISI 316L / EM-638	129
3.3.1.	Coeficiente de fricción.....	129
3.3.2.	Desgaste.....	130
3.3.3.	Mecanismos de desgaste.....	130
3.4.	ENSAYO AISI 316L / EM-642	135

**ESTUDIO COMPARATIVO DE ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DE RODAMIENTOS EN
PRESENCIA DE NUEVOS TIPOS DE LUBRICANTES SINTÉTICOS**

ÍNDICE GENERAL

3.4.1.	Coeficiente de fricción.....	135
3.4.2.	Desgaste.....	136
3.4.3.	Mecanismos de desgaste.....	136
3.5.	RESUMEN DE LOS RESULTADOS	141
3.5.1.	Resultados globales de fricción	141
3.5.2.	Resultados globales de desgaste	143
4.	CONCLUSIONES.....	149
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	153
II.	ANEXOS.....	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Articulación de la rodilla.....	21
Figura 2. Rodamientos de bolas de Da Vinci.	23
Figura 3. Rugosidad de una superficie.	28
Figura 4. Elementos que componen un tribosistema.....	29
Figura 5. Representación del coeficiente de fricción estático y cinético.....	30
Figura 6. Creación de la fuerza de fricción F_s	31
Figura 7. Creación de la fuerza de fricción máxima.....	31
Figura 8. Creación de la fuerza de fricción cinética	32
Figura 9. Área real de contacto entre dos cuerpos.....	33
Figura 10. Movimiento relativo de dos cuerpos en presencia de un lubricante.	36
Figura 11. Curva de Stribeck.....	37
Figura 12. Coeficiente de fricción en función del régimen de lubricación.	40
Figura 13. Representación de los coeficientes de fricción y desgaste en función de λ .	41
Figura 14. Diagrama de transición IRG para un acero.....	41
Figura 15. Comparación de lubricantes sintéticos y minerales.	43
Figura 16. Movimiento relativo de dos placas planas en presencia de un lubricante.....	46
Figura 17. Obtención del IV de un lubricante.	47
Figura 18. Rigidez dieléctrica de un lubricante en función de las impurezas.	53
Figura 19. Proceso de desgaste por adhesión.	57
Figura 20. Puntos de contacto entre dos superficies.....	57
Figura 21. Procesos industriales que sufren desgaste por adhesión.	58
Figura 22. Proceso de desgaste por abrasión.....	60
Figura 23. Desgaste abrasivo a dos cuerpos y Desgaste abrasivo a tres cuerpos.	60
Figura 24. Variación del desgaste específico con el tamaño de las partículas (μm).	61
Figura 25. Zonas de desgaste abrasivo.	61
Figura 26. Tipos de desgaste según su importancia.	62
Figura 27. Transición de microsurcado a microcorte en una superficie.....	63
Figura 28. Relación entre tenacidad a la fractura y resistencia al desgaste abrasivo en diferentes materiales.	64
Figura 29. Desgaste erosivo debido a la acción de un fluido con partículas abrasivas en suspensión.....	65
Figura 30. Formas de actuación de partículas erosivas.	66
Figura 31. Procesos industriales que sufren desgaste por fatiga.	67
Figura 32. Engranajes y rodamientos sometidos a fatiga de contacto.....	68
Figura 33. Elemento sometido a desgaste fretting.....	69
Figura 34. Detalle de desgaste corrosivo.....	70
Figura 35. Desgaste por cavitación.....	71
Figura 36. Partículas de desgaste con morfología plana de Cu-Be.	72
Figura 37. Partículas de desgaste con morfología de cinta de Acero AISI 304.	73
Figura 38. Partículas de desgaste con morfología esférica.....	73
Figura 39. Partículas de desgaste con morfología irregular de acero austenítico.....	73
Figura 40. Tipos de cationes en los líquidos iónicos.....	77
Figura 41. Tipos de aniones en los líquidos iónicos apróticos.	77
Figura 42. Ejemplos de líquidos iónicos apróticos, BMIM [Cl] izq. y OMIM [Cl] der.	77

ESTUDIO COMPARATIVO DE ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DE RODAMIENTOS EN
PRESENCIA DE NUEVOS TIPOS DE LUBRICANTES SINTÉTICOS

ÍNDICE GENERAL

Figura 43. Síntesis de un líquido iónico prótico (Formiato de monoetanolamina, MEA-FOR).....	78
Figura 44. Estructura de la molécula (C14-mim)(PF6).....	78
Figura 45. Número de publicaciones anuales sobre líquidos iónicos.....	83
Figura 46. Microestructura del acero AISI 52100 recocido inicial.....	93
Figura 47. Microestructura del acero AISI 52100 final.....	94
Figura 48. Microestructura del acero AISI 316L.....	96
Figura 49. Estructura química del líquido iónico EM-638.....	97
Figura 50. Evolución de la viscosidad del líquido iónico EM-638.....	98
Figura 51. Ángulo de contacto en EM-638 /AISI 316L inicial (izq.) y final (der.).....	98
Figura 52. Ángulo de contacto en EM-638 /AISI 52100 inicial (izq.) y final (der.).....	99
Figura 53. Estructura química del líquido iónico EM-642.....	99
Figura 54. Evolución de la viscosidad del líquido iónico EM-642.....	99
Figura 55. Ángulo de contacto en EM-642 /AISI 316L inicial (izq.) y final (der.).....	100
Figura 56. Ángulo de contacto en EM-642 /AISI 52100 inicial (izq.) y final (der.).....	100
Figura 57. Pulidora metalográfica Phoenix Beta.....	100
Figura 58. Tribómetro ISC-200.....	101
Figura 59. Esquema de funcionamiento del tribómetro (alzado y planta).....	101
Figura 60. Rugosidad Ra.....	102
Figura 61. Rugosímetro SM-7.....	103
Figura 62. Microscopio óptico Leica DMR.....	103
Figura 63. Microscopio electrónico de barrido (SEM) Hitachi S-3500N.....	104
Figura 64. Microperfilómetro focal de no contacto.....	105
Figura 65. Reómetro AR-G2 de TA Instruments.....	106
Figura 66. Gota de líquido en equilibrio sobre una superficie horizontal y ángulo de contacto producido.....	108
Figura 67. Alteración del ángulo de contacto estático en función del tiempo.....	109
Figura 68. Instrumento de medida del ángulo de contacto DSA30B.....	109
Figura 69. Procedimiento experimental.....	110
Figura 70. Dimensiones de las probetas.....	111
Figura 71. Ejemplo de ensayo.....	112
Figura 72. Evolución del coeficiente de fricción medio en el ensayo AISI 52100 / EM-638.....	117
Figura 73. Imagen de la huella a 20x para AISI 52100 / EM-638.....	118
Figura 74. Imagen de la huella a 50x en el punzón en el ensayo AISI 52100 / EM-638.....	119
Figura 75. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638 (200x).....	119
Figura 76. Perfil topográfico de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638.....	120
Figura 77. Espectro EDS del interior de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638.....	121
Figura 78. Espectro EDS del exterior de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638.....	121
Figura 79. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638.....	122
Figura 80. Evolución del coeficiente de fricción medio en el ensayo AISI 52100 / EM-642.....	123
Figura 81. Imagen de la huella a 20x para AISI 52100 / EM-642.....	124
Figura 82. Imagen de la huella en el punzón en el ensayo AISI 52100 / EM-638 (50x).....	125

Figura 83. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642.(200x)	125
Figura 84. Perfil topográfico de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642.	126
Figura 85. Espectro EDS del interior de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642.	126
Figura 86. Espectro EDS del exterior de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642.	127
Figura 87. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638.....	128
Figura 88. Evolución del coeficiente de fricción medio en el ensayo AISI 316L / EM-638.	129
Figura 89. Imagen de la huella a 20x para AISI 316L / EM-638.	130
Figura 90. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638... ..	131
Figura 91. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.	131
Figura 92. Perfil topográfico de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.....	132
Figura 93. Espectro EDS del interior de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.	132
Figura 94. Espectro EDS del exterior de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.	133
Figura 95. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638.....	134
Figura 96. Evolución del coeficiente de fricción medio en el ensayo AISI 316L / EM-642.	135
Figura 96. Imagen de la huella a 20x para AISI 316L / EM-642.	136
Figura 97. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638... ..	137
Figura 98. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642.	137
Figura 99. Perfil topográfico de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642.....	138
Figura 100. Espectro EDS del interior de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642.	138
Figura 101. Espectro EDS del exterior de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642.	139
Figura 102. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638.....	140
Figura 103. Comparación de la evolución del coeficiente de fricción medio en todos los ensayos.	141
Figura 104. Comparación del coeficiente de fricción en todos los ensayos.....	142
Figura 105. Comparación del volumen de desgaste en todos los ensayos.	143
Figura 106. Comparación de la huella producida en los ensayos.....	144
Figura 107. Comparación de los perfiles tridimensionales producidos en los ensayos.	145
Figura 108. Comparación de los perfiles producidos en los ensayos.....	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de fricción típicos para una pareja de materiales.....	33
Tabla 2. Algunos tipos de líquidos iónicos próticos.....	78
Tabla 3. Aplicaciones de los líquidos iónicos en las distintas ramas industriales.....	85
Tabla 4. Propiedades del acero AISI 52100.	94
Tabla 5. Composición química del acero (en %) AISI 52100.....	94
Tabla 6. Propiedades del acero AISI 316L.....	95
Tabla 7. Composición química del acero AISI 316L (en %).	95
Tabla 8. Composición química de la bola de zafiro.	96
Tabla 9. Propiedades de la bola de zafiro.	96
Tabla 10. Viscosidad dinámica del líquido iónico EM-638.....	98
Tabla 11. Ángulo de contacto para el líquido iónico EM-638.	98
Tabla 12. Viscosidad dinámica del líquido iónico EM-642.....	99
Tabla 13. Ángulo de contacto para el líquido iónico EM-642.	100
Tabla 14. Rugosidades de las muestras.	111
Tabla 15. Parámetros de los ensayos.	112
Tabla 16. Condiciones medias en el ensayo AISI 52100/ EM-638.....	117
Tabla 17. Coeficiente de fricción promedio en el ensayo AISI 52100 / EM-638.....	117
Tabla 18. Volumen y tasa de desgaste medio en el ensayo AISI 52100 / EM-638.....	118
Tabla 19. Análisis elemental dentro y fuera de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638.....	122
Tabla 20. Condiciones medias en el ensayo AISI 52100/ EM-642.....	123
Tabla 21. Coeficiente de fricción promedio en el ensayo AISI 52100 / EM-642.....	123
Tabla 22. Volumen y tasa de desgaste medio en el ensayo AISI 52100 / EM-642.....	124
Tabla 23. Análisis elemental dentro y fuera de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642.....	127
Tabla 24. Condiciones medias en el ensayo AISI 316L/ EM-638.....	129
Tabla 25. Coeficiente de fricción promedio en el ensayo AISI 316L / EM-638.....	129
Tabla 26. Volumen y tasa de desgaste medio en el ensayo AISI 316L / EM-638.....	130
Tabla 27. Análisis elemental dentro y fuera de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.....	133
Tabla 28. Condiciones medias en el ensayo AISI 316L/ EM-642.....	135
Tabla 29. Coeficiente de fricción promedio en el ensayo AISI 316L / EM-642.....	135
Tabla 30. Volumen y tasa de desgaste medio en el ensayo AISI 316L / EM-642.....	136
Tabla 31. Análisis elemental dentro y fuera de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.....	139
Tabla 32. Tabla Resumen de los ensayos de fricción.....	141
Tabla 33. Tabla Resumen de volumen y tasa de desgaste.....	143

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

<i>AFM</i>	<i>Microscopio de fuerza atómica</i>
<i>ASTM</i>	<i>Sociedad Americana para Pruebas y Materiales</i>
<i>AIL</i>	<i>Líquido iónico aprótico</i>
<i>Be</i>	<i>Berilio</i>
<i>BL</i>	<i>Lubricación límite</i>
<i>C</i>	<i>Carbono</i>
<i>Cr</i>	<i>Cromo</i>
<i>Cu</i>	<i>Cobre</i>
<i>DSA</i>	<i>Medida del ángulo de contacto</i>
<i>EDS</i>	<i>Análisis de energías dispersivas</i>
<i>EHL</i>	<i>Lubricación elastohidrodinámica</i>
<i>EM – 638</i>	<i>Líquido iónico</i>
<i>EM – 642</i>	<i>Líquido iónico</i>
<i>Fe</i>	<i>Hierro</i>
F_f	<i>Fuerza de fricción</i>
F_k	<i>Fuerza de rozamiento cinética</i>
F_n, N	<i>Fuerza normal</i>
F_s	<i>Fuerza de rozamiento estática</i>
<i>g</i>	<i>Gravedad</i>
<i>HDL</i>	<i>Lubricación hidrodinámica</i>
<i>Ha</i>	<i>Dureza del abrasivo</i>
<i>Hm</i>	<i>Dureza del metal</i>
<i>IFP</i>	<i>Instituto francés del petróleo</i>
<i>IV</i>	<i>Índice de viscosidad</i>
<i>k</i>	<i>Coefficiente o tasa de desgaste</i>
<i>LI</i>	<i>Líquido iónico</i>
<i>Ni</i>	<i>Níquel</i>
<i>NN</i>	<i>Número de neutralización</i>

ESTUDIO COMPARATIVO DE ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DE RODAMIENTOS EN
PRESENCIA DE NUEVOS TIPOS DE LUBRICANTES SINTÉTICOS

Abreviaturas y símbolos

m	<i>Masa</i>
Mn	<i>Manganeso</i>
Mo	<i>Molibdeno</i>
P	<i>Fósforo</i>
p	<i>Presión</i>
PAO	<i>Polialfaolefina</i>
$PFPE$	<i>Perfluoropoliéter</i>
PIL	<i>Líquido iónico prótico</i>
PPE	<i>Polifenil éter</i>
R	<i>Radio de giro del punzón</i>
r	<i>Radio de la bola de zafiro</i>
R_a	<i>Rugosidad media</i>
$\overline{R_a}$	<i>Rugosidad media promediada de los ensayos</i>
R_t	<i>Rugosidad máxima</i>
$\overline{R_t}$	<i>Rugosidad máxima promediada de los ensayos</i>
S	<i>Azufre</i>
SEM	<i>Microscopio electrónico de barrido</i>
STM	<i>Microscopio de efecto túnel</i>
Si	<i>Silicio</i>
t	<i>Tiempo</i>
TAN	<i>Número de ácido total</i>
TFL	<i>Lubricación mixta</i>
TGA	<i>Análisis termogravimétrico</i>
u	<i>Velocidad de deslizamiento</i>
W	<i>Peso</i>
x	<i>Distancia longitudinal al movimiento</i>
y	<i>Distancia transversal al movimiento</i>
ΔS	<i>Distancia recorrida en el ensayo</i>
γ_{LG}	<i>Tensión entre superficies líquido/gas</i>
γ_{SG}	<i>Tensión entre superficies sólido/gas</i>
γ_{SL}	<i>Tensión entre superficies sólido/líquido</i>
Θ	<i>Ángulo de contacto</i>

η	<i>Viscosidad dinámica</i>
λ	<i>Parámetro de régimen de lubricación</i>
μ	<i>Coefficiente de fricción</i>
μ_k	<i>Coefficiente de fricción cinético</i>
μ_s	<i>Coefficiente de fricción estático</i>
ν	<i>Viscosidad cinemática</i>
ρ	<i>Densidad</i>
σ	<i>Conductividad eléctrica</i>
τ	<i>Esfuerzo cortante</i>
ω	<i>Velocidad angular</i>

CAPITULO 1.
INTRODUCCIÓN

I. MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es el de estudiar el comportamiento tribológico que se produce en dos aceros, *AISI 52100* y *AISI 316L*, al aplicarles como lubricantes dos líquidos iónicos, *EM-638* y *EM-642*.

Con esto se pretende:

- Estudiar la capacidad de los líquidos iónicos anteriores para reducir la fricción y el desgaste en contacto zafiro-acero.
- Analizar la evolución de los coeficientes de fricción y el desgaste del ensayo.
- Observar y determinar los mecanismos de desgaste que tienen lugar en la interfase de las superficies.
- Establecer una comparación cualitativa y cuantitativa entre los lubricantes y los aceros estudiados.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Para cada acero y lubricante se ha determinado la rugosidad y se ha realizado el ensayo tribológico mediante la técnica de bola sobre disco. Esta técnica consiste en deslizar una bola de zafiro sobre la probeta, que gira a una velocidad dada durante una distancia determinada. Se ha seleccionado una velocidad de 0,1 m/s, una carga aplicada de 0,98 N y una distancia recorrida de 500 m.

Posteriormente se analizarán los resultados de fricción y desgaste obtenido, se observarán las huellas obtenidas tanto en la probeta como en la bola de zafiro y finalmente se comparan los resultados obtenidos.

Así pues, para comenzar, se realizará una explicación de los conocimientos que hay que tener en cuenta en el proyecto, tales como conceptos tribológicos – fricción, desgaste y lubricación- y de líquidos iónicos.

1.3. TRIBOLOGÍA

1.3.1. Definición

Según la Real Academia Española de la Lengua, *la tribología es la “técnica que estudia el rozamiento entre los cuerpos sólidos, con el fin de producir mejor deslizamiento y menor desgaste de ellos”*.

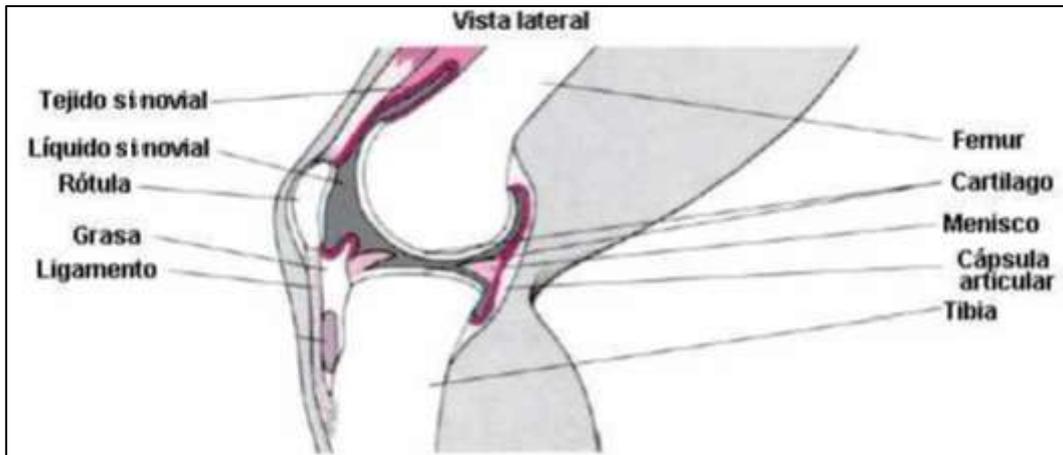
La palabra tribología proviene de la expresión griega “τριβος” (*tribos*) que significa frotamiento o rozamiento, y es la ciencia y tecnología de los fenómenos que tienen lugar en la interfase de contacto entre dos sistemas en movimiento relativo, teniendo por objeto el estudio de campos tales como el diseño, la lubricación, la fricción y el desgaste.

La tribología se considera una ciencia interdisciplinaria ya que abarca muchas áreas de conocimiento tales como la física, química, mecánica, matemáticas, materiales, termodinámica, transmisión de calor, mecánica de fluidos, mantenimiento, economía, etc. Así pues, para comprender bien este término de tribología, es esencial conocer todos estos conceptos.

En general, todo cuerpo en movimiento forma parte de un sistema tribológico en el que pueden intervenir dos o más sólidos, sólidos y líquidos, así como también líquidos y gases.

La tribología no sólo es aplicable a temas de ingeniería, sino que existe en muchos aspectos de nuestra vida diaria, sin que lo apreciemos, como es el caso de las articulaciones de nuestro cuerpo, donde, por ejemplo, en la figura siguiente, el líquido sinovial es el encargado de que no se toquen los huesos, actuando pues como lubricante y evitando el desgaste de los huesos y por consiguiente, el dolor de la persona.

Figura 1. Articulación de la rodilla.



Aunque no empezó a usar el término de tribología hasta mediados los años 60, hasta la aparición del informe Jost en Gran Bretaña, el concepto se utilizaba desde la antigüedad.

1.3.2. Historia de la tribología

El uso de conocimientos tribológicos viene de la prehistoria, con el uso de “brocas” durante el Paleolítico para perforar agujeros o para producir fuego, además de utensilios domésticos.

Algunos autores toman como primer hito en esta materia el invento de la rueda, situado en torno al 5000 A.C. en la antigua Mesopotamia. En ese momento de la historia, el ser humano comprendió que hacer rodar a un móvil requería menos esfuerzo que hacerlo deslizar. Este hallazgo fue siendo utilizado más a menudo por todas las civilizaciones posteriores e introducido en importantes aplicaciones.

En la construcción de las pirámides egipcias, en torno al 3500 A.C., ya se usó para reducir el coeficiente de rozamiento en el transporte de las piedras utilizadas. El sistema empleado consistía en colocar una serie de troncos entre en suelo y el patín que sostenía los elementos a transportar. Así pues, los egipcios poseían conocimientos sobre fricción y lubricantes, utilizando como tales el agua, aceite vegetal o grasas animales.

Posteriormente en China, se crearon los primeros cojinetes lubricados, inicialmente de porcelana y después empleando el bronce, con lo que la creación de nuevos mecanismos y elementos para evitar el desgaste iba en aumento.

En la Grecia clásica y el periodo Romano se desarrollaron numerosos dispositivos mecánicos, algunos de los cuales hacían uso de la fuerza del agua, prestando atención al diseño de cojinetes. También se usaban palancas, engranajes, poleas y lubricantes para transportar grandes piedras sobre rodillos, así como en la construcción de grandes edificios empleando grúas y montacargas. Uno de los más inventos más conocidos que datan de esta época es el torno. Los estudios de esta época, tanto arquitectónicos como tribológicos, se le atribuyen en gran parte al arquitecto e ingeniero romano M. Vitruvius.

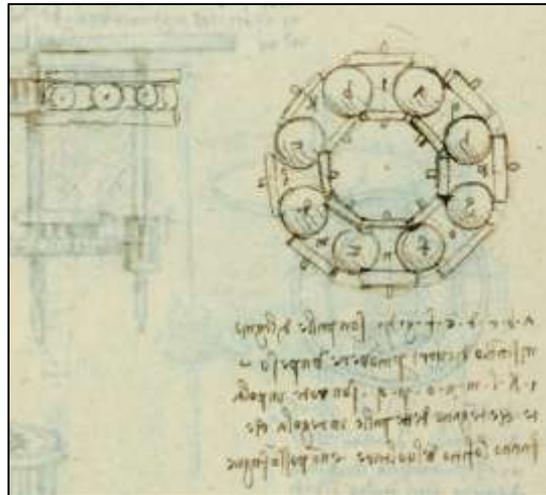
En la Edad Media, uno de los avances más interesantes fue el desarrollo del reloj mecánico, también se utilizaban ruedas hidráulicas y ejes de madera apoyados sobre cojinetes de piedra engrasados con grasa, sobre todo en los molinos de viento para moler el grano y elevar agua. A medida que pasaba el tiempo, se iban creando nuevos materiales y aleaciones, teniendo que recurrir a distintos lubricantes, rodamientos y cojinetes sobre las máquinas utilizadas.

Pero no fue hasta el Renacimiento, donde Leonardo da Vinci fue el primero que se acercó a la tribología desde un punto de vista, que introdujo el concepto de coeficiente de rozamiento y postuló las leyes fundamentales que gobiernan el movimiento de un bloque rectangular deslizándose sobre una superficie plana. Estas leyes son:

- *“Las áreas en contacto no tienen efecto en la fricción”.*
- *“Si la carga de un cuerpo es doblada, su fricción también será doblada”.*

Da Vinci también diseñó diversos tipos de rodamientos de bolas, rodamientos cónicos, etc. Por desgracia, sus escritos no fueron publicados hasta cientos de años después de los descubrimientos.

Figura 2. Rodamientos de bolas de Da Vinci.



*Códice Madrid I. Tipos de elementos mecánicos. Taladrador y rodamientos a bolas.
Leonardo Da Vinci, Biblioteca Nacional de España, BNE, MSS/8937*

Fue en 1699 que el físico francés Guillaume Amontons redescubrió las leyes de la fricción al estudiar el deslizamiento entre dos superficies planas. En dicho estudio enunció que la fricción era principalmente el resultado del trabajo realizado para elevar una superficie sobre la rugosidad de la otra. Las leyes de fricción establecidas por Amontons son solamente aplicables a fricción seca, y son las siguientes:

- (1) “La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal”.
- (2) “La fuerza de fricción es independiente del área de contacto”

En 1785, Charles-Augustin de Coulomb, estudió y comprobó las investigaciones de Amontons, desarrolló los conceptos de adhesión y deformación y añadió una tercera ley a las dos anteriores.

- (3) “La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento”

A pesar de que Isaac Newton (1668) planteara las leyes esenciales del flujo viscoso, sentando las bases de la lubricación, tuvieron que pasar 150 años desde la hipótesis de Newton de que la resistencia de un fluido depende del gradiente de velocidad hasta que el matemático Claude Navier introdujese finalmente el coeficiente de viscosidad en las ecuaciones de movimiento de fluidos.

Aun así, la comprensión por parte de los científicos de la importancia de estas operaciones de lubricación en la industria no llegó hasta finales del siglo XIX, tras la revolución industrial y el empleo masivo de la máquina de vapor, lo que propició el desarrollo de nuevas máquinas y la mejora de los procesos de fabricación. Hasta entonces, los lubricantes eran exclusivamente animales y vegetales y fue con el uso del petróleo cuando se empezaron a potenciar y mejorar las técnicas de lubricación, tanto en el transporte como en la industria.

Ante las nuevas condiciones de trabajo, con un aumento de las velocidades de giro de los ejes de las máquinas, la lubricación hidrodinámica se convirtió en el tipo habitual de lubricación, uno de los ejes principales de la tribología. Los primeros estudios en estas nuevas condiciones fueron llevados a cabo por Pauli (1849), Hirn (1854) y posteriormente Beauchamp Tower (1884).

No fue hasta la aparición de la teoría de lubricación por película fluida, de Osborne Reynolds (1886) y simultáneamente los descubrimientos de Nikolai Petroff (1883) donde supusieron una gran importancia en la lubricación.

Ya en el siglo XX, Sommerfeld (1904) y Michell (1929) fueron quienes desarrollaron la teoría matemática de la lubricación más a fondo y Hardy (1920) fue el primero en utilizar el concepto de *“lubricación límite”*. En 1949, Ertel y Grubin estudiaron el efecto de la deformación elástica de los sólidos en contacto en condiciones de trabajo a altas presiones, explicando la delgadez de las capas moleculares de menor magnitud que con la teoría clásica, fenómeno denominado *“lubricación elastohidrodinámica”*.

En 1950 F. Philip Bowden y David Tabor dieron una explicación física a las leyes de la fricción enunciadas siglos atrás por Amontons y Coulomb. Determinaron que el área de contacto real es una pequeña parte del área de contacto aparente debido a la rugosidad superficial de las superficies, y que el contacto real lo forman las asperezas. Un aumento de la carga normal hace que aumenten las asperezas en contacto. Esto supuso un cambio en las leyes de Amontons y Coulomb: la fricción sí que depende del área de contacto, pero del área real de contacto de asperezas, no de la aparente. Algunos

autores consideran los estudios de Bowden y Tabor como el pilar de la tribología moderna.

Otra de las áreas importantes de la tribología, el desgaste, se desarrolló principalmente en el siglo XX, con los primeros estudios científicos de Ragnar Holm (1946).

No fue hasta la década de los sesenta donde se produjo un fuerte aumento en los fallos mecánicos de instalaciones y maquinaria debido al aumento de las velocidades de trabajo y al continuo desgaste mecánico y las consecuencias que conllevaba, lo que produjo importantes pérdidas económicas. Esta situación llevó a que en octubre de 1964 se convocara la *Conferencia de Lubricación Hierro y Acero* en Cardiff, Gran Bretaña, organizada por la *Institución de Ingenieros Mecánicos* y el *Instituto del Hierro y el Acero*, donde se expuso la auténtica magnitud del problema. Fue entonces cuando el gobierno británico mandó a H.P. Jost la investigación sobre los distintos temas de lubricación y las necesidades industriales.

El 9 de marzo de 1966 el gobierno Británico publicó el informe, conocido como *Informe Jost*, en el que se publicó el nombre de la ciencia que englobaba la fricción, el desgaste y la lubricación, denominándose tribología como ya se ha expuesto. Este informe se centraba en los enormes beneficios que para el PIB de las naciones supondría la aplicación de los actuales conocimientos en tribología. Según afirmó Jost, Gran Bretaña podría ahorrar 515 millones de libras esterlinas anuales (en 1966) que ocurrían por ignorar los fenómenos de desgaste e interacción superficial entre los materiales y es que aproximadamente un tercio de los recursos energéticos existentes se pierden en forma de fricción. Por esto, la importancia de la reducción de esta fricción y el desgaste produce un ahorro económico y una mayor durabilidad de la maquinaria. En Estados Unidos llegarían a ahorrarse hasta 16.000 millones de dólares al año si se realizaran acciones en este aspecto. Una característica importante, es que este ahorro significativo puede obtenerse sin hacer una gran inversión de capital.

Además, el análisis del desgaste es importante porque junto con la fatiga y a la corrosión, se trata de los problemas que más fallos provocan en las máquinas. De ellos, el menos estudiado ha sido el desgaste ya que la predicción del desgaste es muy compleja porque no se trata de una propiedad intrínseca del material, sino que depende

de todo el sistema con el que interacciona el cuerpo que se desgasta e intervienen en él muchas variables.

1.3.3. Situación actual de la tribología

La tribología es la base para cada diseño de ingeniería de elementos de máquinas. Casi ningún elemento de una máquina es independiente de las consideraciones tribológicas.

Las solicitaciones de diseño no solamente deben ser menores que el esfuerzo máximo permisible y las deformaciones no deben exceder ningún valor máximo, sino que además, las consideraciones tribológicas, - lubricación, fricción y desgaste - , deben tenerse muy en cuenta para que los elementos de máquinas se diseñen con éxito.

Como es bien sabido, la mayoría de las consecuencias de la fricción y el desgaste se consideran negativas, tales como el mayor consumo de energía y la causa de degradación y de fallos mecánicos. Sin embargo existen beneficios fundamentales de la fricción y el desgaste, como es el caso de una rueda, donde si no existiera esta fricción, el movimiento sería imposible. Se considera que casi una tercera parte del consumo de energía global se pierde debido a la fricción (calentamiento).

A partir del informe Jost, se puso de manifiesto la necesidad de utilizar técnicas para combatir el desgaste de los elementos, con el objetivo principal de conseguir un ahorro económico, además de ahorro de materias primas y recursos energéticos, por lo que es una importante labor que se lleva a cabo en cualquier máquina y proceso, además de producir beneficios en el medioambiente, al ahorrar recursos naturales.

A día de hoy son muchas las aplicaciones en las que tiene cabida la tribología y prácticamente todas aquellas piezas en movimiento. Algunas de estas aplicaciones son: rodamientos, embragues, frenos, engranajes, árboles de levas y está presente formando parte de maquinaria, equipos y procesos industriales tales como: motores eléctricos y de combustión, turbinas, compresores, procesos de extrusión, fundición y forja, y también en procesos de corte, elementos de almacenamiento magnético, prótesis articulares, y muchas otras.

Bajo el punto de vista de la ingeniería, la tribología cobra cada vez más importancia debido a la creciente competitividad industrial mundial, al continuo aumento de las cargas impuestas a los componentes mecánicos, a la disminución constante de las tolerancias permitidas en los procesos de fabricación y a las crecientes restricciones en cuanto a la emisión de contaminantes.

Actualmente, en el campo de la tribología, la investigación está en continuo crecimiento, puesto que se pueden conocer mejor los fenómenos que ocurren en las superficies de contacto de los materiales gracias a los nuevos aparatos de medida como la microscopía electrónica.

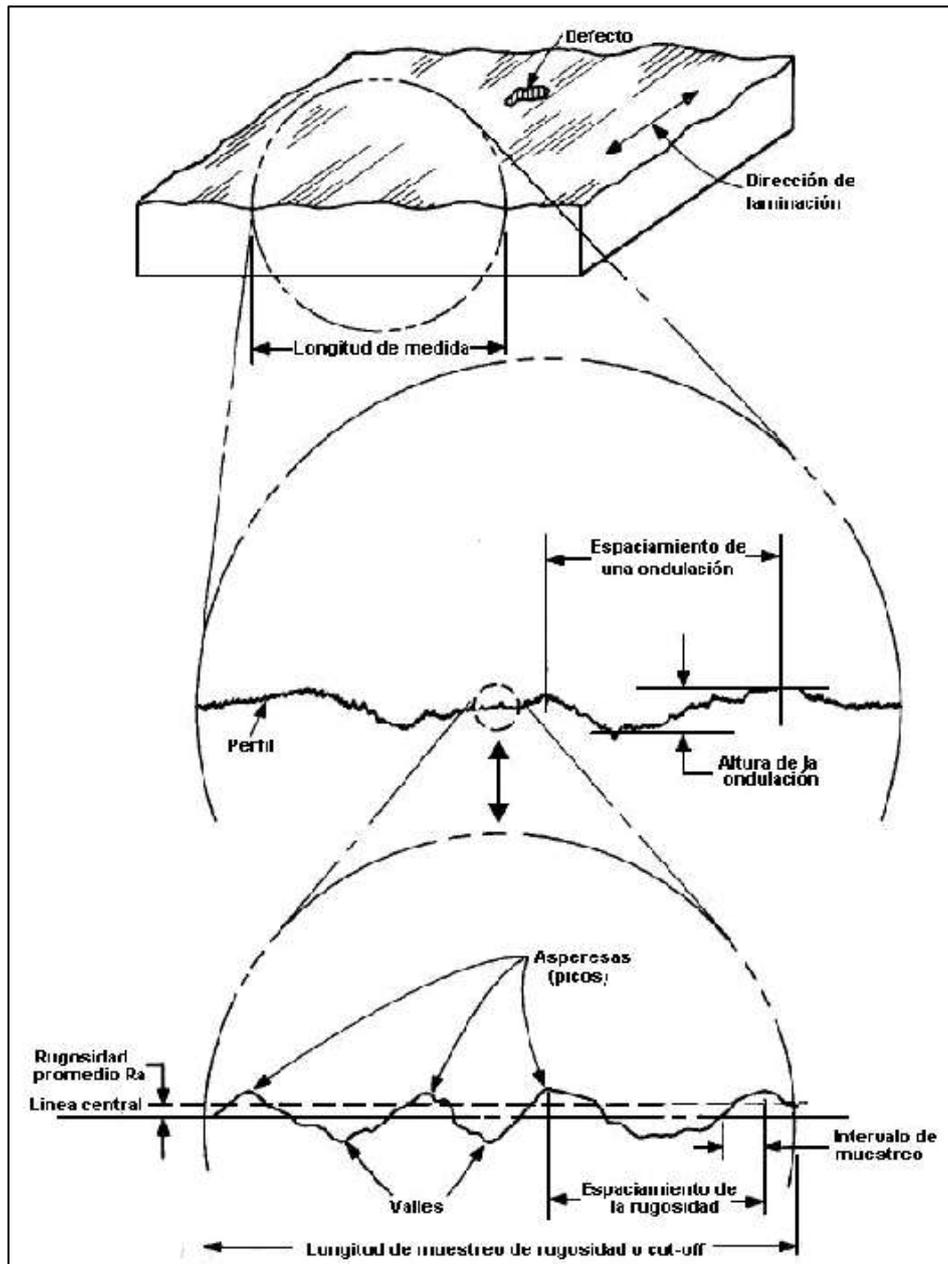
Además, cabe destacar el creciente interés en la triboquímica, ya que continuamente se van creando nuevos lubricantes, materiales y procesos de fabricación, y el comportamiento y reacciones químicas de los lubricantes en las distintas superficies de contacto con los materiales es desconocido en la mayoría de los casos, ya que depende además de las condiciones de operación y del medio en el que se encuentre.

A continuación se definen con más detalle los distintos parámetros tribológicos, fricción, lubricación y desgaste.

1.3.4. Fricción

Se define la fricción como la resistencia al movimiento relativo entre dos materiales que están en contacto. En efecto, si se observa la superficie de un material en el microscopio, por muy pulida que esté la superficie, se puede apreciar a escala microscópica que la superficie no es perfectamente lisa, sino que es rugosa, formando crestas y valles.

Figura 3. Rugosidad de una superficie.



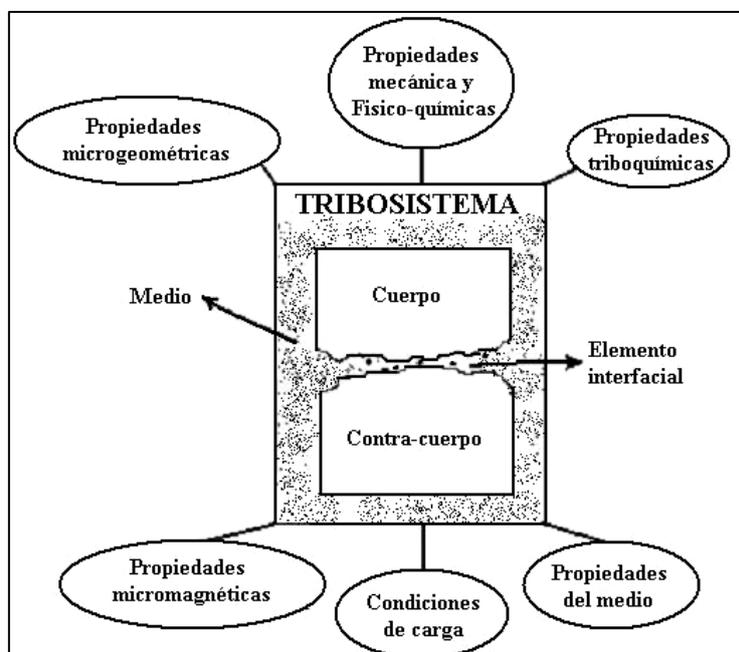
Cuando dos superficies se aproximan, sus asperezas superficiales de mayor altura entran en contacto. Al incrementarse la carga, los nuevos pares de asperezas de menor altura entran en contacto en determinados puntos y este movimiento de una respecto a la otra genera fuerzas tangenciales, llamadas fuerzas de fricción, las cuales tienen sentido contrario a la fuerza aplicada.

La naturaleza de este tipo de fuerza está ligada a las interacciones de las partículas microscópicas de las dos superficies implicadas, donde se produce la

adhesión a nivel molecular y también es consecuencia de la interacción mecánica entre las superficies.

La fuerza de fricción depende de muchos factores además de su geometría, como sus propiedades, las condiciones ambientales, la velocidad relativa entre las superficies y el lubricante utilizado. Por tanto, la fricción no es una propiedad intrínseca del material, es una respuesta integral del sistema tribológico. El valor del coeficiente de rozamiento es pues, característico de cada par de materiales en contacto y de las demás variables expuestas anteriormente que influyen en el sistema.

Figura 4. Elementos que componen un tribosistema.



El coeficiente de fricción, μ , expresa la pérdida gradual de energía cinética y que se debe básicamente a dos fenómenos. Por un lado, la deformación de las superficies en contacto, y por otro, la disipación de calor. Analíticamente, el coeficiente de fricción μ es el cociente entre la fuerza de fricción y la fuerza normal:

$$\mu = \frac{F_f}{F_n}$$

Además, el coeficiente de fricción es adimensional.

Desde un punto de vista internacional, se va a definir la fuerza de fricción según la *ASTM International* (*American Section of the International Association for Testing and Materials*, “*Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*”), ya que se trata de la más antigua y mayor desarrolladora mundial de estándares de materiales, productos, sistemas y servicios.

Así, en la *ASTM G40/93*, se define la fuerza de fricción como la fuerza tangencial resistente que actúa en la interfase de dos cuerpos y es la resultante de la acción de una fuerza externa aplicada a un cuerpo que se mueve o tiende a moverse sobre otro.

Esta fuerza de fricción siempre se opone al movimiento. Por lo tanto, ante un movimiento variable, la fuerza de fricción también lo será.

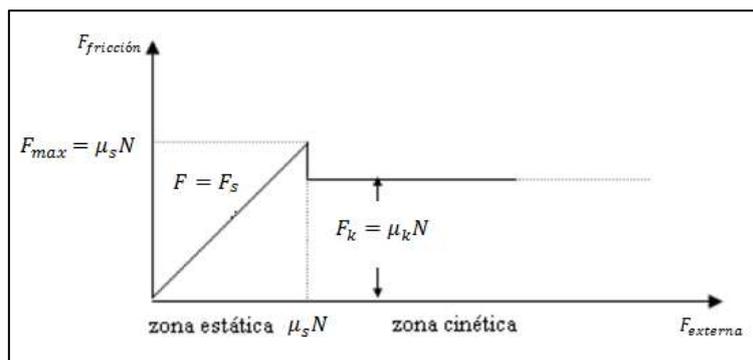
Existen dos tipos principales de fricción: la fricción estática y la fricción dinámica. A continuación se explican brevemente.

1.3.4.1. Fricción estática

Es la fuerza de rozamiento entre dos objetos que no están en movimiento relativo. Se define a través de un coeficiente de fricción estático, del inglés “*static*”, μ_s . La fuerza de fricción va aumentando gradualmente desde cero (cuerpo en reposo) hasta un valor máximo (inicio del movimiento). Esto se puede ver en las siguientes figuras.

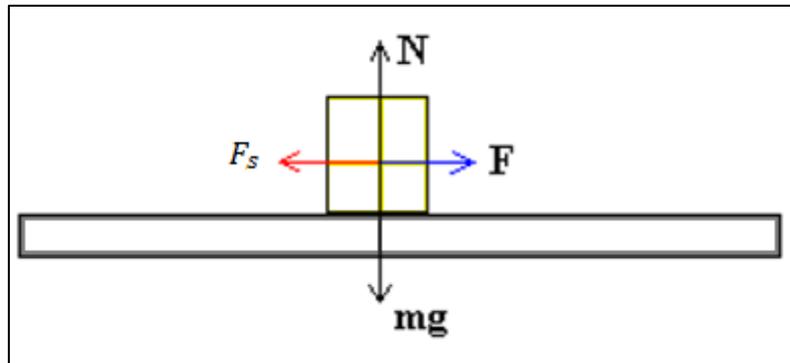
Como se ve en la *figura 5*, para la zona estática, la fuerza F aplicada sobre el bloque de peso $W = m \cdot g$ aumenta gradualmente, pero el bloque permanece en reposo.

Figura 5. Representación del coeficiente de fricción estático y cinético.



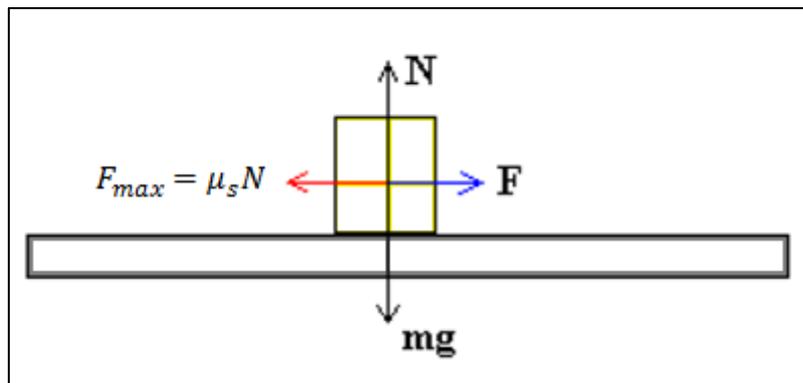
Hasta que se inicia el movimiento, la fuerza aplicada es igual a la fuerza de rozamiento estático F_s , es decir, $F = F_s$

Figura 6. Creación de la fuerza de fricción F_s .



En movimiento incipiente, es decir, en el instante donde empieza a moverse, se produce la máxima fuerza de rozamiento, dada por: $F_{fricción\ máxima} = \mu_s \cdot N$

Figura 7. Creación de la fuerza de fricción máxima.

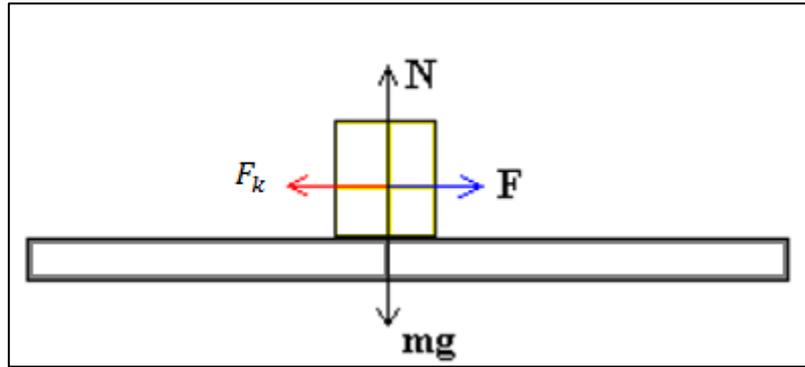


1.3.4.2. Fricción cinética

Es la fuerza de rozamiento que ocurre cuando existe movimiento relativo entre las superficies. Se define a través de un coeficiente de fricción cinético, del inglés “kinetic”, μ_k .

El valor de esta fuerza de fricción cinética permanece constante e inferior a la estática sino se modifican las características del contacto por mucho que varíe la fuerza externa.

Figura 8. Creación de la fuerza de fricción cinética.



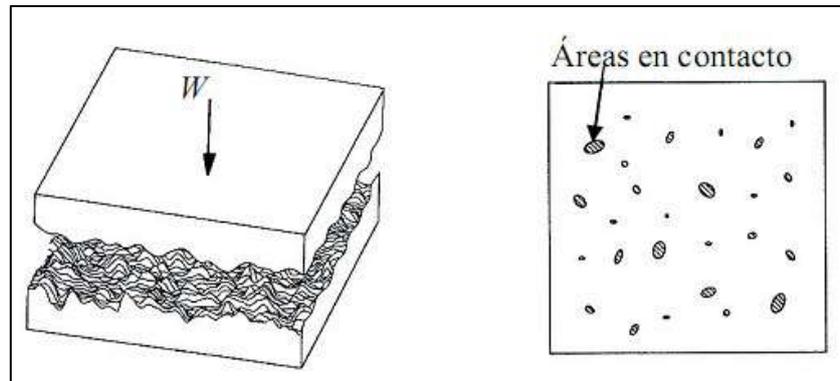
Como se observaba en la figura 5, el valor de la fuerza de rozamiento cinética es proporcional al de la fuerza normal, $F_k = \mu_k \cdot N$.

Los coeficientes de rozamiento estático y dinámico dependen de las condiciones de preparación y de la naturaleza de las dos superficies y son casi independientes del área de la superficie de contacto, tal y como se postuló en las leyes de Amontons y Coulomb.

No se tiene una idea perfectamente clara de la diferencia entre el rozamiento cinemático y el estático, pero se cree que el estático es mayor porque al permanecer en reposo ambas superficies, pueden aparecer enlaces iónicos, o incluso microsoldaduras entre las superficies. Como se ha indicado, la mayoría de las superficies, aunque estén perfectamente pulidas, son extremadamente rugosas a escala microscópica, así que cuando los picos de las dos superficies que se ponen en contacto determinan el área real de contacto que es una pequeña proporción del área aparente de contacto (superficie total de la pieza). El área real de contacto está formada por la suma de todos aquellos puntos discretos donde las dos superficies están en contacto a distancias atómicas. Y el área aparente es aquella que sólo tiene en cuenta la superficie total de los cuerpos en contacto. Es por esta razón que el área real de contacto es función de la rugosidad, propiedades intrínsecas del material (elasticidad y plasticidad) y las condiciones de carga aplicadas.

El área real de contacto aumenta cuando aumenta la presión, es decir, cuando aumenta la fuerza normal, ya que los picos se deforman, permitiendo una mayor zona de contacto entre ambos cuerpos.

Figura 9. Área real de contacto entre dos cuerpos.



Además, los metales tienden a soldarse en frío, debido a las fuerzas de atracción que ligan a las moléculas de una superficie con las moléculas de la otra. Estas soldaduras tienen que romperse para que se produzca el movimiento relativo entre ellas. Por otro lado, existe también la incrustación de los picos de una superficie con los valles de la otra. Cuando se consigue vencer esas interacciones, el bloque desliza sobre el plano, y las soldaduras en frío se rompen y se rehacen constantemente, pero la cantidad de soldaduras que hay en cualquier instante del movimiento es inferior a las que hay en la zona estática, de modo que el coeficiente de rozamiento cinético es menor que el coeficiente de rozamiento estático.

En la siguiente tabla se muestran algunos de los coeficientes de fricción, para una pareja de materiales.

Tabla 1. Coeficientes de fricción típicos para una pareja de materiales.

Superficies en contacto	μ_s	μ_k
Cobre sobre acero	0.53	0.36
Acero sobre acero	0.74	0.57
Aluminio sobre acero	0.61	0.47
Caucho sobre cemento	1.0	0.8
Madera sobre madera	0.25-0.5	0.2
Madera encerada sobre nieve húmeda	0.14	0.1
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Articulaciones sinoviales en el cuerpo humano	0.01	0.003

Relación de coeficientes de rozamiento. Física General de Serway, Ed. McGraw-Hill

Con respecto a la utilización de lubricantes, cabe decir que, la presencia de aceites o de grasas, en las superficies en contacto evita las soldaduras al revestirlas de un material inerte, con lo que disminuye el coeficiente de fricción.

1.3.4.3. Situación actual de la fricción

Ahora bien, las investigaciones actuales que estudian el rozamiento a escala atómica demuestran que la explicación dada anteriormente es muy general y que la naturaleza de la fuerza de rozamiento es muy compleja. En los últimos años se están llevando a cabo numerosas investigaciones en temas relacionados con la fricción de materiales, ya que se dispone de nuevas tecnologías para un mejor análisis. Uno de estos estudios ha sido llevado a cabo por científicos del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (Berkeley Lab.) y del Laboratorio Ames de la Universidad del Estado de Iowa (EE.UU.), que reveló que los átomos se espacian periódicamente en una dirección sobre una superficie perpendicular al eje de rotación de un cuasicristal.

Un cuasicristal (1984, Daniel Schetman, donde obtuvo el Premio Nobel de Química en el año 2011 por su descubrimiento) es una forma estructural ordenada pero no periódica, formando patrones que llenan todo el espacio aunque tienen falta de simetría traslacional, a diferencia de los cristales. Pero a ángulos rectos, se espacian en una sucesión de Fibonacci, donde la proporción entre los espacios de separación cortos y los largos es un número irracional vinculado al número Áureo.

El estudio, fue el primero en medir los efectos de rozamiento de la periodicidad en una red cristalina. Usando un microscopio de Fuerza Atómica (AFM) y un microscopio de Efecto Túnel (STM) combinados, los investigadores comprobaron que la fricción a lo largo de la superficie de un cuasicristal en la dirección de una configuración geométrica periódica es aproximadamente ocho veces más grande que en la dirección donde la configuración geométrica es aperiódica.

El caso es que se descubrió que la fricción obtenida es ocho veces mayor en la dirección periódica que en la dirección aperiódica, lo cual fue una gran sorpresa. Se observó pues que existe una relación entre los mecanismos de disipación de la energía generada por fricción y la estructura atómica de la superficie de contacto del material.

Esta es la línea de investigación que se está llevando en la actualidad, a nivel molecular, muy distinta de los primeros estudios realizados sobre la materia hace siglos.

1.3.5. Lubricación

La lubricación es el proceso de aplicación de una sustancia, llamada lubricante, entre dos superficies móviles con el fin de separarlas, producir el movimiento relativo entre ellas y reducir la fricción, el desgaste y la corrosión, el calentamiento y de sellar el espacio entre los componentes y limpiarlos, aislando los contaminantes y mejorando además la eficiencia de la operación que se realice. Para conseguirlo debe existir permanentemente una película de lubricante (sólido, líquido o gaseoso) de espesor suficiente entre ambas superficies que desarrolle un esfuerzo normal para soportar la carga entre las superficies enfrentadas. Este esfuerzo normal es el campo de presiones y está generado por la propia viscosidad del fluido.

Una correcta lubricación permite un funcionamiento continuo de los equipos mecánicos, con pequeño desgaste, y sin excesivas tensiones en las partes móviles de los mecanismos (cojinetes y engranajes).

Cuando la lubricación es incorrecta o insuficiente, las superficies pueden rozar y producirse degradación en una o ambas, generando calor y causando daños irreparables, y finalmente el fallo mecánico, con las consecuencias que conlleva, como reemplazo de piezas, mano de obra y pérdida de producción entre otras.

Los factores más importantes que intervienen en la lubricación son la viscosidad del lubricante, η , la carga aplicada y la velocidad de deslizamiento, u .

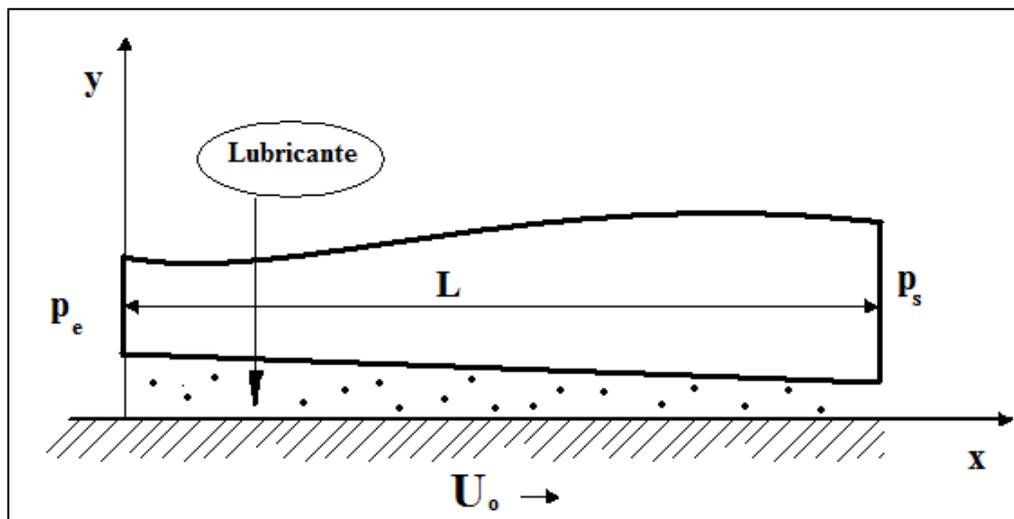
Los líquidos que poseen alta viscosidad son buenos lubricantes porque forman una película estable entre las superficies. En efecto, en lubricación, salvo casos particulares, el movimiento entre los cuerpos está dominado por la viscosidad, y se puede demostrar que los términos convectivos son despreciables, obteniéndose estas ecuaciones simplificadas de la cantidad de movimiento:

$$\boxed{0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}}$$

$$0 = \frac{\partial p}{\partial y}$$

Es decir, $p = p(x, t)$, y el campo de presiones generado por el lubricante para soportar la carga aplicada no varía transversalmente, solamente lo hace en dirección longitudinal, donde se produce el movimiento relativo.

Figura 10. Movimiento relativo de dos cuerpos en presencia de un lubricante.



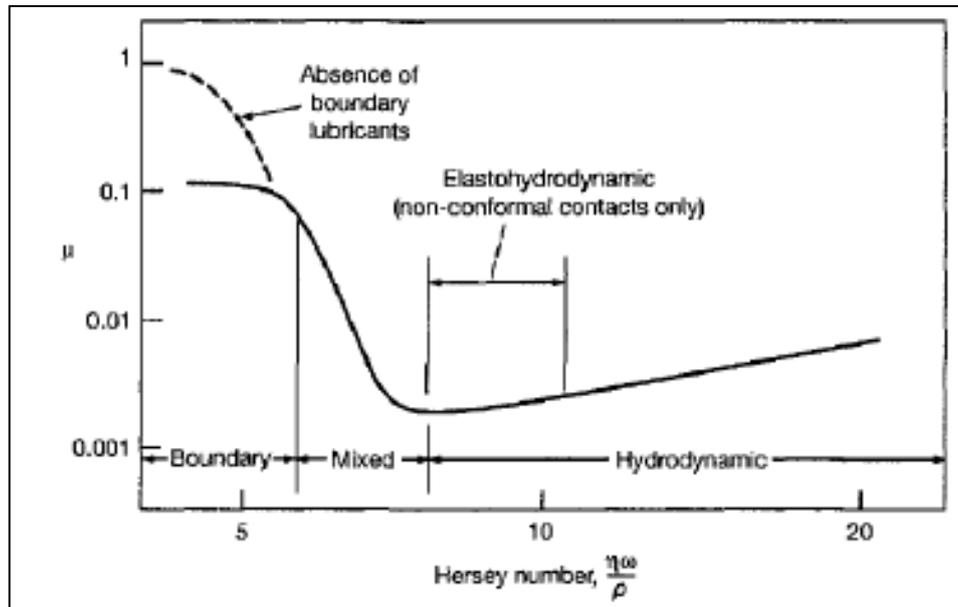
1.3.5.1. Regímenes de lubricación

En ingeniería mecánica existen varios regímenes de lubricación, entre los cuales se encuentran, la lubricación en capa gruesa, en capa delgada y la lubricación límite, todos ellos en función del parámetro adimensional de Hersey, $\eta \cdot \omega / p$ donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta \equiv \text{viscosidad dinámica (Pa} \cdot \text{s)} \\ \omega \equiv \text{velocidad angular (rps)} \\ p \equiv \text{Presión (Pa)} \end{array} \right.$$

Para observarlo mejor se tiene a continuación la curva de Stribeck, donde se expresa el coeficiente de fricción en función del parámetro de Hersey definido antes.

Figura 11. Curva de Stribeck.



- **Lubricación en capa gruesa o hidrodinámica (HDL)**

Ocurre para cargas pequeñas, o para un valor de $\eta \cdot \omega / p$ alto, ocasionando sobrepresiones bajas, y se pueden utilizar para análisis sencillos las leyes simples como las de Petroff en cojinetes, en que se toma un esfuerzo uniforme, por lo que el coeficiente de fricción es lineal con el parámetro de Hersey. Se habla también de lubricación de película gruesa, fluida, completa o perfecta, donde las superficies están completamente cubiertas con una película de lubricante. Bajo condiciones hidrodinámicas, no hay contacto físico entre los componentes y apenas hay desgaste, ya que hay un espesor de unos 5 μm o superior. Generalmente la magnitud de la presión desarrollada es menor que 5 MPa y no es lo suficientemente grande para causar una deformación elástica significativa en las superficies.

- **Lubricación elastohidrodinámica (EHL)**

Este es un tipo de lubricación que desde su descubrimiento por los profesores británicos Dowson Duncan y Higginson Gordon en la década de los años 50's que marcó el verdadero comienzo a la solución de los problemas de desgaste en mecanismos que funcionaban sometidos a condiciones de altas cargas y bajas velocidades y que hasta entonces se manejaban como mecanismos lubricados por capa límite o fluida.

La lubricación elastohidrodinámica se genera en los contactos altamente cargados y, como consecuencia de las cargas elevadas en los contactos, se produce un aumento de viscosidad en el lubricante y deformaciones elásticas en los cuerpos. Dado que la viscosidad aumenta debido a la alta presión, la distribución de presión aumenta, con lo que también lo hace la capacidad de carga.

Se trata de una forma de lubricación hidrodinámica donde la deformación elástica de las superficies lubricadas se hace importante. La lubricación EHL se presenta en mecanismos en los cuales las rugosidades de las superficies de fricción trabajan siempre entrelazadas y nunca llegan a separarse. En este caso, las crestas permanentemente se están deformando elásticamente (sin llegar al punto de fluencia del material) y el control del desgaste y el consumo de energía dependen de la película adherida a las rugosidades y de las capas de aceite de la película hidrodinámica que se forma cuando el lubricante es sometido a elevadas presiones. El espesor de la película de lubricante, en este caso es como máximo de 1 μm .

- ***Lubricación en capa delgada o mixta (TFL)***

Ocurre para valores de $\eta \cdot \omega / p$ medios. Al aumentar las sobrepresiones, es preciso un análisis hidrodinámico detallado y su solución se desvía de las leyes sencillas.

En lubricación mixta el desgaste y el consumo de energía dependen tanto de las características de la película límite como de la resistencia a la cizalladura de la película fluida y de su estabilidad. La interacción parcial ocurre entre una o más capas moleculares de películas de lubricación marginal. La acción parcial de la lubricación de película fluida se desarrolla en el volumen del espacio entre los sólidos. El espesor promedio de la película en una conjunción de este tipo varía entre 0.01 y 1 μm .

Es importante conocer que la transición de la lubricación hidrodinámica a la mixta no ocurre instantáneamente a medida que la carga aumenta, sino que las presiones dentro del fluido que llena el espacio entre los sólidos opuestos soportan una proporción decreciente de la carga. A medida que esta carga se incrementa, la mayor parte de ésta la soporta la presión de contacto entre las asperezas de los sólidos. Además el régimen

de lubricación para superficies concordantes va directamente de la lubricación hidrodinámica a la mixta.

- ***Lubricación límite (BL)***

Ocurre para $\eta \cdot \omega / p$ bajos, casi siempre a velocidades relativas pequeñas o cargas altas. La película fluida se rompe dejando de ser continua, el coeficiente de fricción y el desgaste aumentan mucho ya que hay contacto físico entre las asperezas de las superficies. El problema pasa de ser únicamente hidrodinámico a intervenir otras cuestiones relativas a las características superficiales de los materiales.

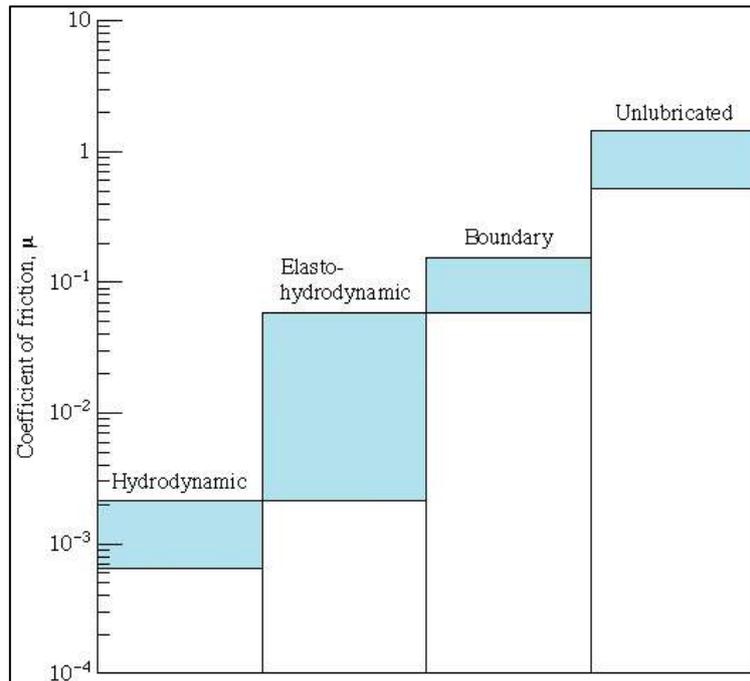
El mecanismo de lubricación por contacto se rige por las propiedades físicas y químicas de las películas delgadas de superficie de proporciones moleculares más que por la viscosidad. Las propiedades volumétricas del lubricante tienen menor importancia y el coeficiente de fricción es independiente de la viscosidad del fluido.

Como se ha comentado, este tipo de lubricación se utiliza en los elementos de máquinas con cargas pesadas y bajas velocidades de operación, donde es difícil obtener una lubricación por película fluida.

Finalmente destacar que la BL está caracterizada por la formación de películas adsorbidas, tanto de forma física como química. Bajo estas condiciones, la temperatura alcanzada en el contacto de las asperezas puede ser suficiente como para causar la reacción química entre el lubricante y las superficies sólidas, generándose una capa adsorbida que protege las superficies. Sin embargo, la naturaleza exacta de estas capas y la cinética química del proceso no son totalmente conocidas.

A continuación se muestra el coeficiente de fricción en función de los distintos regímenes de lubricación.

Figura 12. Coeficiente de fricción en función del régimen de lubricación.



Se observa claramente que el coeficiente de fricción es inferior en la situación hidrodinámica, tal y como se ha comentado.

Otra forma de analizar los distintos regímenes de lubricación es a través del parámetro λ , que expresa la relación entre el espesor de la película de lubricante y la rugosidad. Se trata del diagrama IRG, podemos hacer una discusión según λ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda > 3, \text{ DHL} \\ 1 > \lambda > 3, \text{ TFL, EHL} \\ \lambda < 1, \text{ BL} \end{array} \right.$$

Los límites entre regímenes se determinan a partir de experimentos con contactos conformacionales, como la máquina de cuatro bolas o las geometrías de esfera o plano sobre cilindro. Los límites separan tres regiones llamadas convencionalmente I, II y III.

La ruptura de la EHL parcial para dar bien lubricación límite (por ejemplo una transición entre los regímenes I y II), para velocidades más altas, bien directamente desgaste en seco (I a III), se indica en la figura inferior.

Esta transición puede entenderse si se considera que el espesor de película en EHL depende, entre otros factores, de la viscosidad del lubricante y de la velocidad. Un aumento de cualquiera de estas dos variables lleva a una película más gruesa.

Figura 13. Representación de los coeficientes de fricción y desgaste en función de λ .

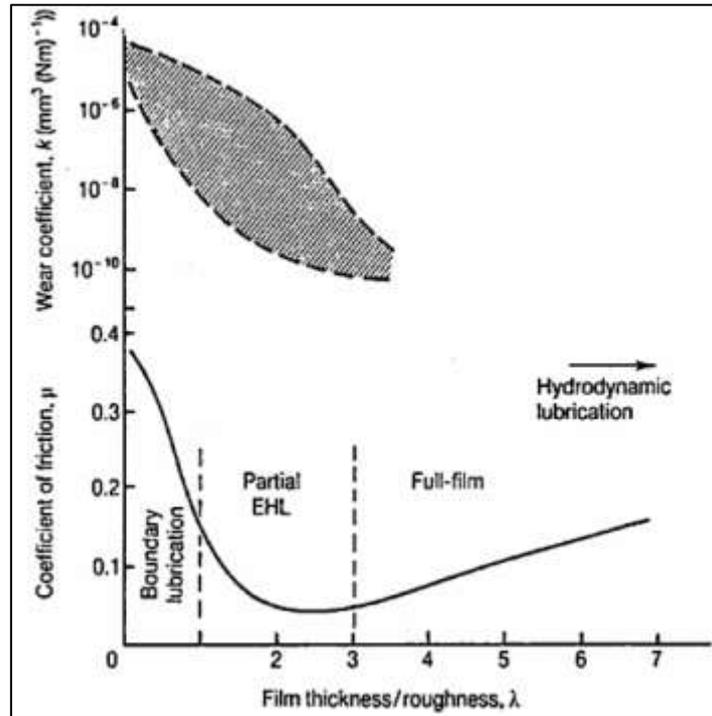
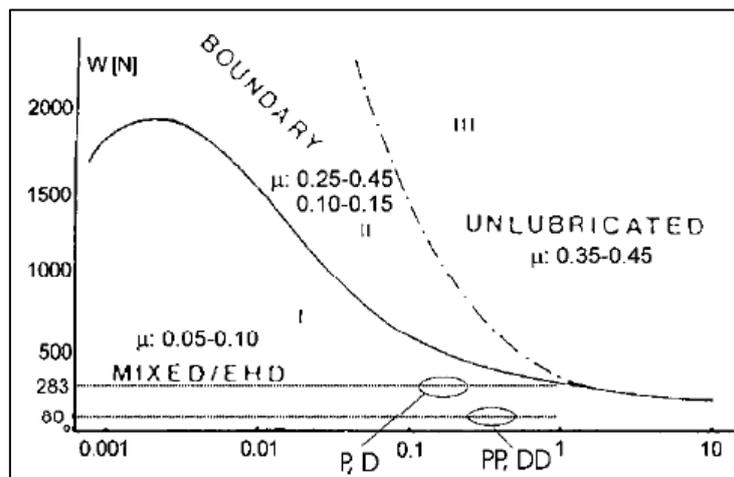


Figura 14. Diagrama de transición IRG para un acero.



1.3.5.2. Tipos de lubricantes

Existe una gran variedad de lubricantes, según la aplicación para la que usen. Una clasificación puede ser según su estado, líquidos o sólidos.

- Lubricantes líquidos

Pueden ser además, naturales (como grasas animales, aceites de ballena o tiburón, aceites minerales o vegetales) o sintéticos (hidrocarburos, clorofluorocarburos, ésteres, siliconas, silanos, polifeniléteres –PPE’s-, perfluoropoliéteres –PFPE’s).

Dentro de los naturales se van a comentar brevemente los más importantes, que son los aceites minerales, compuestos principalmente por hidrocarburos, además de otras impurezas, y según el crudo de procedencia pueden ser parafínicos, nafténicos o aromáticos fundamentalmente.

Los parafínicos son los más comunes por sus buenas propiedades generales. El producto final obtenido tras el refinado tiene un alto índice de viscosidad que suele situarse entre 90 y 100 (muy poca variación de la viscosidad con la temperatura).

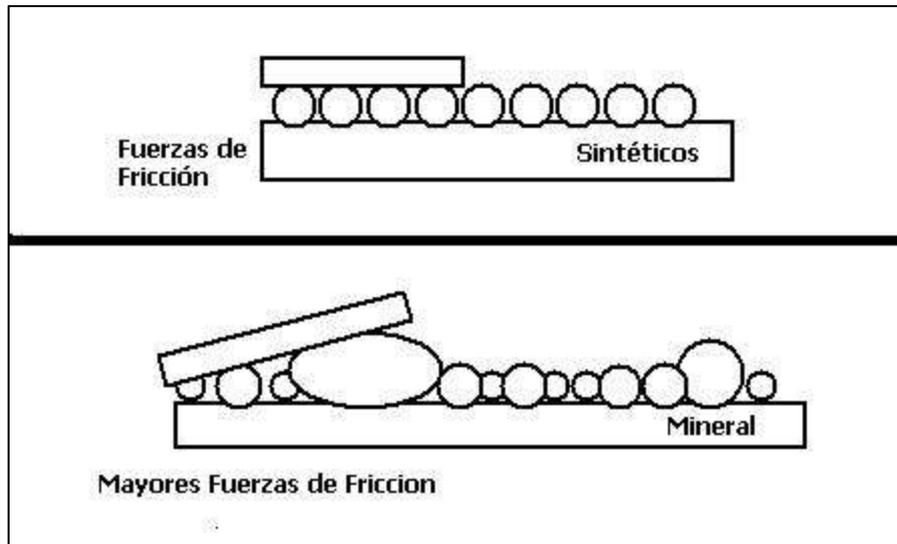
Los nafténicos se usan cuando son necesarias buenas propiedades a baja temperatura, lo que permite su uso en aplicaciones de refrigeración. También se emplean en transformadores eléctricos y equipos de conmutación debido a sus propiedades dieléctricas. Su principal inconveniente es su índice de viscosidad medio, que suele situarse entre 40 - 70. Además, tienen una pobre estabilidad ante la corrosión.

Los aceites base minerales presentan las desventajas de que al proceder del petróleo están sujetos a las subidas y bajadas continuas de precio y, sobre todo, que son perjudiciales para el medio ambiente, ya que contienen sulfuros y otros compuestos volátiles.

En cuanto a los sintéticos, son desarrollados y usados para aplicaciones especiales donde los productos obtenidos del petróleo no son adecuados. Los aceites sintéticos son fluidos fabricados sintéticamente y adecuados para la lubricación (por ejemplo, aceites de ésteres, por medio de síntesis catalítica de ácidos grasos con alcohol).

Para determinados sectores de aplicación, estos líquidos cuentan con propiedades superiores a las de los aceites lubricantes minerales, en concreto, disminuyendo la fuerza de fricción presente.

Figura 15. Comparación de lubricantes sintéticos y minerales.



Los aceites sintéticos son producidos mediante reacciones químicas en las cuales la presión, la temperatura y la relación de los compuestos es cuidadosamente controlada. La materia prima utilizada en su fabricación es, en su gran mayoría, obtenida del petróleo procesado térmicamente y del gas natural. El etileno y sus derivados son las materias primas más usadas en la elaboración de aceites sintéticos.

Igualmente, las consideraciones de diseño de ciertos equipos, exigen el uso de aceites sintéticos debido a condiciones extremas o particulares de operación. Los principales componentes de los aceites sintéticos son los hidrocarburos sintetizados, las polialfaolefinas (PAO), aromáticos alquilados, polibutenos, cicloalifáticos, poliglicoles.

La polialfaolefina se caracteriza por su estabilidad térmica, su buena viscosidad, aún a temperaturas elevadas, su capacidad de resistir altas presiones y su estabilidad a la oxidación.

Los ésteres orgánicos son compuestos con contenido de oxígeno, que resultan de la reacción de un alcohol con ácido orgánico. Los ésteres orgánicos han sido una clase importante de fluidos con base sintetizada desde el inicio de su uso, el cual remonta a la segunda guerra mundial.

En cuanto a las siliconas, están basadas en polímeros y copolímeros que contienen una estructura de unidades de silicio oxígeno replicados y cadenas orgánicas unidas a la silicona. Las siliconas tienen un alto índice de viscosidad, superior a 300.

Los aceites sintéticos, en general, funcionan mejor que los minerales, pero son más costosos (4-8 veces el aceite mineral), pero para ciertas condiciones de trabajo son difíciles de obtener.

Otras características de los aceites sintéticos son un elevado índice de viscosidad (>120), una elevada estabilidad térmica, buena resistencia a la oxidación, mínima cantidad de residuos de evaporación, una adecuada protección contra la corrosión en ambientes críticos, buena demulsibilidad, alto punto de inflamación, baja tendencia a la formación de espuma, elevada conductividad térmica, alta adhesividad a las superficies metálicas, alta miscibilidad a bajas temperaturas, baja solubilidad a altas temperaturas y conservación de la energía (reduciendo el consumo de energía en un 11% aproximadamente).

- Lubricantes sólidos

Suelen ser, al igual que los minerales, derivados del petróleo, presentan problemas medioambientales y no se pueden utilizar en todas las condiciones de las máquinas. Dentro de esta categoría encontramos lubricantes minerales y sintéticos, que son los más usados.

El lubricante sólido actúa cuando su agente ha sido desplazado o evaporado como en el caso de solventes, permaneciendo en la zona de contacto y realizando su trabajo de lubricación. También se aplican lubricantes sólidos en forma directa, mezclados con resinas o se pueden combinar con algunos elementos de los equipos, conocidos como elementos sectorizados.

1.3.5.3. Aditivos en lubricantes

Un aceite lubricante típico está compuesto entre un 75 – 95 % por un componente principal, llamado *aceite base* y el resto por otros compuestos químicos

llamados *aditivos*. Esencialmente el aceite base determina las propiedades físicas del aceite y es casi inerte; mientras que los aditivos mejoran sus propiedades químicas.

Se entiende pues, como aditivos a los compuestos químicos destinados a mejorar las propiedades naturales de un lubricante, y conferirle otras que no poseen y que son necesarias para cumplir su función satisfactoriamente.

Las exigencias de lubricación de los modernos equipos y grandes máquinas en general, ha obligado a reforzar las propiedades intrínsecas de su lubricante, mediante la incorporación de estos aditivos en pequeñas cantidades, suficiente como para que se modifiquen profundamente las propiedades y el comportamiento de los aceites a los que se les incorporan, ha hecho que el empleo de aditivos vaya en aumento.

El objetivo principal de los aditivos es el de limitar el deterioro del lubricante a causa de fenómenos químicos ocasionados por su actividad, aunque también el de proteger a la superficie lubricada de la agresión de ciertos contaminantes y mejorar las propiedades físico-químicas del lubricante o proporcionarle otras nuevas, como pueden ser, entre otras, la de agentes antimicrobianos, elevar el índice de viscosidad, emulsionantes, modificadores de fricción y otras.

1.3.5.4. Propiedades de los lubricantes

A continuación se definen las principales propiedades que poseen los lubricantes.

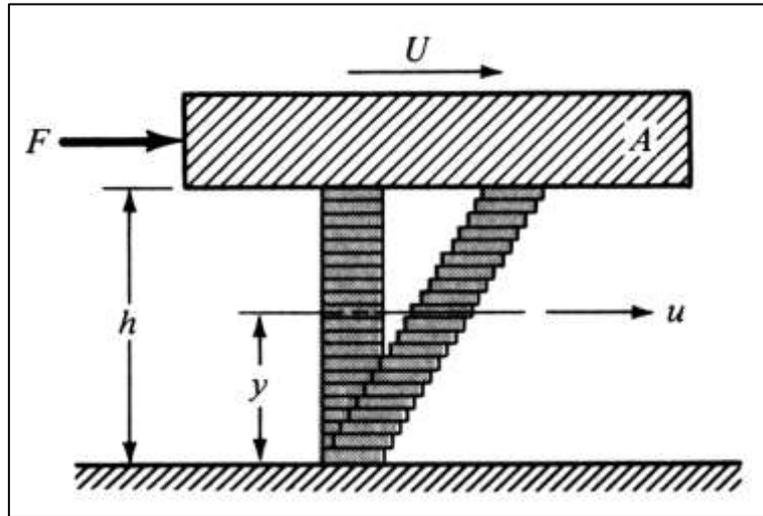
- Viscosidad

Es la propiedad más importante para un lubricante. Si la viscosidad es demasiado baja la película lubricante no soporta las cargas entre las piezas y desaparece del medio sin cumplir su objetivo de evitar el contacto entre las superficies. Si la viscosidad es demasiado alta el lubricante no es capaz de llegar a todos los lugares en donde es requerido.

Se define como la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal. La viscosidad sólo se manifiesta en líquidos en movimiento. En 1668, Newton propuso un modelo por el que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante, (donde su principal componente viene dada

por la presión) y el gradiente de velocidad desarrollado entre dos capas planas separadas por un fluido.

Figura 16. Movimiento relativo de dos placas planas en presencia de un lubricante.



Esta ley viene a partir de la expresión general de la cantidad de movimiento vista anteriormente, y simplificando e integrando:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}$$

La viscosidad se determina de forma experimental a través de un aparato llamado viscosímetro (o reómetro en algunos fluidos cuando no puede definirse un único valor de viscosidad).

$$\eta = \frac{\nu}{\rho}$$

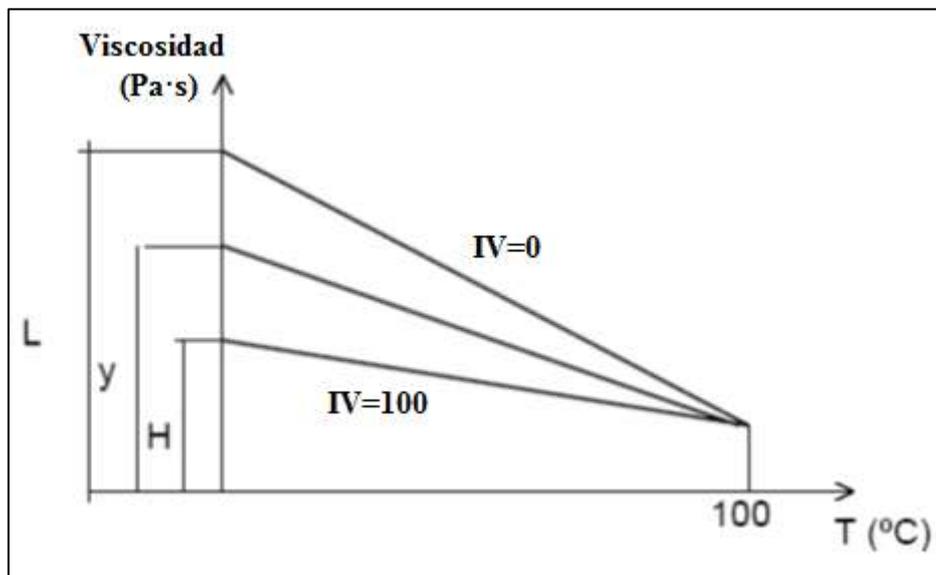
Donde: $\left\{ \begin{array}{l} \eta \equiv \text{viscosidad dinámica (Pa} \cdot \text{s ; Poise (P) = 0.1 Pa} \cdot \text{s)} \\ \nu \equiv \text{viscosidad cinemática (m}^2\text{/s ; Stokes(St) = 10}^{-4} \text{ m}^2\text{/s)} \\ \rho \equiv \text{densidad del fluido (kg/m}^3\text{)} \end{array} \right.$

La viscosidad en un fluido es función de la presión y de la temperatura.

- Índice de viscosidad (IV)

Es de destacar la relación de la viscosidad con la temperatura, en concreto, decrece cuando aumenta la temperatura. Por eso se utiliza el IV de un lubricante, que indica el cambio en el valor de viscosidad del aceite dentro de un rango de temperaturas dado. Se compara este IV con aceites de susceptibilidades térmicas muy pequeñas y muy grandes. Para determinar el índice de viscosidad de un aceite se sigue el procedimiento de la *figura 17*. Se toman aceites con IV=0 y IV=100 que tengan la misma viscosidad a 100°C que el aceite problema.

Figura 17. Obtención del IV de un lubricante.



$$IV(\%) = \frac{L - y}{L - H} \cdot 100$$

Esto establece un límite del índice de viscosidad de 100, pero debido al avance en el diseño de los aditivos, se ha conseguido mejoras del índice de viscosidad, en algunos casos, con índices mayores a 100 para algunos lubricantes.

- Densidad

La densidad es la razón entre el peso de un volumen dado de aceite y un volumen igual de agua. La densidad está relacionada con la naturaleza del crudo de origen y el grado de refinado. En ocasiones, se usan otras características para definir el aceite en lugar de su densidad, aunque están directamente relacionadas con ella.

- Untuosidad o lubricidad

Se conoce con estos nombres a la capacidad de un lubricante de formar una película de un cierto espesor sobre una superficie. Esta propiedad está relacionada con la viscosidad; a mayor viscosidad, mayor lubricidad. En la actualidad suelen usarse aditivos para aumentar la lubricidad sin necesidad de aumentar la viscosidad.

- Adhesión o adherencia

Es la capacidad de un lubricante de adherirse a una superficie sólida. Está relacionada con la lubricidad.

- Volatilidad

Un lubricante que no sea volátil es más compatible con el medio ambiente porque se producen menos emisiones. Por otra parte, una volatilidad alta aumenta el consumo de lubricante debido a las pérdidas del mismo por evaporación.

- Biodegradabilidad

Es la capacidad de descomposición de una sustancia bajo condiciones ambientales por medios naturales como bacterias, hongos, plantas o animales, que generan energía empleando la materia en descomposición como sustrato.

Los principales factores que influyen en la biodegradabilidad de un lubricante son la viscosidad, la influencia de la luz solar, el pH, la presencia de sales minerales y nitrógeno y la solubilidad en agua.

- Punto de goteo

Se llama punto de goteo a la temperatura a la cual una grasa pasa de estado semisólido a líquido. Este cambio de estado puede ser brusco o paulatino, considerándose el punto de goteo como el final del proceso.

En las grasas tipo jabón el cambio de estado es debido a la separación del aceite y el jabón al alcanzarse el punto de goteo. La grasa tipo no jabón pueden cambiar de estado sin separarse el aceite del espesante.

Se considera que el rango de temperatura útil de una grasa está entre 40 y 65°C por debajo del punto de goteo. La operación en temperaturas próximas al punto de goteo obviamente afectará a la eficacia lubricante de la grasa.

El punto de goteo no está relacionado con la calidad de la grasa.

- Punto de inflamación

Es la temperatura mínima a la cual un lubricante empieza a emitir vapores inflamables. Está relacionada con la volatilidad del lubricante. Cuanto más bajo sea este punto de inflamación, más volátil será el aceite y tendrá más tendencia a la inflamación. Un punto de inflamación alto es signo de calidad en el aceite.

En los aceites industriales el punto de inflamación suele estar entre 80 y 230 °C, y en los de automoción entre 260 y 355°C

El punto de inflamación también orienta sobre la presencia de contaminantes, especialmente gases (los cuales pueden reducir la temperatura de inflamación hasta 50°C en algunos aceites), riesgo de incendios a causa de los vapores y procesos no adecuados en la elaboración del aceite.

- Punto de combustión

Se llama así a la temperatura a la cual los vapores emitidos por un aceite se inflaman, y permanecen ardiendo al menos 5 segundos al acercársele una llama. El punto de combustión suele estar entre 30 y 60 ° por encima del punto de inflamación.

- Punto de enturbiamiento

Se llama punto de enturbiamiento a la temperatura a la cual las parafinas y otras sustancias disueltas en el aceite se separan del mismo y forman cristales, al ser enfriado el mismo, adquiriendo así un aspecto turbio.

La solubilidad del aceite y el peso molecular de las sustancias disueltas influyen en el punto de enturbiamiento. Como es sabido, la solubilidad está directamente

relacionada con la temperatura de la misma. Al bajar esta, la solubilidad disminuye, haciendo que algunas sustancias disueltas se separen de las sustancias disolventes.

El peso molecular de las sustancias disueltas también influye en la capacidad del disolvente (en este caso el aceite) para disolverlas. Cuanto menor sea el peso molecular en cuestión más fácil será disolver dichas sustancias. La presencia de sustancias extrañas y el almacenamiento prolongado también influyen en el punto de enturbiamiento. Los contaminantes se combinan o aglomeran parafinas y otras sustancias susceptibles de separarse del aceite, elevando el punto de enturbiamiento.

Igualmente, el almacenamiento prolongado favorece la aglomeración de parafinas. No todos los aceites presentan punto de enturbiamiento: alguno se solidifica directamente al alcanzar la temperatura de congelación. Esta característica es de especial significación en los aceites que operan en temperaturas ambiente muy bajas, ya que afecta a la facilidad para bombear el aceite y su tendencia a obstruir filtros y pequeños orificios.

- Punto de congelación

El punto de congelación (también llamado punto de fluidez) es la menor temperatura a que se observa fluidez en el aceite al ser enfriado. Se expresa en múltiplos de 3°C o 5°F.

En los aceites naftalénicos, este punto se alcanza por la disminución de la densidad causada por el descenso de la temperatura; en los parafínicos se debe principalmente a la cristalización de sustancias parafínicas.

El punto de congelación se alcanza siempre a temperatura inferior a la del punto de enturbiamiento. Al igual que este, es una característica importante en aquellos aceites que operan a muy bajas temperaturas ambientales.

- Punto de floculación

Se llama punto de floculación a la temperatura a la cual las parafinas y otras sustancias disueltas en el aceite se precipitan formando flóculos (agregados de sustancias sólidas) al entrar en contacto con un fluido refrigerante en una mezcla con un 10% de aceite y un 90% de refrigerante, al ser enfriado el aceite.

Esta característica es de especial significación en los aceites que trabajan en elementos de sistemas de refrigeración, en los cuales el refrigerante es miscible con el aceite.

- Calor específico

Es la capacidad de absorción de calor que tiene un lubricante. Si se generan altas temperaturas en el contacto es necesario poder evacuar ese calor generado para reducir el desgaste.

- Acidez o alcalinidad

Es una de las propiedades más definitorias de un lubricante y su graduación puede venir expresada por su número de neutralización. En los aceites nuevos nos da información sobre el grado de refinado y la aditivación del aceite. En los aceites usados nos aporta datos sobre su nivel de degradación (oxidación, contaminación, estado de sus aditivos, etc.) y puede alertarnos sobre posibles problemas en el sistema de lubricación.

En un aceite podemos tener simultáneamente datos de acidez y alcalinidad. Esto es debido al carácter ácido y básico de sus componentes, tales como productos de la oxidación (ácidos) o aditivos detergentes (básicos). Estas sustancias están en proporción bastante baja como para no neutralizarse mutuamente. Podemos distinguir dos tipos de acidez en el aceite: acidez mineral, originada por ácidos residuales del refinado y acidez orgánica, originada por productos de la oxidación y los aditivos.

Durante su uso, el aceite es sometido a temperaturas elevadas y a esfuerzos mecánicos. Esto tiene como resultado la degradación progresiva del aceite, produciéndose cambios en la composición del aceite. Se originan sustancias como resultado de la oxidación y se reduce la capacidad protectora de los aditivos. Este proceso se acelera al acercarse el final de la vida operativa del aceite, lo que puede dar lugar a la formación de lodos, barnices y depósitos carbonosos en el sistema, disminución de la viscosidad del aceite y hasta corrosión en piezas metálicas. Por ello, la variación de la acidez del aceite es un buen indicador de su nivel de degradación. Un incremento brusco en la acidez es un indicativo de problemas tales como contaminación, pérdidas en sellos, incremento de la fatiga térmica o mecánica o pérdida de la capacidad de los aditivos.

Un rápido descenso de la alcalinidad es indicativo de un exceso de formación de ácido debido a la oxidación, sobrecalentamiento, o uso de combustible con alto contenido de azufre.

- Bombeabilidad

Es la capacidad de un lubricante para fluir de manera satisfactoria impulsado por una bomba, en condiciones de baja temperatura. Esta propiedad está relacionada directamente con la viscosidad.

- Consistencia

Se llama así a la resistencia a la deformación que presenta una sustancia semisólida, como por ejemplo una grasa. Este parámetro se usa a veces como medida de la viscosidad de las grasas. Al grado de consistencia de una grasa se le llama penetración y se mide en décimas de milímetro. La consistencia, al igual que la viscosidad, varía con la temperatura.

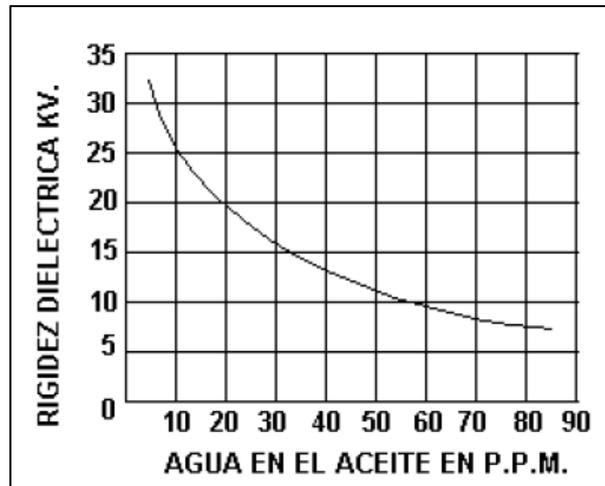
- Rigidez dieléctrica

La rigidez dieléctrica o tensión de perforación es la tensión que produce un arco eléctrico permanente entre dos electrodos bien definidos separados 2'5mm, sumergidos en aceite a 20°C. Se expresa en Kv/cm. La rigidez dieléctrica orienta sobre la capacidad aislante del aceite, así como de la presencia en el mismo de impurezas tales como agua, lodos, polvo, gases, etc.

La presencia de impurezas disminuye la rigidez dieléctrica de un aceite ya que facilitan el paso de la corriente a través del aceite, especialmente las que lleven agua en disolución, tales como fibras de papel, gotas de polvo, etc.

La temperatura incrementa el valor de la rigidez dieléctrica, hasta alcanza un valor máximo a 100°C. Esta propiedad es de especial significación en los aceites de transformador y en los aceites para compresores frigoríficos.

Figura 18. Rigidez dieléctrica de un lubricante en función de las impurezas.



- Emulsibilidad

La emulsibilidad es la capacidad de un líquido no soluble en agua para formar una emulsión. Se llama emulsión a una mezcla íntima de agua y aceite. Puede ser de agua en aceite (siendo el agua la fase discontinua) o de aceite en agua (donde el agua es la fase continua).

Se considera que una emulsión es estable si persiste al cesar la acción que la originó y al cabo de un tiempo de reposo. Los factores que favorecen la estabilidad de las emulsiones son una viscosidad del aceite muy alta, una tensión superficial del aceite baja, la pequeña diferencia de densidad entre los dos líquidos y la presencia de contaminantes.

La presencia de agua en el aceite es siempre perjudicial para la lubricación, ya que, entre otras cosas, puede disolver ciertos aditivos, restando eficacia al aceite. Por lo tanto, siempre es deseable que los aceites formen emulsiones inestables, o separen el agua por decantación. Esto es especialmente deseable en el caso de la maquinaria expuesta a la intemperie. Sin embargo, en algunos casos, como los aceites de corte o los marinos para maquinaria de cubierta, lo deseable es que las emulsiones sean estables.

La adecuada eliminación del agua facilita en muchos casos la lubricación, reduciendo el desgaste de piezas y la posibilidad de corrosión.

Esta propiedad es muy importante en los aceites hidráulicos, para lubricación de maquinaria industrial, de turbina y para engranajes que transmiten grandes esfuerzos. En los aceites de automoción no lo es tanto, debido a la capacidad dispersante y detergente del mismo.

Una variante de esta propiedad es la aeroemulsión (emulsión de aire en aceite, formada por burbujas muy pequeñas (10^{-5} - 1 mm), dispersas por todo el líquido, provocando problemas semejantes a los de la espuma superficial. Es una característica intrínseca del aceite base y no puede ser modificada con aditivos.

1.3.5.5. Situación actual y futura

No cabe duda de que el desarrollo tecnológico e industrial que vivimos no sería posible sin el uso de lubricantes, cada vez con mejores propiedades. La lubricación de rodamientos ocupa una importante área del total de aplicaciones que necesitan lubricantes para su funcionamiento. Toda máquina en la que un eje gira necesita un elemento de apoyo que además permita su movimiento, llamado rodamiento o cojinete, y necesita la presencia de un lubricante para su correcto funcionamiento para reducir la fricción al máximo y conseguir que la máquina tenga un alto rendimiento no perdiendo excesiva potencia en pérdidas mecánicas.

Las vanguardistas técnicas analíticas de las últimas décadas permiten analizar los procesos químicos que se producen durante el proceso de la lubricación, y diseñar lubricantes especializados para algunas aplicaciones concretas.

La industria de lubricantes está en continuo desarrollo y cambia sus productos a medida que se van descubriendo nuevos procesos, materiales y máquinas. Los lubricantes del futuro tienen que ser más respetuosos con el medio ambiente y el cambio climático, tener un mayor nivel de operación y un menor coste total de su ciclo de vida que los usados hoy en día.

Con estos avances se ha conseguido la posibilidad de disminuir, en la actualidad, los consumos de carburante en automóviles, al desarrollarse nuevos aceites. Esto supone una disminución aproximada de un 5% de combustible.

1.3.6. Desgaste

Se puede definir el desgaste, en ciencia de materiales, como el daño o erosión de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo. Se trata de un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie, por rozamiento, ocasionando daño en la superficie de los materiales. Al igual que la fricción, el desgaste no es solamente una propiedad del material, es una respuesta integral del sistema.

El desgaste, cualquiera que sea su origen, finalmente conduce al contacto entre las superficies del mecanismo que se encuentran en movimiento relativo ocasionando un desgaste, que puede llegar a ser crítico haciendo que las piezas de una máquina pierdan sus tolerancias y el mecanismo funcione de una manera errática o que fallen catastróficamente quedando inservibles y causando consecuentemente costosos daños y elevadas pérdidas en el sistema productivo.

Las causas del desgaste no siempre se pueden determinar, conllevando a que, en muchos casos, sea imposible determinarlas, incluso aunque el mecanismo se haya lubricado correctamente.

En cualquier caso el desgaste de un mecanismo es indeseable pero es imposible evitarlo ya que aun cuando se controlen las causas que lo originan, no será factible evitar la fatiga del material ya que ésta es una propiedad intrínseca de dicho material y conducirá a que finalmente el mecanismo se tenga que reemplazar. Si se quiere que las máquinas alcancen sus mayores índices de productividad es necesario lograr que los componentes que las constituyen se cambien por fatiga y no por alguno de los muchos tipos de desgaste que se pueden presentar durante su explotación.

Las superficies de los mecanismos lubricados de una máquina se pueden desgastar por causas que pueden ser intrínsecas al tipo de lubricante utilizado, a su tiempo de servicio, a contaminantes presentes en el aceite cuyo origen puede ser de ellos mismos o de fuentes externas, fallos del sistema de lubricación, a sobrecargas debidas a problemas mecánicos, y en algunos pocos casos como resultado de una selección incorrecta del equipo rotativo para el tipo de trabajo que va a desarrollar, al empleo de materiales inadecuados o un mal diseño.

1.3.6.1. Tasa de desgaste

Para poder caracterizar un proceso de desgaste es necesario algún parámetro para cuantificar dicho desgaste. Este parámetro es la tasa de desgaste (k), que viene dada por la siguiente expresión:

$$k = \frac{\text{Volumen desgastado}}{W \cdot \Delta S} \quad (\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m})$$

Donde:

$$\begin{cases} W \equiv \text{Carga normal aplicada (N)} \\ \Delta S \equiv \text{Distancia recorrida (m)} \end{cases}$$

Otra tasa de desgaste que se utiliza mucho en la bibliografía es aquella en la que no se divide por la carga aplicada, y viene dada por:

$$k = \frac{\text{Volumen desgastado}}{\Delta S} \quad (\text{mm}^3 / \text{m})$$

Si se utilizara únicamente el volumen de desgaste producido no resultaría demasiado útil, ya que depende de las condiciones a las que se someta el ensayo.

El volumen de desgaste se obtiene directamente a partir del software utilizado (Ver apartado 2.3.6, microperfilómetro).

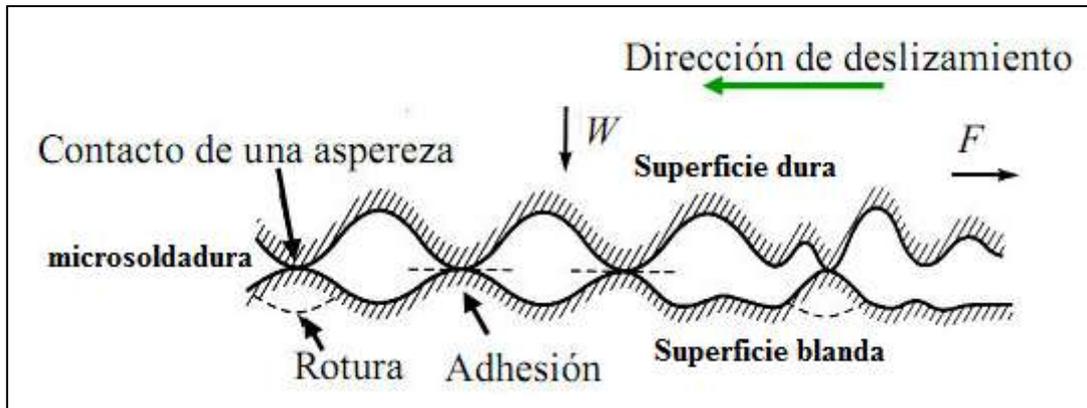
1.3.6.2. Tipos de desgaste

- Desgaste por adhesión

Cuando dos superficies son puestas en contacto bajo carga se pueden formar fuertes uniones adhesivas en los puntos en los que las asperezas entran en contacto. Se trata de un tipo de desgaste en el que se produce una alta transferencia de material de un elemento a otro, quedando fuertemente adherido en forma de soldadura en frío.

En general, la transferencia de materia suele darse del material más blando al más duro, debido a las microrugosidades de cada una, pudiendo darse de forma muy rápida. Esto puede producirse con lubricación o en seco.

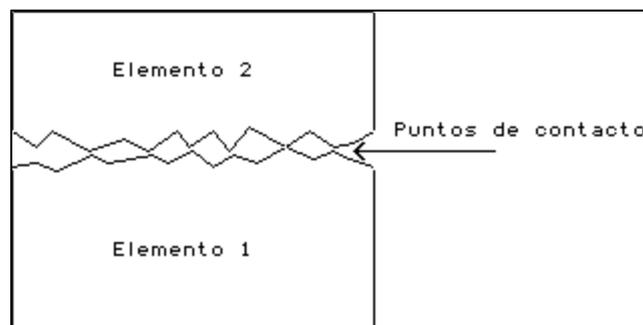
Figura 19. Proceso de desgaste por adhesión.



Para que se produzca desgaste por adhesión, la fractura de las uniones cuando prosigue el movimiento relativo, debe producirse en zonas subsuperficiales de uno o ambos materiales.

Esta forma de desgaste ocurre cuando dos superficies se deslizan una contra otra bajo presión. Los puntos de contacto (*figura 20*), donde ocurre el deslizamiento, llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, desgarrando al material de una superficie y transfiriéndolo a otra, lo que puede ocasionar posteriormente mayor daño.

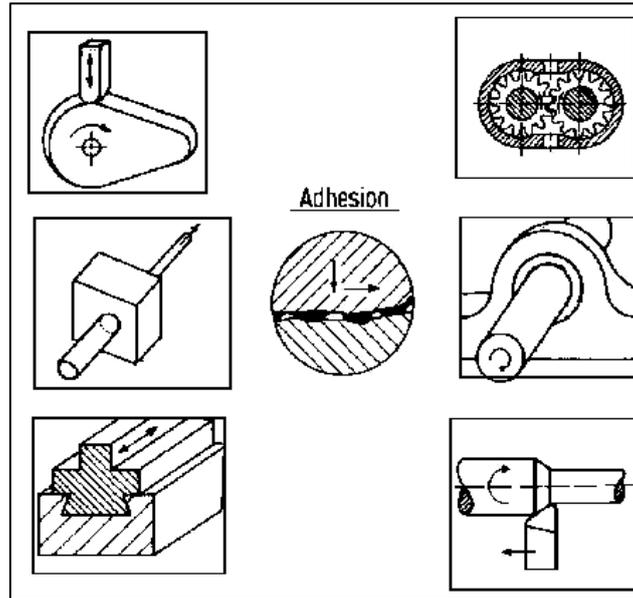
Figura 20. Puntos de contacto entre dos superficies.



En contraste con otros mecanismos de desgaste, en los cuales generalmente debe pasar un cierto tiempo hasta que alcancen magnitudes críticas que lleven a la destrucción del elemento que roza, el desgaste adhesivo puede producirse de forma rápida, dando lugar al gripado de piezas móviles en sistemas mecánicos. El desgaste por este mecanismo es severo, siendo el principal tipo de desgaste en cuanto a destrucción.

A continuación pueden verse diversos procesos donde se da el desgaste por adhesión.

Figura 21. Procesos industriales que sufren desgaste por adhesión.



Aunque durante el proceso de fricción, los picos de las superficies tengan la capacidad de deformarse elásticamente, no lo pueden hacer debido a que quedan soldadas a la superficie contraria y al seguir actuando la carga transmitida por el mecanismo hace que se fracturen dando lugar al desprendimiento de partículas o fragmentos metálicos de diferentes tamaños y a un aumento de energía en forma de calor, que incrementa la temperatura de operación, haciendo que las superficies que se encuentran en contacto se aproximen aún más conduciendo finalmente a que el mecanismo se detenga.

Se trata del desgaste más crítico, debido a la disminución de la película lubricante en el caso de lubricación fluida (ya sea por la presencia de contaminantes en el aceite como puede ser agua, gases, combustibles, etc.) o debido a una baja viscosidad o poca presión en el sistema. Sin embargo, un alto nivel de aceite, una alta viscosidad y una alta presión en el sistema de lubricación también pueden dar lugar al desgaste adhesivo debido a que el exceso de fricción fluida en el aceite incrementa la temperatura de operación, haciendo que las superficies metálicas sometidas a fricción se dilaten y rocen, rompiendo en un momento dado la película límite.

La única manera de evitar el desgaste adhesivo en el momento de la puesta en marcha de los mecanismos de un equipo es cuando se utiliza la lubricación hidrostática, pero en la práctica sería imposible y antieconómico colocárselo a todas las máquinas. Si

se eliminara el desgaste adhesivo en el momento de la puesta en marcha del equipo, la vida disponible de los mecanismos que lo constituyen sería mucho mayor que la esperada.

En la práctica se le añaden al lubricante aditivos como ácidos grasos, fósforo, azufre, cloro, bisulfuro de molibdeno, grafito, etc. para que tengan óptimas propiedades de funcionamiento.

- Desgaste por abrasión

Es la eliminación de material de la superficie en contacto por superficies duras en superficies de coincidencia, o con superficies duras que presentan un movimiento relativo en la superficie desgastada. Cuando es el caso de partículas duras, estas pueden encontrarse entre las dos superficies que se deslizan entre sí como se muestra en la *figura 22* o se podrían incrustar en cualquiera de las superficies.

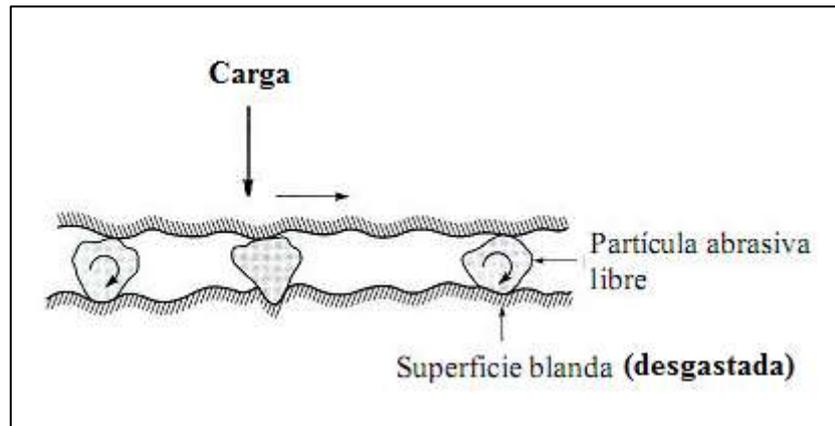
La diferencia entre desgaste abrasivo y desgaste por deslizamiento es el grado de desgaste entre los cuerpos involucrados, siendo mayor en el abrasivo.

Se trata de un tipo de desgaste en el que también se produce transferencia de material de un elemento a otro. Un ejemplo de abrasivo pueden ser las partículas sólidas como el Silicio, dan lugar a un importante desgaste abrasivo debido a la elevada dureza de este material.

Si las partículas son del mismo tamaño que el mínimo espesor de la película lubricante, éstas se encuentran entre las dos superficies y van moviéndose en el seno del lubricante, desplazándolo y removiendo la película límite y desprendiendo finalmente, material de ambas superficies. Cuando son de mayor tamaño, se fracturan, dando lugar a partículas del mismo tamaño que el mínimo espesor de la película lubricante y de un tamaño menor.

Es conveniente aclarar que este tipo de desgaste se puede presentar en estado seco o bajo la presencia de un fluido.

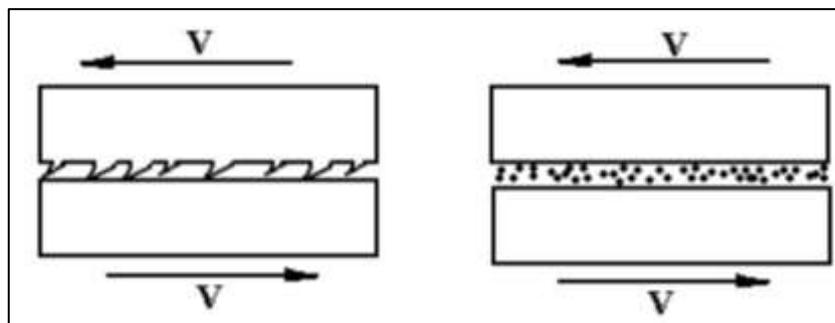
Figura 22. Proceso de desgaste por abrasión.



El desgaste se produce debido a la puesta en contacto de un material duro con otro más blando, en cuyo caso hablamos de “abrasión de dos cuerpos”. Sin embargo, existe otra forma de abrasión que se produce cuando el daño es producido por alguna partícula abrasiva ajena al contacto, a menudo contaminantes. En tal caso, hablamos de “abrasión de tres cuerpos”.

Se entiende generalmente como el daño a superficies deslizantes por la acción de partículas sólidas presentes en la zona del rozamiento, tanto si son externas (abrasión de tres cuerpos), como si se desprenden durante el proceso de rozamiento (abrasión de dos cuerpos). Estas partículas libres suelen ser muy duras, y en presencia de un movimiento tangencial, la superficie dura se deslizará formando surcos en la superficie blanda y produciendo desprendimiento de material en esta.

Figura 23. Desgaste abrasivo a dos cuerpos y Desgaste abrasivo a tres cuerpos.

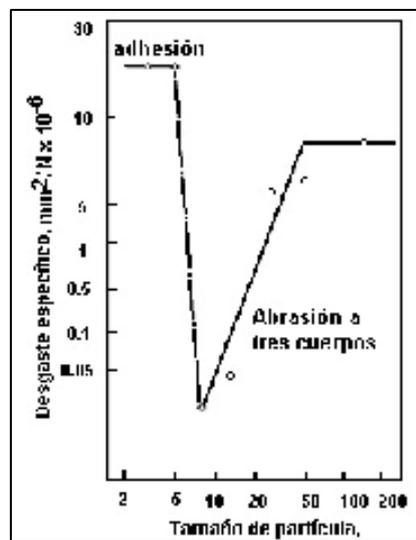


Este mecanismo de desgaste se da en presencia de partículas duras, y para evitar la abrasión, la dureza superficial debe ser mayor que la de las partículas abrasivas.

El mecanismo de adhesión es verificado para tamaños de partículas menores de 10 μm , que corresponden a tamaños característicos de microconstituyentes en materiales ferrosos (por ejemplo carburos en el acero AISI 52100) o partículas de desgaste que permanecen en el área de contacto, pero sin llegar a actuar como partículas abrasivas, pues el nivel de actuación de esas partículas para el sistema es aún bajo.

La figura siguiente muestra la influencia del tamaño de partícula generada durante el desgaste o inherente al sistema en la definición del mecanismo de desgaste operante.

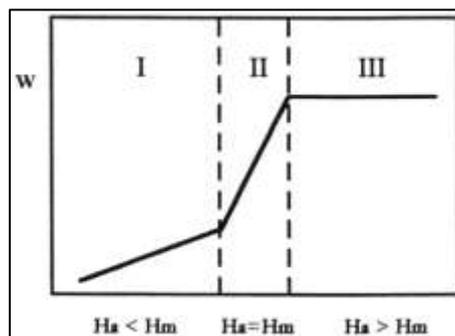
Figura 24. Variación del desgaste específico con el tamaño de las partículas (μm).



Para tamaños mayores que 10 μm , la variación de la tasa de desgaste sigue características frecuentemente vistas en sistemas abrasivos.

Existen pues varios regímenes de desgaste, en función de los parámetros H_a (dureza del abrasivo) y H_m (dureza del metal) tal y como se aprecia en la figura 25.

Figura 25. Zonas de desgaste abrasivo.



La zona I es la de desgaste bajo, la zona II, de transición, y la zona III, de alto desgaste.

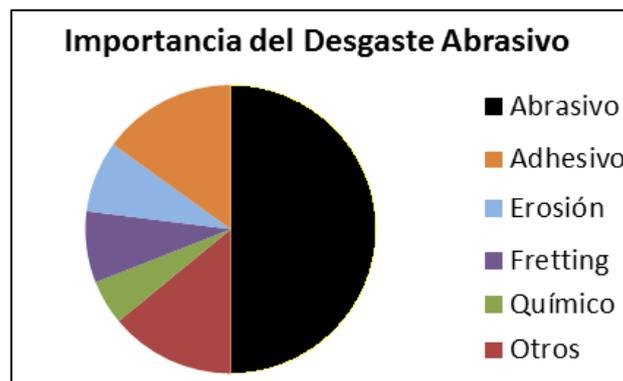
Esto lleva a que, para reducir la abrasión, la dureza del material, debe ser mayor que la dureza de las partículas abrasivas, con un factor de 1,3:

$$H_m = 1,3 \cdot H_a$$

Este tipo de desgaste constituye una de las causas más importantes de daño en elementos y maquinaria del sector minero, agroindustrial, de movimiento de tierra, etc.

En la siguiente gráfica comparativa se puede apreciar el interés que tiene el desgaste abrasivo dentro del total, llegando al 50% de las averías en la industria por motivos de desgaste.

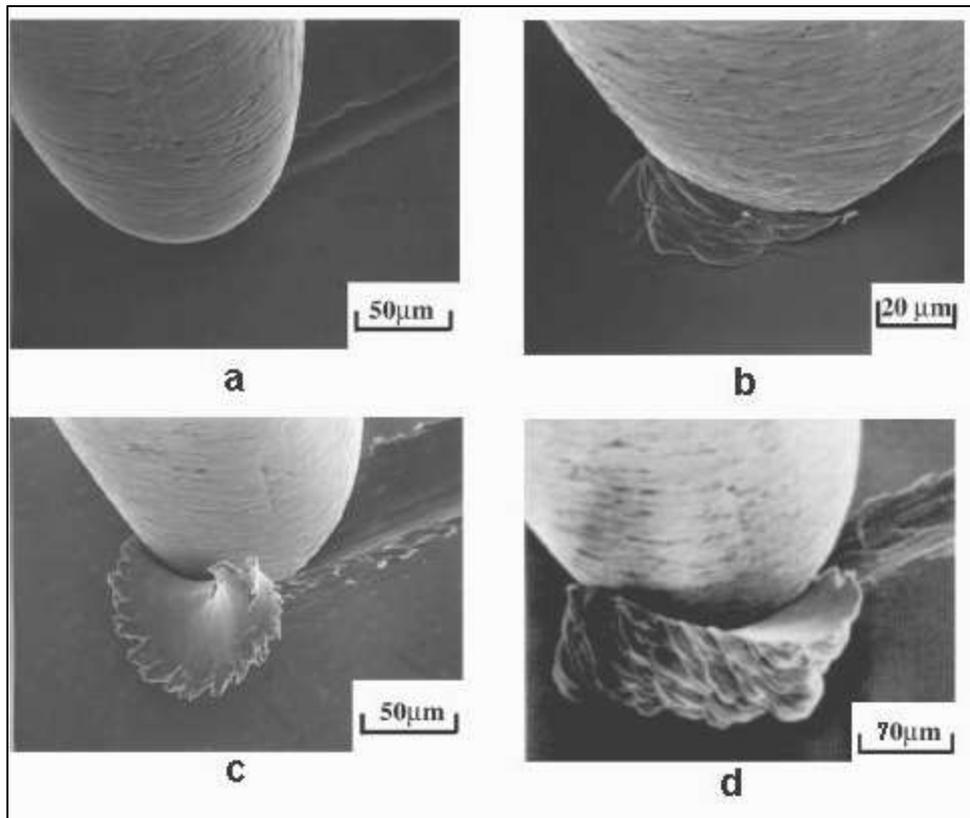
Figura 26. Tipos de desgaste según su importancia.



El mecanismo más efectivo de remoción de material en desgaste abrasivo para materiales dúctiles es el corte. Aunque en función de determinadas variables del sistema y propiedades de los materiales involucrados, la eficiencia en la remoción de material bajo este mecanismo puede ser atenuada. Cuando esto ocurre, se dice que está presente el mecanismo de microsurcado, donde la remoción de material solamente se dará por acciones repetidas de los abrasivos, llevando a un proceso de fatiga de bajos ciclos.

La figura 27 muestra diferentes apariencias de la superficie en función de la carga, aplicada provocadas por un penetrador esférico de diamante de un material dúctil, en las cuales se pasa de microsurcado para microcorte.

Figura 27. Transición de microsurcado a microcorte en una superficie.



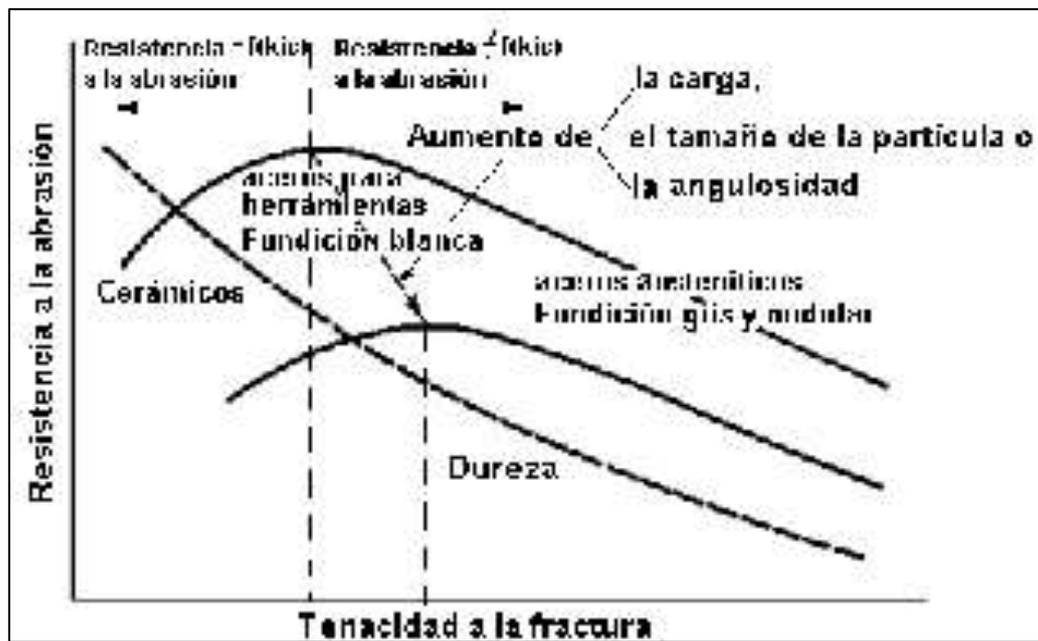
a) microsurcado; b) y c) formación de proas y d) microcorte.

La proporción de material del volumen del surco desplazado durante el proceso de abrasión de un material dúctil a los lados del surco, es decir la relación entre microsurcado y microcorte depende del ángulo de ataque de la partícula abrasiva.

Diversos autores discutieron el hecho, de que solo una parte del volumen del surco producido por partículas duras, es inmediatamente removido como partículas de desgaste fuera del material, el resto se localiza en el borde en forma de proa. En materiales con microconstituyentes de plasticidad limitada, el mecanismo de microcorte acaba por ser característico, o sea, para una severidad de desgaste baja, se evidencia el microsurcado y hay una transición para microfractura cuando alguna variable del sistema promueve aumento de severidad.

Este efecto puede ser visto en la *figura 28*.

Figura 28. Relación entre tenacidad a la fractura y resistencia al desgaste abrasivo en diferentes materiales.



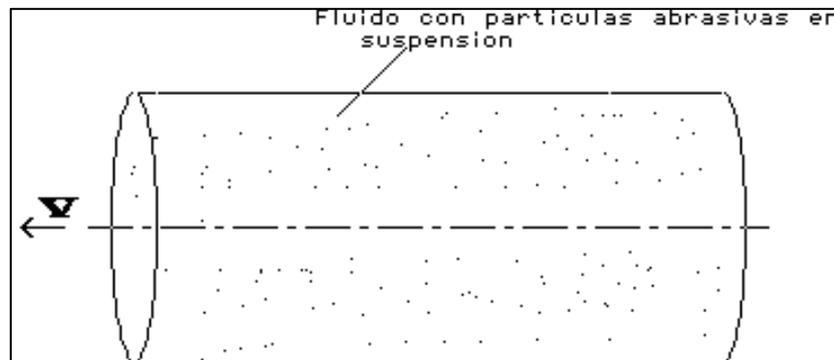
El desgaste abrasivo en un mecanismo se puede controlar filtrando el aceite de tal manera que se mantenga dentro del código de limpieza recomendado por la norma ISO 4406, es decir, que el tamaño de los sólidos presentes en el lubricante sea inferior al espesor mínimo de la película. En la actualidad no es posible eliminar totalmente el desgaste abrasivo ya que resulta imposible obtener lubricantes totalmente limpios.

- Desgaste por erosión

Se trata del daño provocado en una superficie por impactos repetitivos de partículas, que pueden ser de diferente naturaleza, tamaño y forma, generalmente inferiores al espesor de la capa de lubricante. Estas partículas externas inciden contra el material con una velocidad y un ángulo determinado, por lo que el desgaste solo es función de la velocidad y de la dureza de las partículas incidentes.

Este tipo de desgaste ocasiona pérdidas de material en la superficie por el contacto con un fluido que contiene en suspensión cierta cantidad de partículas abrasivas como se muestra en la figura 29, siendo esencial el movimiento relativo entre el fluido y la superficie, ya que la fuerza de las partículas, que son responsables del daño ocasionado, se aplica cinemáticamente.

Figura 29. Desgaste erosivo debido a la acción de un fluido con partículas abrasivas en suspensión.

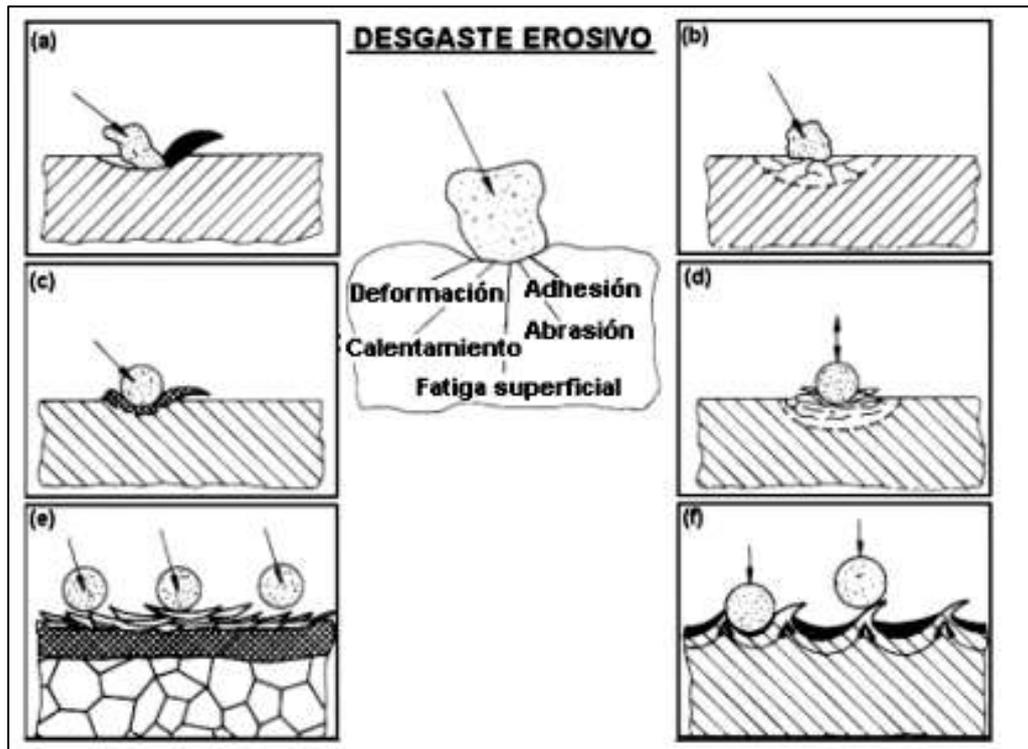


Este tipo de desgaste, se da, especialmente, en toberas de motores, turbinas de gas, tubos de escape, sistemas de bombeo, etc. Las teorías más modernas establecen que no se experimenta desgaste si el impacto entre las partículas y el material dan lugar a una interacción elástica.

En el desgaste erosivo es donde el movimiento relativo de las partículas sólidas es casi paralelo con las superficies erosionadas se denomina erosión abrasiva, mientras que la erosión en la que el movimiento relativo de las partículas es casi normal (perpendicular) a la superficie erosionada se conoce como erosión bajo impacto. Los materiales frágiles fallan por agrietamiento de las superficies cuando la fuerza de impacto es normal. Los materiales dúctiles, por el contrario, cuando son sometidos a ángulos de ataque del orden de 20° sufren importantes acciones de corte. Es por ello que en la industria se debe ser cuidadoso con el ángulo de incidencia de la partícula respecto de la superficie, y al estudiar los posibles recubrimientos de todos los componentes mecánicos que puedan sufrir erosión.

En la siguiente figura pueden observarse las distintas formas de actuación de partículas erosivas: (a) microcorte y micro-arado, (b) Agrietado superficial, (c) Desplazamiento de material (d) grietas por fatiga superficial y sub-superficial (e) Formación de pequeñas hojuelas y (f) Formación de pequeñas hojuelas por múltiples impactos.

Figura 30. Formas de actuación de partículas erosivas.



- Desgaste por fatiga superficial

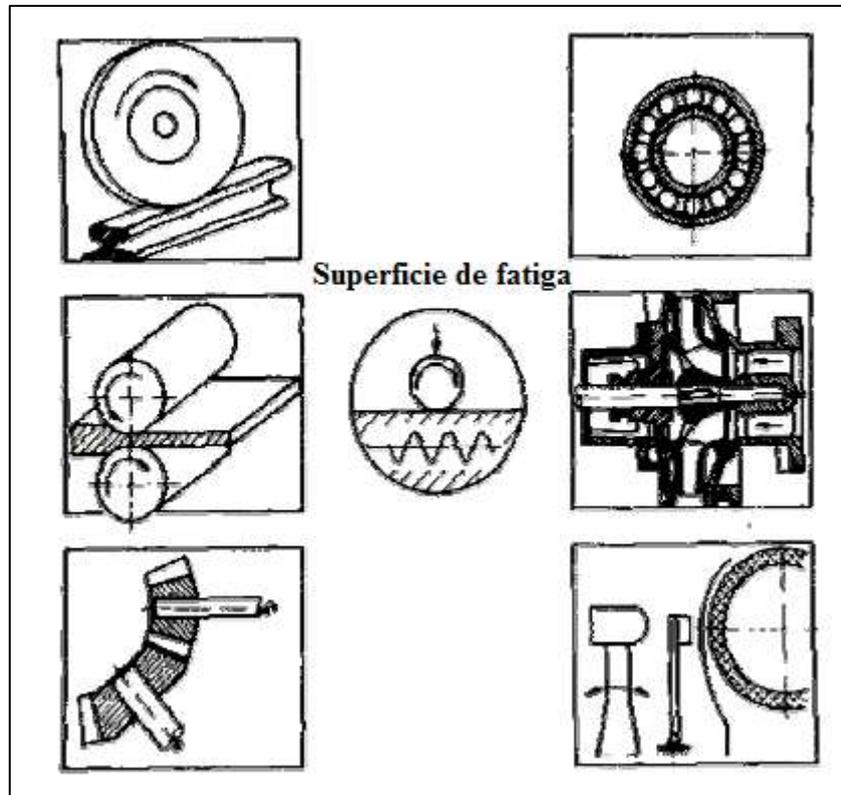
Se presenta como resultado de esfuerzos cíclicos que genera la carga al actuar en el punto donde se forma la película lubricante. Surge por concentración de tensiones mayores a las que puede soportar el material. Incluye las dislocaciones, formación de cavidades y grietas.

El desgaste por fatiga superficial aparece más rápidamente en los elementos que están sometidos a movimiento de rodadura que por deslizamiento debido a los mayores esfuerzos que soportan. Es el caso de rodamientos de bolas o rodillos, engranajes, levas y mecanismos impulsores de fricción.

Puede lograrse una mejoría en la vida de estos elementos, si trabaja a una carga de contacto baja y el método más preferido en la industria es producirle una capa endurecida a la superficie del material junto con un buen acabado superficial. Este tratamiento puede ser por carburación, nitruración o sulfurización y su objetivo es proporcionar una superficie con un alto límite de resistencia en una región vulnerable a la iniciación de grietas.

Aun así, es el único tipo de desgaste que no se puede evitar y el cual provoca que el componente lubricado se tenga que cambiar con el paso del tiempo.

Figura 31. Procesos industriales que sufren desgaste por fatiga.



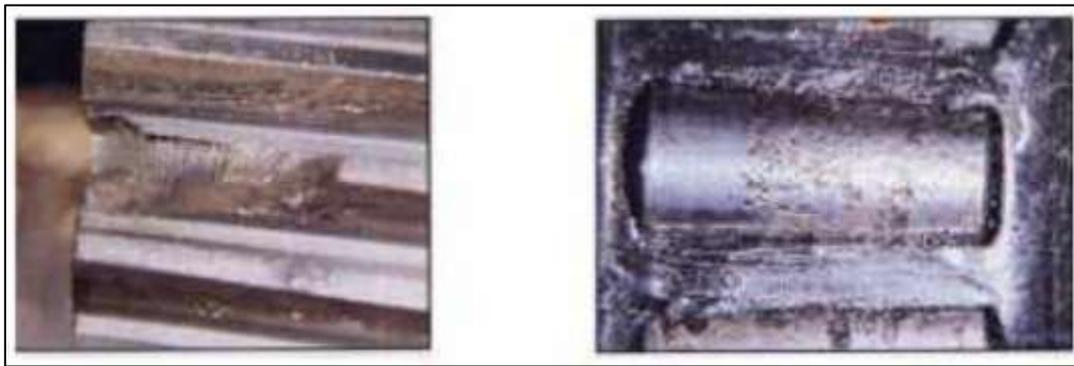
En el caso de la lubricación EHL, la fatiga de las rugosidades es más crítica que en lubricación fluida, debido a que la deformación de las rugosidades que inicialmente es del tipo elástica termina por ser plástica causando la rotura de dichas rugosidades.

Además, a la fatiga le afecta la temperatura, y su efecto se verá más pronunciado. En efecto, cuanto mayor sea la temperatura de operación del elemento lubricado, el desgaste por fatiga superficial es más acelerado debido a la modificación que sufre la curva esfuerzo-deformación del material que hace que el punto de fluencia se mueva hacia la izquierda y que por lo tanto para la misma condición de carga, el mecanismo quede trabajando en la zona plástica y no en la elástica. El fallo por fatiga superficial se presenta de manera típica después de millones de ciclos de deformación elástica y se acelera cuando se tienen temperaturas de operación por encima de los 50°C.

En el desgaste por fatiga, el deslizamiento, rodadura o impacto repetido varias veces, hace que el material próximo a la superficie experimente una carga cíclica. Como resultado de este ciclo de carga, las grietas se inician en estas regiones. Al continuar el ciclo de carga, las grietas se propagan e intersectan con la superficie y consigo mismas. Esta superficie desgastada además, si se le sigue aplicando una carga cíclica, provoca una pérdida progresiva del material de la superficie.

A continuación puede verse en la *figura 32* daños ocasionados por el desgaste por fatiga.

Figura 32. Engranajes y rodamientos sometidos a fatiga de contacto.



- Desgaste químico

Se produce si los efectos del desgaste mecánico se combinan con un desgaste cuyo origen es un agente químico externo, produciéndose pérdidas de material y a una degradación superficial mucho mayor que si se consideraran las contribuciones de ambos por separado. La corrosión o la oxidación son dos claros ejemplos del desgaste químico.

En tribología es habitual hablar de tribocorrosión como una reacción química que se produce al aplicar una carga a un contacto en presencia de un fluido lubricante.

En contacto con un medio lubricante acuoso, las partículas de desgaste abrasivo liberadas se pueden oxidar formando una interfase con mayor capacidad de desgaste, ya que combina la abrasión con la corrosión. Para que esta tribocorrosión se produzca es necesaria la presencia de agua, presente en el lubricante y oxígeno, presente en el ambiente.

El ataque químico o electroquímico a una superficie metálica forma una película superficial delgada que se puede deber a oxidación o a otras reacciones químicas. La película, que es más débil que el metal base, facilita la eliminación de las capas superficiales por abrasión y otras acciones de desgaste. Este proceso se va repitiendo y va penetrando, capa a capa, hacia el interior del material, ocasionando un mayor desgaste en el material.

- Desgaste fretting (o de contacto)

Este tipo de desgaste ocurre cuando dos piezas metálicas se deslizan una sobre la otra a alta frecuencia y pequeña amplitud (entre 1 y 100-300 μm), causando daño mecánico a una o ambas piezas. Es muy difícil de anticipar y los métodos de lubricación, en general, no resultan efectivos.

Un fenómeno asociado al daño por fretting, es la aparición de grietas en la región afectada, lo que ocasiona reducción de la resistencia a fatiga del material.

Figura 33. Elemento sometido a desgaste fretting.



- Desgaste por corrosión

En esta forma de desgaste, las reacciones químicas o electroquímicas con el medio ambiente contribuyen significativamente en la velocidad del desgaste.

Está ocasionado por la influencia del ambiente (presencia de humedad), seguido de otros tipos de desgaste como abrasión, fatiga o erosión que eliminan las capas de óxido que se van formando. Puede ser consecuencia del ataque químico de los ácidos débiles que se forman en el proceso de degradación normal del aceite, de la contaminación de éste con agua o con ácidos del medio ambiente o bien con los ácidos

fuerzas debidos a la descomposición del aceite cuando está sometido a altas temperaturas.

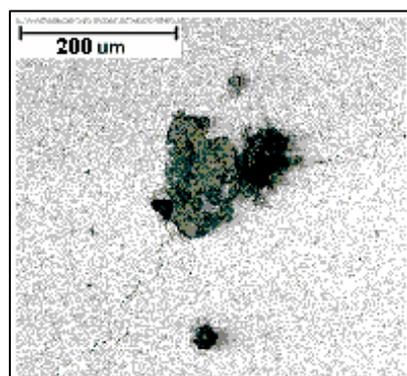
El desgaste corrosivo se puede evitar si el aceite lubricante se cambia dentro de los intervalos recomendados, para lo cual, si no se conoce, se le analiza la acidez del aceite mediante la prueba del Número Ácido Total (TAN) o Número de Neutralización (NN).

El desgaste corrosivo se manifiesta inicialmente por un color amarillento y luego rojizo de las superficies metálicas, seguido del desprendimiento de pequeñas partículas que cada vez aumentan su concentración hasta que finalmente causan el desgaste por erosión y por abrasión de las superficies sometidas a fricción. Por otro lado los pequeños cráteres que dejan las partículas que se desprenden al unirse forman grietas que pueden producir finalmente la rotura de la pieza.

El desgaste corrosivo es muy frecuente en las coronas de bronce del reductor sinfín-corona cuando se utilizan en su lubricación aceites con aditivos de extrema presión del tipo fósforo, cloro o azufre y hay presencia de agua en el aceite. También está presente en los motores de combustión interna debido a que durante el proceso de combustión se genera un buen número de productos gaseosos como el CO, CO₂, H₂O, NO_x y SO_x, halógenos, etc., los cuales tienen un carácter muy ácido y en presencia de agua se comportan de forma corrosiva en los metales.

Todos estos mecanismos de desgaste pueden actuar, y a menudo lo hacen, en presencia de un lubricante. Además, no son procesos excluyentes, sino que pueden aparecer de forma simultánea.

Figura 34. Detalle de desgaste corrosivo.



- Desgaste por oxidación

El desgaste aparece al arrancarse la capa de óxido como resultado del contacto entre las asperezas. Sin embargo, el óxido vuelve a aparecer en estas áreas desnudas de la superficie, pero vuelve a separarse de esta como consecuencia del contacto entre las asperezas.

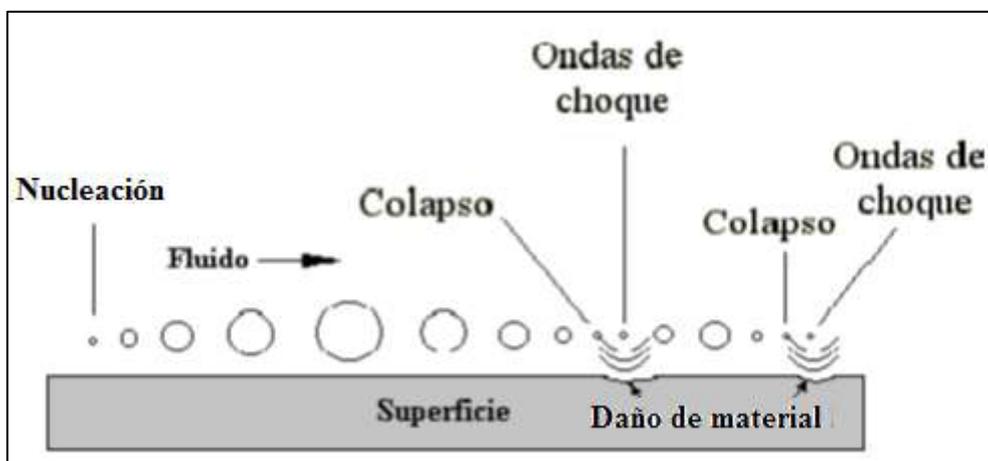
- Desgaste por cavitación

Es el fenómeno que se presenta cuando las burbujas de vapor de agua que se forman en el aceite, al circular éste a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, “explotan” al llegar nuevamente a una región de mayor presión como resultado del cambio de estado de vapor a líquido. Si las burbujas “explotan” cerca de las superficies metálicas darán lugar a presiones localizadas muy altas que ocasionarán picaduras en dichas superficies.

La cavitación generalmente va acompañada de ruido y vibraciones. El desgaste por cavitación se puede evitar incrementando la presión en el sistema o utilizando aceites con presiones de vapor bajas a altas temperaturas.

Es un tipo de desgaste que se produce especialmente en instalaciones hidráulicas, en partes como medidores de caudal, válvulas y turbomáquinas entre otros. La entrada a bombas centrífugas y salida en turbinas suelen ser zonas donde es bastante posible que se produzca cavitación, donde la presión es más baja.

Figura 35. Desgaste por cavitación.



- Desgaste por corrientes eléctricas

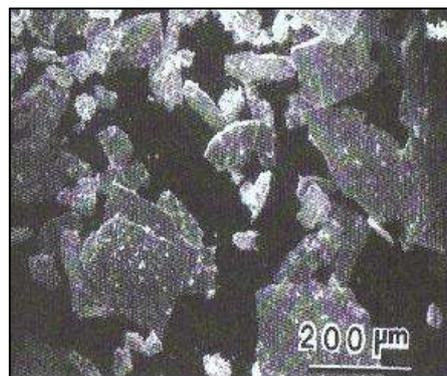
Se presenta por corrientes eléctricas, cuyo origen pueden ser corrientes parásitas u otras fuentes externas, que pasan a través de los mecanismos de un componente equipo lubricado y cuya toma a tierra está defectuosa o no la tiene causando en ellos picaduras que los pueden dejar inservibles. Este puede ser el caso de los rodamientos de los motores eléctricos y de los cojinetes lisos de turbinas de vapor, gas, hidráulicas, generadores y compresores centrífugos.

1.3.6.3. Tipos de partículas de desgaste

Se pueden clasificar las distintas partículas según su morfología:

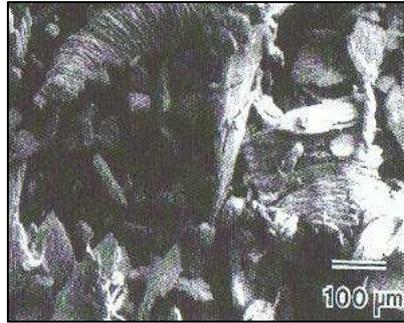
- Morfología plana: Partículas delgadas de desgaste, en forma de placa o de tipo hojuela se encuentran comúnmente tanto en seco como en presencia de un lubricante. Estas partículas se producen como resultado de un contacto con carga seguido de una descarga produciendo fatiga. Como resultado se nuclea y se propagan grietas y/o deformaciones plásticas en los puntos de contacto de ambas superficies.

Figura 36. Partículas de desgaste con morfología plana de Cu-Be.



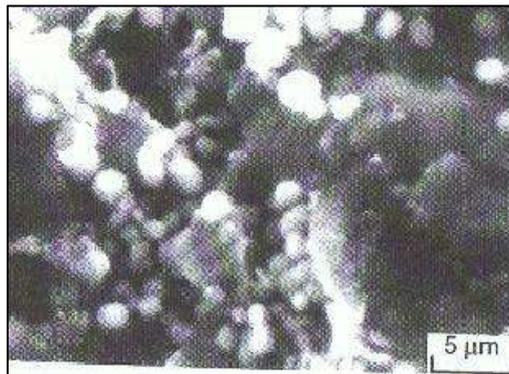
- Morfología en forma de cinta: Partículas con forma de cinta o cortadas usualmente también presentan una morfología curvada y rizada. Son resultado de una deformación plástica y son ocasionadas cuando se desprenden del borde de las irregularidades que presentan las superficies en contacto. Están producidas por asperezas afiladas o partículas abrasivas que desgastan la superficie del material.

Figura 37. Partículas de desgaste con morfología de cinta de Acero AISI 304.



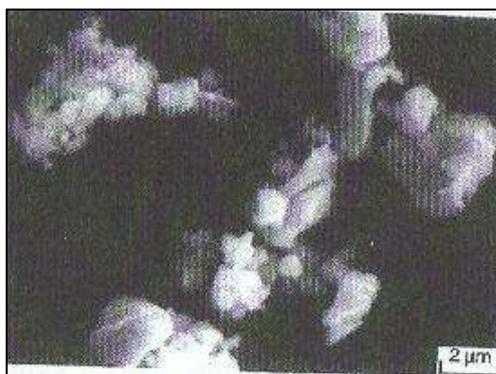
- Morfología esférica: Las partículas de desgaste que no escapan del contacto de ambas superficies tienden a convertir su morfología en morfología esférica por efecto de las rotaciones entre las superficies. Este tipo de partículas de desgaste no son muy comunes.

Figura 38. Partículas de desgaste con morfología esférica.



- Morfología Irregular: La gran mayoría de partículas de desgaste son de este tipo. Se trata de partículas arrancadas y transferidas en el proceso de desgaste adhesivo y son fracturadas de la superficie de contacto.

Figura 39. Partículas de desgaste con morfología irregular de acero austenítico.



1.3.6.4. Situación actual del desgaste

Todos estos mecanismos de desgaste pueden actuar, y a menudo lo hacen, en presencia de un lubricante. Además, no son procesos excluyentes, sino que pueden aparecer de forma simultánea.

Frecuentemente, el daño superficial está generado por diferentes micromecanismos, que actúan en etapas consecutivas, alterando la superficie. El daño observado es el efecto acumulado, a macroescala, de dichos micromecanismos.

Para combatir el desgaste de aparatos en los que operan distintos mecanismos de desgaste, los esfuerzos deberían localizarse en el mecanismo que daña la mayor fracción de área superficial y no en el mecanismo que produce la mayor huella o raya individual, ya que se obtiene un volumen de partículas de desgaste superior a la raya individual.

Junto a la corrosión, es el desgaste el que genera las mayores pérdidas económicas en la industria. El desgaste tiene un tremendo efecto en la industria, habiéndose estimado el coste de los problemas producidos por el desgaste, solamente en EE.UU., en 8 millones de dólares. Esto es debido a que el desgaste determina la vida útil de numerosos equipos como motores de automóvil, articulaciones artificiales y frenos de aeronaves.

Existen otras razones que impulsan el conocimiento de los diferentes tipos de desgaste, tales como la sistematización de procedimientos, automatización de los cálculos, valoración de la forma y del contenido, cambio de concepto (paso del modelo determinístico al probabilístico), optimización entre los materiales y el medio ambiente, funcionalidad, estética, intercambiabilidad, confiabilidad de su vida de servicio, reciclaje de los materiales al final de su vida, etc. También las micromáquinas y microensayos están impulsando la ingeniería buscando desarrollos más eficaces y eficientes con el fin de obtener un mayor beneficio económico y rendimientos superiores.

Los principales problemas del desgaste en la industria son el movimiento erróneo de los mecanismos lubricados, altos valores de vibración e incremento en los niveles de ruido, elevadas temperaturas de operación, mayor consumo de repuestos por incremento del mantenimiento correctivo, reducción significativa de la producción por

paros de maquinaria, un mayor consumo de energía para realizar la misma cantidad de trabajo útil y posibilidades de accidentes ante el peligro de roturas de componentes de máquinas.

1.3.6.5. *Relación entre fricción y desgaste*

La fricción y el desgaste son dos fenómenos que están relacionados, debido a la influencia que puede producir uno sobre otro.

Como ya se ha comentado, el fenómeno de la fricción está relacionado con el contacto superficial, donde son importantes las condiciones de carga además de la geometría y propiedades.

El desgaste, según lo visto, también se considera una respuesta integral del sistema y depende de muchos factores, que aunque no son equivalentes, se trata de prácticamente los mismos factores que en la fricción, aunque ambos parámetros son independientes.

Es decir, el desgaste puede influir en la fricción, por ejemplo mediante un cambio de rugosidad, y la fricción puede influir en el desgaste, por ejemplo mediante un efecto de calentamiento o de esfuerzos de tracción.

1.4. *LÍQUIDOS IÓNICOS*

1.4.1. Definición

Se pueden definir los líquidos iónicos (LIs) como fluidos compuestos exclusivamente por iones. Se trata de sales formadas por iones muy asimétricos y de gran tamaño por lo que las fuerzas atractivas catión-anión son más débiles que las fuerzas que intervienen en las sales iónicas convencionales (sales fundidas). Basta un pequeño aporte de energía para separar los aniones y los cationes que configuran el sólido y transformarlo en un líquido. Este pequeño aporte se logra cuando se expone a temperaturas próximas a las del ambiente, por lo que se consideran líquidos iónicos a aquellas sales con una temperatura de fusión inferior a la de ebullición del agua (además de otras propiedades), a diferencia de otras sales como el cloruro sódico, donde se

necesita aportar una gran cantidad de energía (hay que calentarlo a temperaturas superiores a 800°C) para lograr la separación de los iones que lo componen.

Estas sales fundidas son líquidos que están constituidos por iones pero, debido a su elevada temperatura de fusión, gran poder de corrosión y alta viscosidad, no pueden utilizarse como fase líquida para efectuar reacciones químicas. Por esta razón, el término de líquido iónico no se utiliza para designar a las sales fundidas, a pesar de que, de hecho, sean líquidos iónicos.

1.4.2. Composición de los LIs

Los líquidos iónicos están formados, en su mayoría, por un catión orgánico y un anión orgánico o inorgánico, por lo que el número de combinaciones de LIs es inmenso (del orden de 10^{18} combinaciones posibles) y como consecuencia de esto, las propiedades de casi la totalidad de ellos están aún por determinarse. Autores como C. Austen Angell, Younes Ansari and Zuofeng Zhao han estudiado que debido a la inmensa cantidad de líquidos iónicos, continuarán expandiéndose sin un final próximo. Se espera en los próximos años que, debido a los avances en nuevas técnicas como la microscopía electrónica, cromatografía y bioquímica, los líquidos iónicos sean reconocidos como uno de los grandes logros de la ciencia en el siglo XXI.

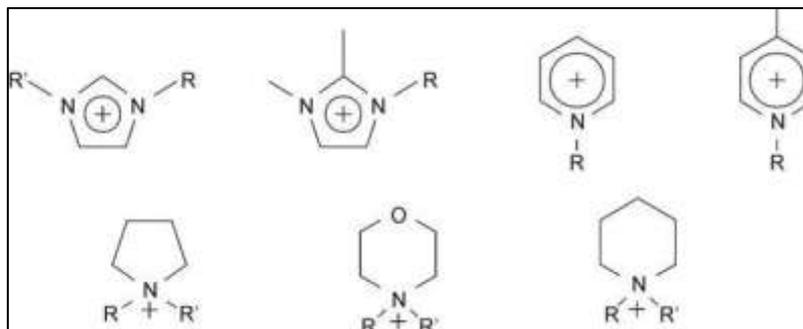
Al disponer de un gran número de aniones y de cationes para diseñar los líquidos iónicos se puede elegir la combinación más apropiada para que se adapte a las exigencias de una determinada aplicación. El diseñador del líquido iónico dispone de un componente, el catión, principal responsable del comportamiento químico y de otro, el anión, que aporta la mayor parte de las propiedades físicas.

Existen dos tipos de LIs:

- Líquidos iónicos apróticos (*Aprotic Ionic Liquids, AILs*)

Se trata de los más antiguos o clásicos. Su estructura es la de un catión voluminoso, aromático, con presencia de nitrógeno o fósforo en el anillo, como los que se observan en la *figura 40* y la de un anión (orgánico o inorgánico) como los de la *figura 41*, como halógenos, sulfatos y fosfatos, amidas, etc.

Figura 40. Tipos de cationes en los líquidos iónicos.



R y R' son cadenas orgánicas lineales: Etil, Propil, Butil, Pentil, Hexil, etc.

Figura 41. Tipos de aniones en los líquidos iónicos apróticos.

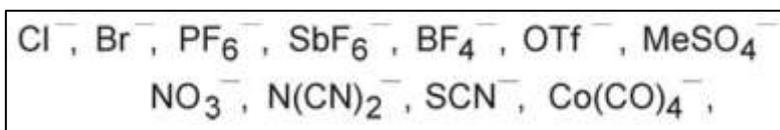
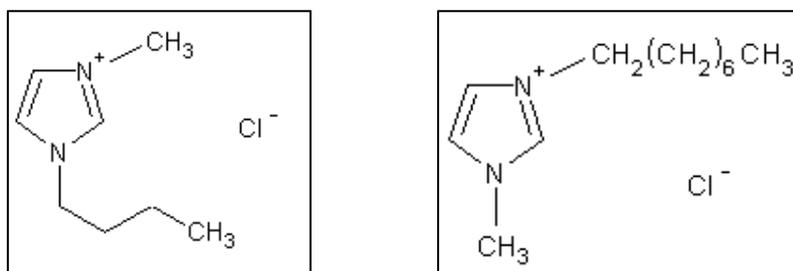


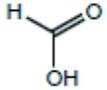
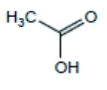
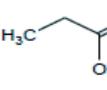
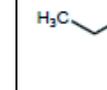
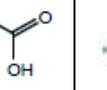
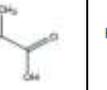
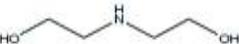
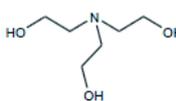
Figura 42. Ejemplos de líquidos iónicos apróticos, BMIM [Cl] izq. y OMIM [Cl] der.



- Líquidos iónicos próticos (*Protic Ionic Liquids, PILs*)

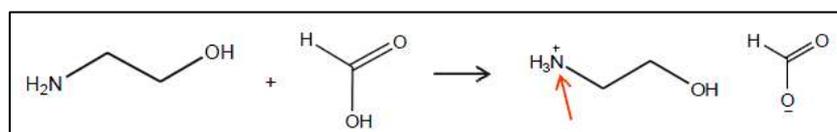
Se trata de los líquidos iónicos más novedosos. Están formados por la combinación de un ácido y base, de Bronsted. El catión puede ser, o no, el mismo que para los apróticos, cambiándose el anión, que tendrá presencia de oxígeno. En la siguiente tabla pueden verse algunos de los tipos de líquidos iónicos próticos que se pueden sintetizar.

Tabla 2. Algunos tipos de líquidos iónicos próticos.

<i>Líquidos Iónicos Próticos</i>	Ácido fórmico	Ácido acético	Ácido propanoico	Ácido butírico	Ácido isobutírico	Ácido pentanoico
						
Monoetanolamina 	MEA-FOR	MEA-ACE	MEA-PROP	MEA-BUT	MEA-ISOBUT	MEA-PEN
Dietanolamina 	DEA-FOR	DEA-ACE	DEA-PROP	DEA-BUT	DEA-ISOBUT	DEA-PEN
Trietanolamina 	TEA-FOR	TEA-ACE	TEA-PROP	TEA-BUT	TEA-ISOBUT	TEA-PEN

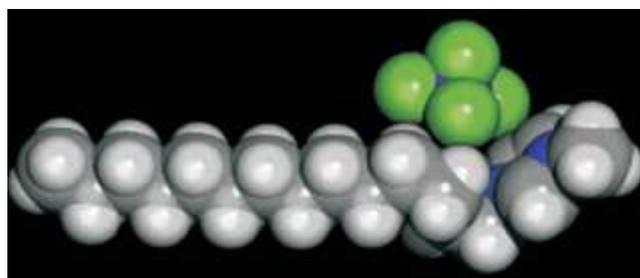
En la siguiente figura puede verse la síntesis de un líquido iónico.

Figura 43. Síntesis de un líquido iónico prótico (Formiato de monoetanolamina, MEA-FOR)



Y en la siguiente imagen puede verse una molécula de un líquido iónico.

Figura 44. Estructura de la molécula (C_{14} -mim)(PF_6)



J. D. Holbrey, K. R. Seddon, "Ionic liquid" Clean Products and Processes, 1(1999) 223-236

1.4.3. Propiedades de los LIs

Todas las propiedades que se muestran a continuación de líquidos iónicos son muy sensibles a la pureza del mismo, por lo que los resultados obtenidos pueden variar significativamente en un mismo líquido iónico.

- Bajo punto de fusión

Como ya se ha dicho anteriormente, el bajo punto de fusión equivale a que estos compuestos a temperatura ambiente se encuentren en estado líquido. Se puede disponer de líquidos iónicos en un intervalo cercano a los 300° ya que la temperatura de fusión en este tipo de compuestos varía desde 90°C hasta 200°C.

- Presión de vapor muy baja

La baja presión de vapor junto al amplio intervalo de temperatura de los líquidos iónicos constituye un gran atractivo para que sustituyan a los compuestos orgánicos volátiles como disolventes y permitan desarrollar una química más limpia y sostenible debido a su escasa o nula volatilidad. Debido a esta baja presión de vapor se pueden eliminar los productos de reacción en un proceso industrial por destilación sin que sea necesario recurrir a complejas y costosas técnicas de purificación.

- Inflamabilidad y corrosión

En su mayoría, no son explosivos, inflamables ni corrosivos. Sin embargo, algunos líquidos iónicos son reactivos y corrosivos (por ejemplo los obtenidos a partir de tricloruro de aluminio), pero la gran mayoría son mucho más seguros que los disolventes orgánicos.

Se consideran compuestos no inflamables debido a su baja presión de vapor. Su naturaleza no inflamable hace que disminuya considerablemente el riesgo de fuegos e incendios que presentan los disolventes orgánicos utilizados en la industria.

- Hidrofobicidad

Algunos líquidos iónicos son sensibles al agua, sufriendo modificaciones en su estructura o en su comportamiento, creándose subproductos debido al aumento de la

velocidad de las reacciones secundarias como consecuencia de la presencia de agua en el medio. Existe una fuerte relación entre la hidrofobicidad y el número de átomos de flúor y algunos líquidos iónicos son inmiscibles en agua en presencia de otros disolventes, como el alcohol.

- Estabilidad térmica a altas temperaturas

La estabilidad térmica se establece como la temperatura a la que se inicia el cambio en la curva de análisis termo gravimétrico (TGA). Se utiliza este criterio por el hecho de ser reproducible y sencillo. La descomposición térmica define el límite superior del intervalo de temperatura en el que pueden utilizarse.

Muchos líquidos iónicos usados como disolventes son tan estables que el límite superior de temperatura no constituye ningún obstáculo para su empleo como medio para efectuar reacciones químicas. En general, la temperatura a la que tiene lugar reacción química para optimizar sus resultados es bastante más pequeña que la temperatura a la que se inicia el proceso de descomposición del líquido iónico. Esta propiedad es una condición imprescindible para su utilización como medio de reacción.

- Estabilidad química

En cuanto a su carácter químico, a pesar de su naturaleza iónica, estos disolventes no reaccionan con las diferentes especies químicas presentes en el medio de reacción, con lo que se evita la alteración del proceso. Por tanto, es posible utilizar un líquido iónico como medio de reacción y alcanzar resultados similares a los que se obtienen con disolventes convencionales pero operando en condiciones más ventajosas. Esta característica permite disminuir el consumo de energía con el consiguiente descenso de la carga ambiental y ahorro económico.

- Viscosidad variable

La viscosidad es una propiedad que afecta a la difusión de los solutos y a importantes parámetros técnicos de la operación como la agitación de la mezcla y el bombeo de los fluidos. Los líquidos iónicos son, por su propia naturaleza iónica, mucho más viscosos que los medios de reacción convencionales.

El efecto de la temperatura en la viscosidad es mucho más complicado en los líquidos iónicos. También esta propiedad se modifica con el número de carbonos del radical del anillo aromático. La viscosidad aumenta al aumentar la longitud de la cadena del sustituyente del imidazol. Por ejemplo, la viscosidad dinámica de (bmim)(PF₆) es 0.33 Pa·s a 20°C. En general, la viscosidad de los líquidos iónicos varía entre 0.01 - 1 Pa·s.

Como son bastante viscosos comparados con los disolventes orgánicos, su separación de los compuestos orgánicos es mucho más rápida que la separación que se produce entre dos disolventes de densidad similar.

- Importante disolvente

Es un gran disolvente, tanto de partículas polares, no polares, orgánicas, inorgánicas e incluso materiales poliméricos. La forma de abordar la polaridad en disolventes moleculares no puede extrapolarse a los líquidos iónicos porque es preciso tener en cuenta las complejas interacciones entre soluto y disolvente mediante coeficientes que expresen la contribución de cada una de ellas. En general, puede decirse que estos líquidos son disolventes moderadamente polares.

- Densidad

La densidad de los líquidos iónicos puede modificarse cambiando la longitud de la cadena del sustituyente del anillo imidazólico. A medida que crece el número de carbonos de la cadena disminuye la densidad. Por ejemplo, (bmim)(PF₆) tiene una densidad de 1.370 kg/m³ a 20°C. En general, las densidades llegan hasta 1.6 veces la del agua.

- Conductividad eléctrica

Poseen una alta conductividad eléctrica, σ (Siemens por metro, S/m), superior a $10^{-3} S/m$, variando esta con la temperatura.

- Capacidad calorífica

Poseen una buena capacidad calorífica, entre 300-550 J/mol·K. En general, cuanto más grande es el catión, mayor es la capacidad calorífica del líquido iónico.

- Baja toxicidad

Debido a la enorme diferencia de volatilidades entre los líquidos iónicos y otros elementos, provocado por la presión de vapor tan baja, ocasiona que las emisiones atmosféricas sean inferiores, produciendo una ventaja medioambiental. Además son reutilizables, otra ventaja significativa para el medio ambiente, ya que se disminuye la cantidad de residuos en comparación con los aceites sintéticos.

Sin embargo, cabe destacar que no todos los líquidos iónicos son en realidad respetuosos con el medioambiente. Algunos pueden descomponerse formando elementos como el ácido fluorhídrico, HF, muy tóxico y las consecuencias de los líquidos iónicos en la naturaleza están aún por determinarse.

- Buenos lubricantes

Los líquidos iónicos poseen buenas propiedades cuando son usados en lubricación, haciendo que el desgaste sea menor que con el uso de aceites sintéticos. Además, dadas sus singulares propiedades, son aptos para ser usados en aplicaciones a alta presión y en procesos mecánicos.

- Incoloros

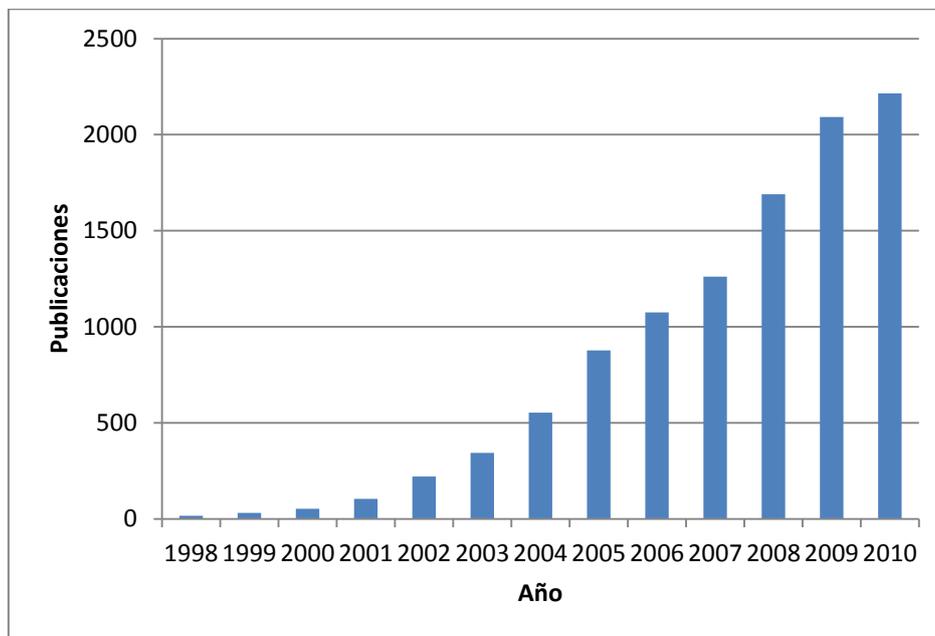
1.4.4. Historia de los LIs

La bibliografía científica reserva el término líquido iónico para designar a los compuestos que están formados exclusivamente por iones y que son líquidos a temperaturas moderadas (puede considerarse que su límite superior es del orden de los 100°C). Existen referencias de este tipo de compuestos desde 1914 pero es en la segunda mitad del siglo XX cuando Hurley y Weir descubren que se pueden sintetizar sales que son líquidas a temperatura ambiente.

Este descubrimiento permaneció mucho tiempo como una curiosidad sin suficiente interés para los químicos hasta que se van conociendo sus complejas propiedades como líquidos y se inician los estudios electroquímicos.

En la actualidad, sin embargo, el interés de los líquidos iónicos va en aumento, y prueba de ello es el creciente número de estudios y publicaciones al respecto, como puede observarse en la siguiente figura.

Figura 45. Número de publicaciones anuales sobre líquidos iónicos.



Fuente: ISI Web of Knowledge

Como puede apreciarse, se ha empezado a investigar sobre líquidos iónicos bien entrado el siglo XXI, con un crecimiento exponencial, ya que medida que se van realizando estudios de diferentes reacciones químicas en líquidos iónicos se va confirmando que su comportamiento es diferente al observado en medios tradicionales.

La atención que despertaron los primeros resultados de las reacciones en líquidos iónicos impulsó la síntesis de este tipo de compuestos, pues, al principio, los líquidos iónicos fueron desarrollados para ser usados como electrolitos debido a su escasa volatilidad, alta estabilidad frente a aumentos de temperatura y punto de fusión bajo. En la actualidad, sin embargo, se ha considerado el uso de los líquidos iónicos como una clase nueva de disolvente.

La industria química, como cualquier industria, responde a la demanda de soluciones para satisfacer las crecientes necesidades materiales de nuestras sociedades aportando nuevos productos y desarrollando nuevos procedimientos de fabricación,

pero para que estas respuestas sean válidas es necesario que superen las restricciones que actualmente condicionan esta actividad industrial: el aumento de la competencia empresarial y el reconocimiento de la limitada capacidad del entorno para limpiar el medioambiente de las acciones humanas. Así pues, para encontrar soluciones a este desarrollo sostenible, obliga a tener en cuenta numerosas variables, como económicas, sociales y ambientales.

La singularidad de las propiedades de los líquidos iónicos ha atraído la atención de científicos y técnicos y ha impulsado su estudio con el objetivo de explorar las posibilidades de este tipo de compuestos como un nuevo medio líquido a utilizar en la industria.

En pocas décadas en las que se ha trabajado en la síntesis de líquidos iónicos se ha logrado disminuir la temperatura necesaria para conseguir un líquido formado por iones desde los 800°C, el procedente de la fusión de cloruro sódico, hasta temperaturas inferiores a los -90°C.

Los líquidos iónicos a temperatura ambiente aportan un nuevo medio líquido para estudiar las reacciones químicas y para utilizarlo en la fabricación de productos en las instalaciones químicas. Esta adaptación implica que debe permanecer líquido a la temperatura de operación y que no debe reaccionar, alterar o alterarse, en presencia de los demás elementos.

1.4.5. Utilidades de los LIs

La industria actual está sometida a una gran presión social para que aporte soluciones a los problemas medioambientales que ocasionan los distintos fluidos utilizados en la actualidad, caracterizados por su volatilidad, toxicidad e inflamabilidad.

Es pues, de vital importancia, conocer el comportamiento y encontrar aplicaciones a los líquidos iónicos, ya que como se ha comentado antes, poseen mejores propiedades medioambientales que otros fluidos que se utilizan. La principal utilidad de estos líquidos, es que pueden sustituir a los disolventes orgánicos convencionales en procesos de separación y reacciones bifásicas.

Además, la presión de vapor de los líquidos iónicos a temperaturas y presiones moderadas es tan pequeña que pueden considerarse compuestos no volátiles, lo cual implica un importante desarrollo e investigación en la llamada “*Química Verde*” o “*Green Chemistry*”, para encontrar en la familia de los líquidos iónicos, fluidos que puedan sustituir a los compuestos orgánicos volátiles y desarrollar unos productos y procesos químicos más limpios y sostenibles.

Uno de los problemas ambientales de los disolventes orgánicos es su elevado potencial de contaminación de la atmósfera debido a su presión de vapor y utilizando líquidos iónicos se evitará la contaminación atmosférica debido a la enorme diferencia de volatilidades entre estos elementos.

Los líquidos iónicos tienen multitud de aplicaciones, y en muchas ramas, tal y como puede verse a continuación.

Tabla 3. Aplicaciones de los líquidos iónicos en las distintas ramas industriales.

<i>Ramas</i>	<i>Aplicaciones</i>			
<i>Ingeniería</i>	Uso de recubrimientos	Lubricantes	Plastificantes	Agentes dispersantes
<i>Fisicoquímica</i>	Mezclas líquido-líquido		Mezclas líquido-gas	
<i>Electroquímica</i>	Baterías	Recubrimientos metálicos	Paneles solares	Celdas de combustible
<i>Bioprocesos</i>	Medicina	Cosmética		Pesticidas
<i>Métodos de análisis</i>	Cromatografías	Espectroscopía	Índices de refracción	

Uno de estos ejemplos del uso de los líquidos iónicos se encuentra en la industria petrolífera, en el llamado proceso DIFASOL, desarrollado y comercializado por el Instituto Francés del Petróleo (IFP) que utiliza líquidos iónicos para efectuar reacciones entre alquenos. Este proceso transforma, propenos y butenos en hexenos y octenos ramificados, productos más escasos y de mayor valor, utilizando un líquido iónico para tener disuelto el catalizador de níquel, pero además, el proceso DIFASOL se caracteriza porque la actividad del catalizador en el líquido iónico es muy superior a la actividad que se puede obtener sin disolvente y permite una fácil separación de los componentes formados.

Otro claro ejemplo de la utilidad de estos líquidos iónicos es la utilización como lubricantes en motores diesel (Jun Qu, Peter J. Blau, Sheng Dai, Huimin Luo, Harry M. Meyer), obteniéndose rendimientos tanto en forma pura como mezclado con aceite, mayores a los de un aceite típico de motor (15W40). Estos líquidos iónicos reducían la fricción y el desgaste en un 17-55% 21-34% y mediante la adición de un 5% en volumen de líquidos iónicos en aceite mineral ha demostrado hasta un 45% de reducción de desgaste, ya que el análisis químico de superficie indicaba una baja fricción en la película, que actúa como barrera de protección en superficies metálicas lubricadas por estos LIs. Por tanto, los líquidos iónicos tienen un enorme potencial de uso en la lubricación de motores (y otras piezas mecánicas).

Cabe hacer una mención especial a la aplicación de los líquidos iónicos usados como lubricantes, ya que es el objeto de estudio en este proyecto.

1.4.6. Uso de LIs como lubricantes

Los líquidos iónicos se consideran lubricantes debido a su conductividad eléctrica, la conductividad térmica y sus propiedades "verdes". Los estudios recientes han demostrado que algunos líquidos iónicos pueden igualar o incluso superar el comportamiento tribológico de alto rendimiento de lubricantes tales como PFPEs. Este comportamiento les permite física o químicamente adsorber y reaccionar con el sustrato superficial, así como la forma protectora de la superficie resistente al desgaste de las películas durante el deslizamiento. Los principales temas relacionados con el uso de líquidos iónicos como lubricantes incluyen la corrosión, oxidación térmica, reacciones triboquímica, así como la toxicidad. Estos problemas se pueden resolver o minimizar a través de la incorporación de aditivos anticorrosión, así como la selección cuidadosa de los cationes y aniones, que consiste en una caracterización completa de sus propiedades químicas y físicas y el examen de potencial de descomposición o mecanismos de reactividad. (Manuel Palacio, Bharat Bhushan)

En las primeras investigaciones que se llevaron a cabo sobre este tema, llevadas a cabo por Liu en 2001 en diversos contactos (acero/acero, acero/aluminio, acero/cobre, etc.) se observó una importante disminución de la fricción. Esto es debido a que, en contacto con el metal, se forman películas de lubricante que se adsorben y que están

muy relacionadas con el tipo de material que esté en contacto (acero, aluminio, etc.), llegando solamente a interactuar solamente en el rango de unas decenas o centenas de nanómetros. Esta estructura única de los líquidos iónicos permite su fácil adsorción por parte de las superficies en contacto, permitiendo que se forme esta capa límite.

A priori, el hecho de introducir este líquido iónico como lubricante debería reducir el valor de fricción pero también es posible que aumente, ya que se pueden estar formando compuestos en la superficie, como por ejemplo, el ya comentado ácido fluorhídrico, que son menos protectores que la capa de óxido inicial del metal.

Otros autores, (Meihuan Yao , Mingjin Fan, Yongmin Liang, Feng Zhou,, Yanqiu Xia) han estudiado la relación entre la longitud de la cadena y las propiedades que poseen. Los resultados indicaron que la cadena alquílica longitudinal juega un papel muy importante en la mejora de las propiedades tribológicas de los líquidos iónicos. Los LIs con cadenas laterales alquílicas largas tienen una excelente reducción de la fricción, y de las capacidades de anti desgaste y de la capacidad de transporte de carga, especialmente a altas temperaturas y altas cargas. El buen resultado que ofrecen es debido a la formación de la película de adsorción.

Otros resultados establecen que las propiedades tribológicas guardan una estrecha relación con la flexibilidad y la energía superficial de la película de lubricante para la fricción a nano-escala, sin embargo, a la fricción a micro-escala, las propiedades tribológicas pueden determinarse no sólo por la flexibilidad de lubricante, sino también por la estructura rígida (WenjieZhao, YufeiMo, JibinPu, MingwuBai).

A pesar de todo, no es necesario que el líquido iónico se encuentre en estado puro para conseguir estos efectos. La adición de 1% en peso de algunos líquidos iónicos podría mejorar las propiedades de la película de las mezclas que forman, reduciendo la fricción y el desgaste. (A.Hernández Battez, R. González, J.L. Viesca, D. Blanco, E. Asedegbega, A. Osorio)

Diversos autores han enumerado las posibles ventajas e inconvenientes de los líquidos iónicos usados como lubricantes.

Dentro de las ventajas se pueden destacar las siguientes:

- Versatilidad de propiedades fisicoquímicas, permitiendo modificarlas para un uso concreto con la simple selección del catión y del anión.
- Estabilidad química, no reaccionando con los demás elementos que intervienen en el proceso tribológico.
- Bajo punto de fusión.
- Baja o nula presión de vapor.
- Uso como disolvente.
- Buenos conductores, tanto térmicos como eléctricos.
- Multitud de aplicaciones (alto vacío, extrema presión o alta temperatura)

Con respecto a los inconvenientes principales:

- Escasa caracterización de las propiedades tribológicas de cada líquido iónico debido al inmenso número de ellos que se pueden sintetizar.
- Coste elevado. Pueden encontrarse líquidos iónicos con precios superiores a 2000 € / kg, aunque el precio medio es muy inferior. Además, debido a la creciente investigación en sintetización de elementos, estos costes están disminuyendo hasta unos 30 € / kg según autores como Wassersheid y Haumann.

Mención aparte merece la parte medioambiental. Si bien se ha comentado que el uso de estos líquidos iónicos es beneficioso frente a otros aceites sintéticos, esto no quiere decir que sean totalmente inocuos en la naturaleza. Muchos de estos LIs contienen halógenos, y pueden ser perjudiciales para el medioambiente (Swatloski, R.P.; Holbrey, J.D.; Rogers, R.D.). Existe poca información sobre las consecuencias que pueden tener en el medio, en la fauna y flora, y en la calidad del agua o los suelos, ya que cada líquido iónico es completamente distinto y hay que analizar su comportamiento individualmente.

Recientemente se han llevado a cabo estudios relativos a toxicidad de unos líquidos iónicos en la Universidad de Barcelona (J. Sierra, M.A. Garau, E. Martí, R. Cruañas) donde se llegó a la conclusión de que el nivel de toxicidad de los líquidos iónicos próticos ensayados fue muy inferior al de los apróticos, siendo además biodegradables en suelos y potencialmente en agua. Aunque estos resultados fueron

satisfactorios, no hay que olvidar de que se trata de líquidos puntuales y no se puede extrapolar a la totalidad de los líquidos iónicos.

1.4.7. Uso de LIs con aceros

Se han realizado numerosos estudios de líquidos iónicos en contacto con distintos aceros, ya que se trata de un material usado a diario y en muchas condiciones de funcionamiento.

En general, se puede decir que los líquidos iónicos en contacto con el acero presentan una mejor capacidad antidesgaste y de soporte de carga a alta temperatura que los lubricantes convencionales, formándose una película protectora sobre la superficie gastada, ayudando a mejorar el comportamiento de fricción y de desgaste (Qiming Lu, Haizhong Wang, Chengfeng Ye, Weimin Liu, Qunji Xue).

Los nuevos lubricantes de líquidos iónicos están basados en sales de imidazolio (Dong Jiang, Litian Hu, Dapeng Feng), con el objetivo de mejorar aún más las propiedades tribológicas, produciéndose una mejora de las propiedades de fricción y del desgaste producido en comparación con los lubricantes convencionales bajo altas cargas aplicadas. El análisis mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) y análisis espectrales indican que los lubricantes libres de corrosión experimentan la adsorción química y reacciones triboquímicas complejas, con la formación de películas protectoras, como FeF_2 ó FeS . (Renguo Lu, Shigeyuki Mori, Kimihiro Kobayashi, Hidetaka Nanao).

CAPITULO 2.
MATERIALES, MÁQUINAS Y PROCEDIMIENTOS
EXPERIMENTALES

2. MATERIALES, MÁQUINAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

2.1. MATERIALES UTILIZADOS

2.1.1. Acero AISI 52100

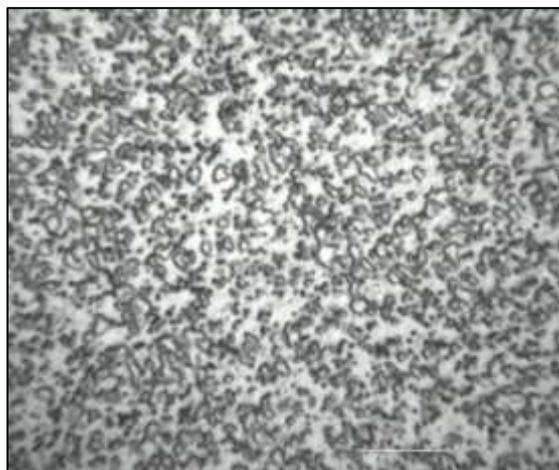
El AISI 52100 es un acero de alta aleación de Cromo-Carbono, que se utiliza en multitud de aplicaciones mecánicas ya que es relativamente fácil de mecanizar y tiene una alta dureza y resistencia a la abrasión. Además, este acero puede ser tratado térmicamente para mejorar la resistencia a la tracción y a la fatiga, siendo muy usado en la fabricación de rodamientos en los ejes mecánicos.

El acero AISI 52100 a utilizar viene dado con un tratamiento térmico de recocido, por lo que para volver a dejarlo en condiciones iniciales se le ha tenido que realizar un tratamiento de temple (10 minutos a 810 °C) y revenido(20 minutos a 150 °C), aumentando así su dureza. En las siguientes figuras puede verse la microestructura que poseía antes y después del tratamiento térmico.

2.1.1.1. Condiciones iniciales

Inicialmente el acero AISI 52100 recocido poseía una dureza de 11.9 HRC. Su microestructura puede verse en la siguiente figura.

Figura 46. Microestructura del acero AISI 52100 recocido inicial.



2.1.1.2. Condiciones finales

Tras el tratamiento térmico de temple y revenido, se ha vuelto a obtener la estructura que debería tener el acero AISI 52100 inicial sin el tratamiento térmico de recocido del que partía. Por lo tanto, son estas propiedades las que se tomarán en cuenta en el futuro.

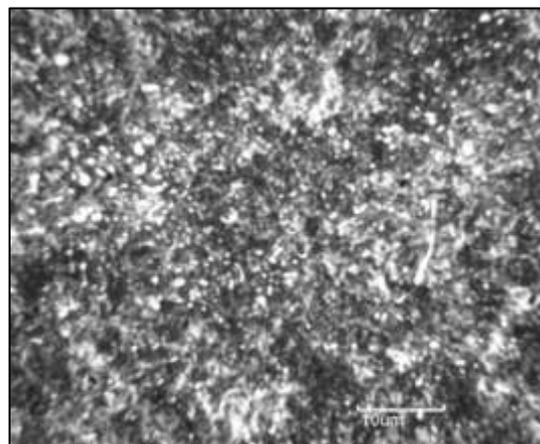
Tabla 4. Propiedades del acero AISI 52100.

<i>Propiedad</i>	
<i>Densidad</i>	7700 – 8000 $\left(\text{Kg}/\text{m}^3\right)$
<i>Dureza</i>	61.4(HRC)
<i>Módulo de Young</i>	213(GPa)
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0.27-0.30
<i>Límite elástico</i>	190 – 210 (GPa)
<i>Resistencia Última</i>	2250 (MPa)
<i>Resistencia de Fluencia</i>	2000 (MPa)
<i>Coefficiente de expansión térmica</i>	11.9 $\left(\mu\text{strain}/\text{K}\right)$

Tabla 5. Composición química del acero (en %) AISI 52100.

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>
0.95-1.05	0.25-0.45	<0.027	<0.025	0.15-0.35	1.30-1.65	Resto

Figura 47. Microestructura del acero AISI 52100 final.



2.1.2. Acero AISI 316L

El AISI 316 es un acero austenítico al Cromo que contiene Níquel y Molibdeno en su mayoría. Estos compuestos mejoran, en general, la resistencia a la corrosión y otorgan una mayor resistencia a altas temperaturas lo que le confiere la propiedad de inoxidable. En particular, el AISI 316L es un acero con un contenido en Carbono inferior y minimiza los efectos perjudiciales de la precipitación de carburos en la soldadura. Estos aceros están presentes en multitud de hornos, intercambiadores de calor, válvulas, colectores de escape, etc.

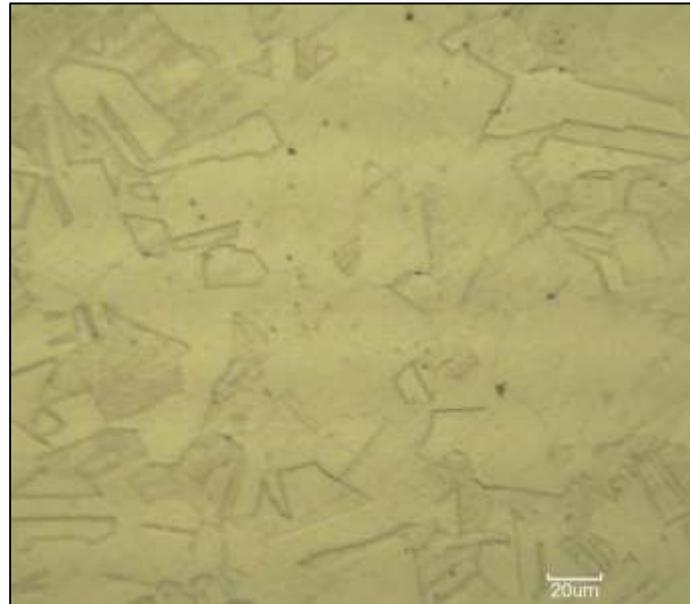
Tabla 6. Propiedades del acero AISI 316L.

<i>Propiedad</i>	
<i>Densidad</i>	$7870 - 8070 \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$
<i>Dureza</i>	$170 - 220 (HV)$
<i>Módulo de Young</i>	$190 - 205 (GPa)$
<i>Límite elástico</i>	$170 - 310 (MPa)$
<i>Resistencia a la tracción</i>	$480 - 620 (MPa)$
<i>Resistencia a la compresión</i>	$170 - 310 (MPa)$
<i>Elongación</i>	$30 - 50 (\%)$
<i>Punto de fusión</i>	$1380 - 1400 (^\circ C)$
<i>Temperatura máxima de servicio</i>	$750 - 925 (^\circ C)$
<i>Conductividad térmica</i>	$13 - 17 \left(\frac{W}{m K} \right)$
<i>Calor específico</i>	$490 - 530 \left(\frac{J}{kg K} \right)$
<i>Coefficiente de expansión térmica</i>	$15 - 18 \left(\frac{\mu strain}{K} \right)$
<i>Resistividad eléctrica</i>	$69 - 81 (\mu ohm \cdot cm)$

Tabla 7. Composición química del acero AISI 316L (en %).

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>
<i><0.03</i>	<i><2</i>	<i>10-14</i>	<i>2-3</i>	<i><0.045</i>	<i><0.03</i>	<i><1</i>	<i>16-18.5</i>	<i>Resto</i>

Figura 48. Microestructura del acero AISI 316L.



2.1.3. Zafiro

Son de este material las esferas pulidas de diámetro 1,5 mm colocadas en el punzón del tribómetro. La empresa suministradora es GoodFellow.

2.1.3.1. Composición química

Tabla 8. Composición química de la bola de zafiro.

Al_2O_3	99.9 %
Base	Óxido

2.1.3.2. Propiedades

Tabla 9. Propiedades de la bola de zafiro.

Diámetro	1.5 (mm)
Densidad	3940 - 4020 (kg/m^3)
Módulo de Young	430 - 460 (GPa)
Límite elástico	248 - 273 (MPa)
Resistencia a la tracción	248 - 273 (MPa)
Resistencia a la compresión	2000 - 2210 (MPa)
Elongación	0,05 - 0,06 (%)

Dureza	2500 - 3000 (HV)
Punto de fusión	1970-2070 (°C)
Temperatura máxima de servicio	1800-1959 (°C)
Temperatura mínima de servicio	-273 (°C)
Conductividad térmica	40,2 – 43,5 ($W/m \cdot K$)
Calor específico	738 – 768 ($J/kg \cdot K$)
Coefficiente de expansión térmica	5,3 – 6,9 ($\mu strain/°C$)
Resistividad eléctrica	10^{22} - 10^{24} ($\mu ohm \cdot cm$)

2.2. LUBRICANTES

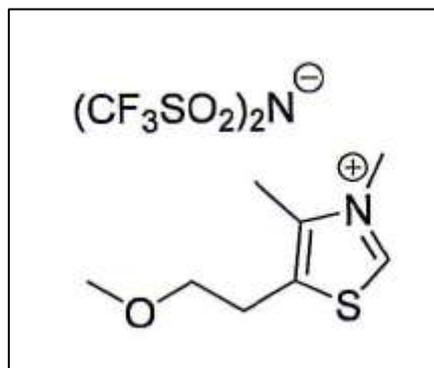
Se trata de líquidos iónicos apróticos sintetizados recientemente, formados por la combinación estequiométrica de un ácido y una base de Bronsted. En este proyecto se denominarán EM-638 y EM-642. Ambos poseen el mismo catión (tiazolio), variando el anión.

Para cada líquido iónico se ha determinado la viscosidad (ver 2.3.7, reómetro) y el ángulo de contacto (ver 2.3.8, instrumento de ángulo de contacto).

2.2.1. Líquido iónico EM-638

Este líquido posee un anión que posee en su cadena azufre y flúor.

Figura 49. Estructura química del líquido iónico EM-638.

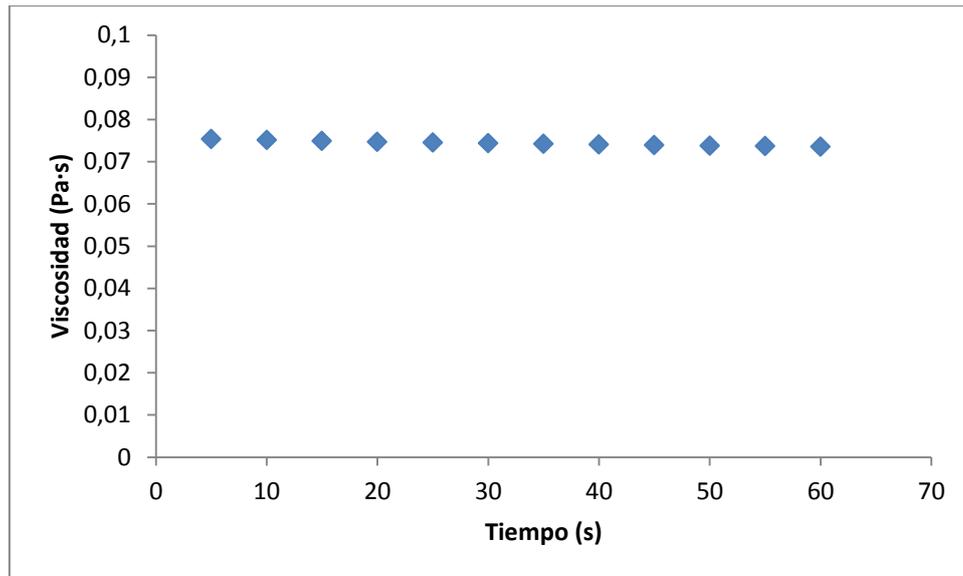


La viscosidad de este líquido iónico viene dada por:

Tabla 10. Viscosidad dinámica del líquido iónico EM-638.

Valor medio (Pa · s)	Desviación típica (Pa · s)
0.0743	$5.81 \cdot 10^{-4}$

Figura 50. Evolución de la viscosidad del líquido iónico EM-638.



Y el ángulo de contacto viene dado por:

Tabla 11. Ángulo de contacto para el líquido iónico EM-638.

Acero	Rugosidad media Probetas (μm)	Ángulo final Medio ($^\circ$)	Desviación típica
AISI 316L	0,049	31,93	0,29
AISI 52100	0,059	22,47	0,75

Figura 51. Ángulo de contacto en EM-638 /AISI 316L inicial (izq.) y final (der.)

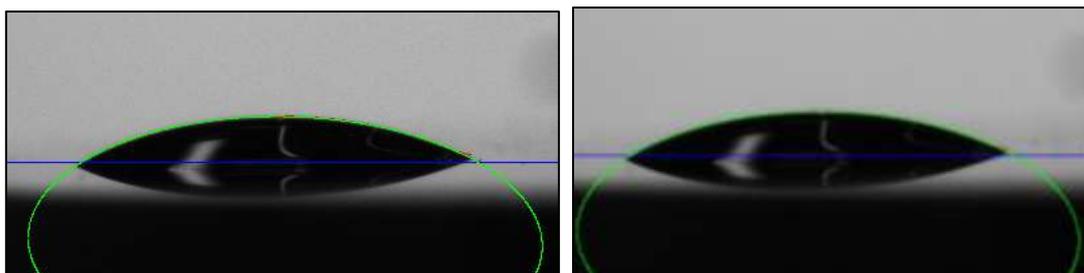
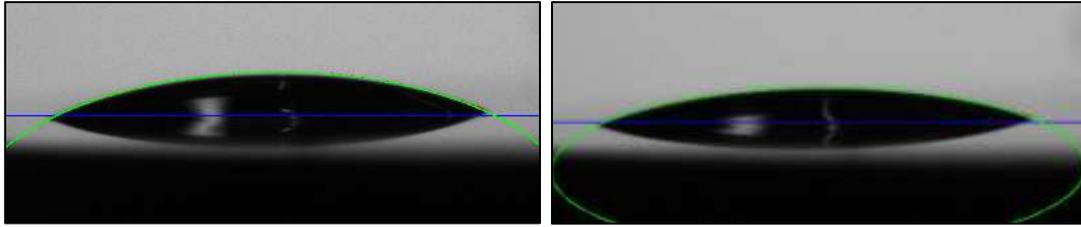


Figura 52. Ángulo de contacto en EM-638 /AISI 52100 inicial (izq.) y final (der.)



2.2.2. Líquido iónico EM-642

En este caso, el anión dicianamida solamente tiene nitrógeno en la cadena.

Figura 53. Estructura química del líquido iónico EM-642.

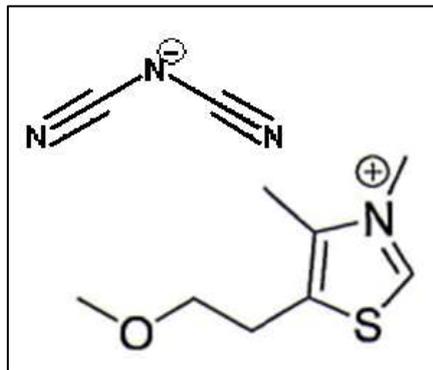


Tabla 12. Viscosidad dinámica del líquido iónico EM-642.

Valor medio (Pa · s)	Desviación típica (Pa · s)
0.0476	$4.27 \cdot 10^{-4}$

Figura 54. Evolución de la viscosidad del líquido iónico EM-642.

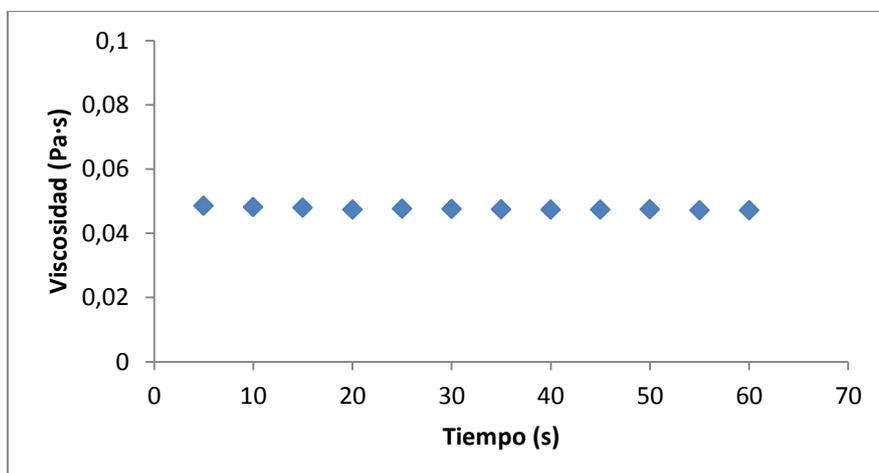


Tabla 13. Ángulo de contacto para el líquido iónico EM-642.

Acero	Rugosidad media Probetas (μm)	Ángulo final Medio ($^{\circ}$)	Desviación típica
AISI 316L	0,051	31,07	0,45
AISI 52100	0,050	19,67	0,55

Figura 55. Ángulo de contacto en EM-642 /AISI 316L inicial (izq.) y final (der.)

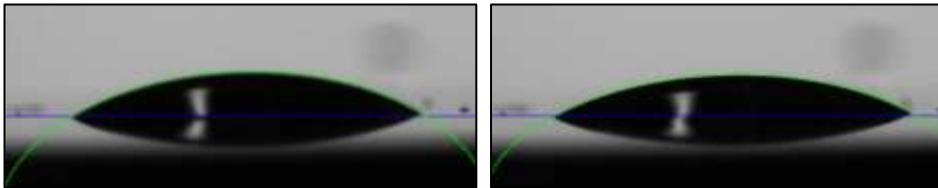
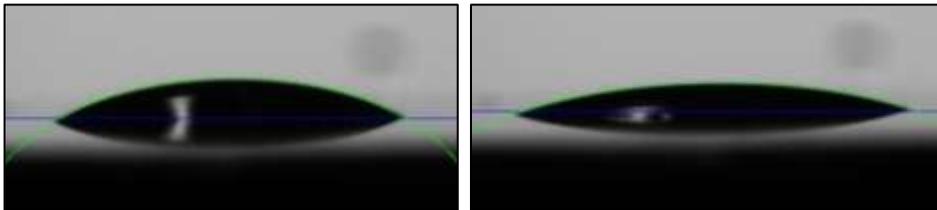


Figura 56. Ángulo de contacto en EM-642 /AISI 52100 inicial (izq.) y final (der.)



2.3. MÁQUINAS UTILIZADAS

2.3.1. Pulidora metalográfica

Para el pulido de las probetas se ha utilizado una pulidora de la marca Buehler, modelo Phoenix Beta como la que se muestra en la siguiente imagen.

Figura 57. Pulidora metalográfica Phoenix Beta.



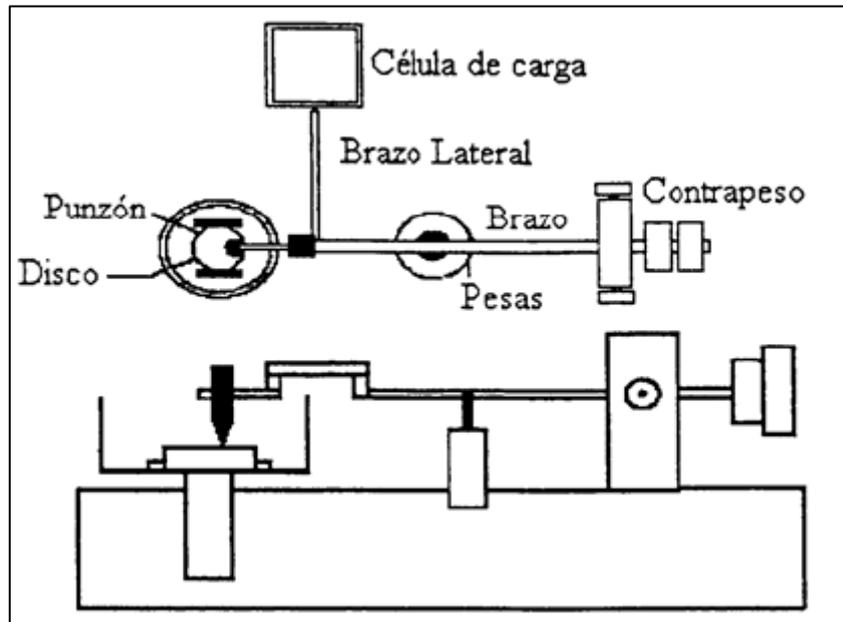
2.3.2. Tribómetro

Se ha utilizado este tribómetro, modelo ISC-200, para la realización de ensayos a temperatura ambiente, la cual se indica en cada ensayo del anexo.

Figura 58. Tribómetro ISC-200.



Figura 59. Esquema de funcionamiento del tribómetro (alzado y planta).



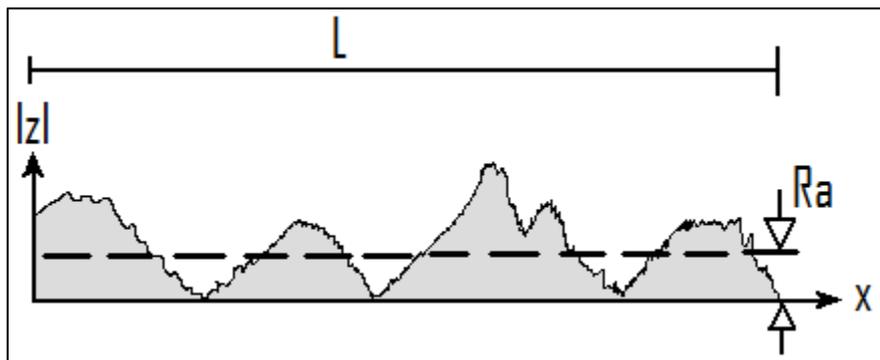
Las medidas del coeficiente de fricción en función de la distancia se registran a tiempo real mediante el programa informático PC- Stripchart.

2.3.3. Rugosímetro

La rugosidad superficial es el conjunto de irregularidades de la superficie real definidas en una sección. Los rugosímetros miden el perfil de las superficies haciendo un barrido en línea recta para una determinada distancia. El palpador sigue el perfil convirtiendo las variaciones de altitud en señales eléctricas que son registradas mediante el software. Una vez realizada la medida, el software calcula una serie de parámetros, tales como la desviación media del perfil de rugosidad, R_a (Figura 56) y la altura máxima del perfil de rugosidad (R_t) entre otros.

$$R_a = \frac{1}{L^2} \int_0^L |z| dx$$

Figura 60. Rugosidad R_a .

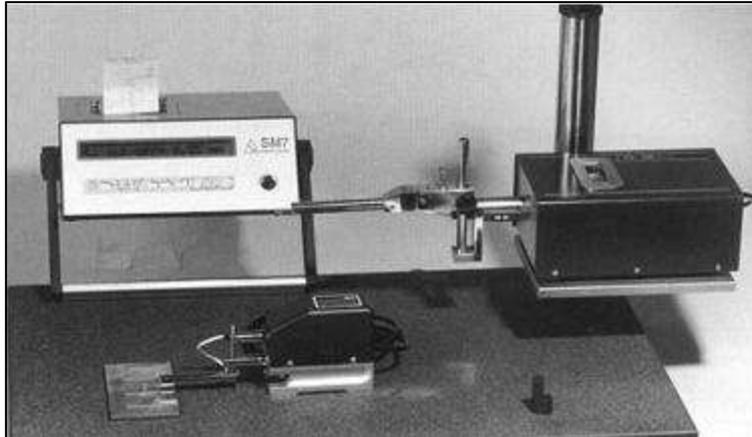


Para medir la rugosidad de las probetas se ha utilizado el rugosímetro de laboratorio Profiltest SM-7. Este equipo permite evaluar y medir la rugosidad según tres normas: DIN, ISO y CNOMO. En este proyecto se ha realizado la medida de la rugosidad siguiendo la norma DIN 4768.

Tanto con la norma DIN como con la ISO se puede seleccionar tanto el recorrido entre puntos de lectura o cut off (a elegir entre 0,25, 0,8 y 2,5 mm) como el número de puntos de lectura (entre 2 y 32). El valor de cut off se elegirá en función de la rugosidad media esperada en las probetas.

El rugosímetro va equipado con una pantalla digital LCD y un teclado de membrana con autorrepetición que permiten, junto con el menú, la configuración y ejecución de todas las funciones.

Figura 61. Rugosímetro SM-7.



2.3.4. Microscopio óptico

Para el estudio morfológico y metalográfico de los materiales sometidos a fricción y desgaste se ha utilizado el microscopio óptico Leica DMR. Este microscopio lleva acoplado un analizador de imagen que utiliza el software Optimas.

Figura 62. Microscopio óptico Leica DMR.



2.3.5. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

El empleo del microscopio electrónico de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscopy*) HITACHI S-3500N permite la observación de las huellas y partículas de desgaste, y realizar la caracterización microscópica de las superficies de criofractura.

Figura 63. Microscopio electrónico de barrido (SEM) Hitachi S-3500N.



El equipo lleva acoplados dos microanalizadores por dispersión de energía de rayos X (EDS):

- Detector de rayos X: Es un detector de Si(Li) de 138 eV de resolución, con ventana ultrafina para detección de elementos desde B hasta U.
- Detector de rayos X Xflash: Detector de Si, con sistema de enfriamiento Peltier y ventana de Be de 7,5 μm .

Estos analizadores permiten la realización de mapas elementales, perfiles de distribución y un cálculo cuantitativo de la composición elemental en un punto, en un área o en toda la imagen.

Se puede realizar también un microanálisis mediante energías dispersivas (EDS), que permite estudiar las posibles interacciones triboquímicas del líquido iónico con el acero. El análisis ha sido realizado en el interior y exterior de la huella generada por el desgaste, para así poder detectar si interactúa el líquido iónico en el interior de ella.

2.3.6. Microperfilómetro

Para estudiar la morfología de las huellas de desgaste, y el valor del propio desgaste, se ha utilizado un microperfilómetro óptico de no contacto con el que se obtiene una reproducción tridimensional de la superficie de la probeta.

Las características más destacadas del equipo son las siguientes:

- Marca y modelo: Taylor Hobson Talysurf CLI 500.
- Rango de medida: $100 \times 50 \times 50$ (mm)
- Alcance del foco: $1000 \mu\text{m}$.
- Peso máximo de la muestra: 10 kg.
- Distancia de trabajo: 10 mm.
- Nivel de ruido: 18 nm.
- Diámetro del punto: $14 \mu\text{m}$
- Límite de la pendiente en superficies reflectantes: $\pm 30^\circ\text{C}$.
- Parámetros que permite obtener:
 - Medición de micro-alturas.
 - Tamaño y consistencia del granulado.
 - Áreas y volúmenes.
 - Zonas de contacto.
 - Topografía superficial.
 - Rugosidad 2D estándar.

Figura 64. Microperfilómetro focal de no contacto.



Se trata de un instrumento de medición de la topografía superficial. Esto significa que el indicador mide la altitud de tan sólo un punto en un momento, y la

probeta en estudio se mueve en una bandeja móvil con el fin de explorar la zona de medición completa.

Normalmente, el sistema está concebido para la medición sin contacto con una lente óptica focal con un único punto del sensor. También puede ser equipado con un indicador de láser de triangulación. Incluso permite ser equipado con un indicador de diamante inductivo.

A través del software asociado Talymap, se pueden realizar operaciones sobre la imagen generada por Talysurf (perfilómetro de no contacto), así como realizar un corte transversal y estudiar una superficie equidistante, medir el área de hueco y de pico en una sección de la huella, seleccionar una zona de la misma y determinar su volumen de hueco y pico, y en consecuencia, el desgaste en la probeta estudiada.

2.3.7. Reómetro

El equipo utilizado para el análisis de la viscosidad ha sido el reómetro AR-G2 de “TA Instruments”. Se trata de un sistema de cojinete axial magnético, que permite un control muy preciso de torque, eliminando cualquier perturbación de ruido o señal de vibración causada por turbulencias de aire en los reómetros habituales de cojinetes de aire.

Figura 65. Reómetro AR-G2 de TA Instruments.



Las características y especificaciones del equipo se definen brevemente a continuación:

- Capacidad de realizar experimentos a velocidad controlada y a esfuerzo controlado.
- Capaz de realizar estudios de viscoelasticidad de materiales, comportamiento cinético de reacciones de polimerización y curado.
- Amplio rango de control de fuerza normal: 0,01 – 50 N.
- Rango de par de fuerzas en oscilación: $3 \cdot 10^{-6}$ – 200 mN·m.
- Rango de par de fuerzas en cizalla: 10^{-5} – 200 mN·m.
- Resolución del par de fuerzas: 0,1 nN·m.
- Inercia del motor: 18 μ N·m·s.
- Rango de velocidad angular en esfuerzo controlado: 0 – 300 rad/s.
- Rango de velocidad angular en deformación controlada: $1,4 \cdot 10^{-9}$ – 300 rad/s.
- Rango de frecuencias: $7,5 \cdot 10^{-7}$ – 628 rad/s.
- Resolución en el desplazamiento: 25 rad.
- Tiempo necesario para cambio en la velocidad: 7 ms.
- Tiempo necesario para cambio en la deformación: 30 ms.
- Rango de temperatura con plato peltier: -20 a 200°C.
- Rango de temperaturas con platos calientes: 30 a 400°C.

Así pues, mediante el uso de este reómetro se han realizado las medidas de viscosidad dinámica a 25°C de los lubricantes empleados durante el desarrollo del proyecto (*ver 2.2, lubricantes*). El proceso de medida ha consistido en una fase inicial en la que la el disco del reómetro iba aumentando su velocidad progresivamente desde 0 hasta 300 s^{-1} , ‘rampa inicial’, hasta llegar a una fase en la que la velocidad se hace constante durante un minuto para después volver a pararse en una ‘rampa final’. Los resultados corresponden a los datos registrados en la fase central de velocidad constante de 60 segundos de duración.

2.3.8. Instrumento de medida del ángulo de contacto (DSA)

Se puede definir el ángulo de contacto como el ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con una superficie sólida. El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación existente entre las fuerzas adhesivas del

líquido y del sólido y las fuerzas cohesivas del propio líquido. Cuando una fase líquida y una fase sólida entran en contacto, forman una interfase común.

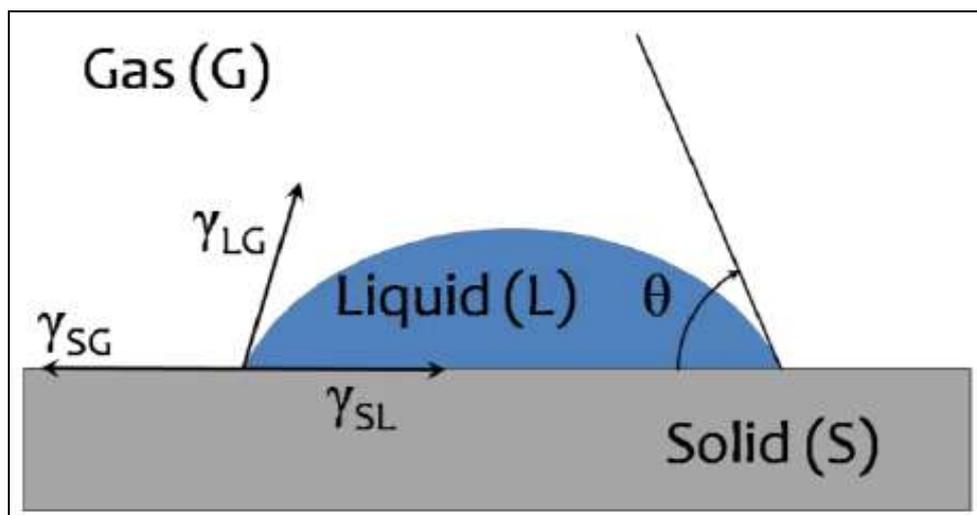
Otra propiedad a tener en cuenta es la mojabilidad que es la capacidad de los sólidos para formar interfases con los líquidos. La mojabilidad de un determinado sólido por un líquido viene determinada por el ángulo de contacto θ , como se muestra en la *figura 66*. En ella se representa esquemáticamente una gota de líquido (L) reposando en equilibrio sobre una superficie sólida horizontal (S) en una atmósfera de gas (G).

El perfil que adopta la gota es el resultado del balance entre las fuerzas de la superficie y de la interfase, que tienden a minimizar la energía superficial libre del sistema. El ángulo de contacto está relacionado con las tres tensiones superficiales, γ_{LG} , γ_{SG} , γ_{SL} de las interfases líquido/gas, sólido/gas y sólido/líquido, respectivamente, a través de la siguiente ecuación:

$$\gamma_{LG} \cdot \cos\theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL}$$

La tensión superficial está causada por los efectos de las fuerzas intermoleculares que existen en la interfase (plano de separación entre dos fases) y dependerá de la naturaleza del líquido, del medio que le rodea y de la temperatura.

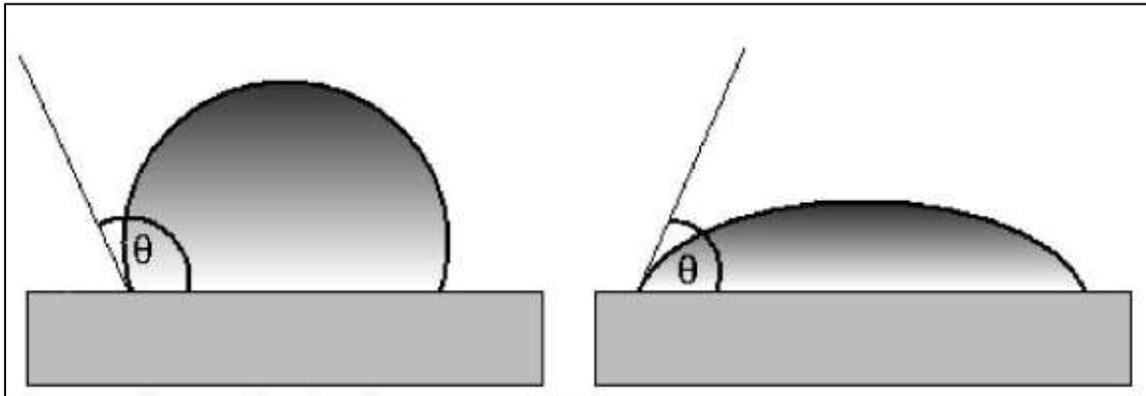
Figura 66. Gota de líquido en equilibrio sobre una superficie horizontal y ángulo de contacto producido.



Por convenio, cuando $\theta < 90^\circ$ (equivalente a $\gamma_{SG} > \gamma_{SL}$) se dice que el líquido moja al sólido. Por el contra, el líquido no moja cuando $\theta > 90^\circ$.

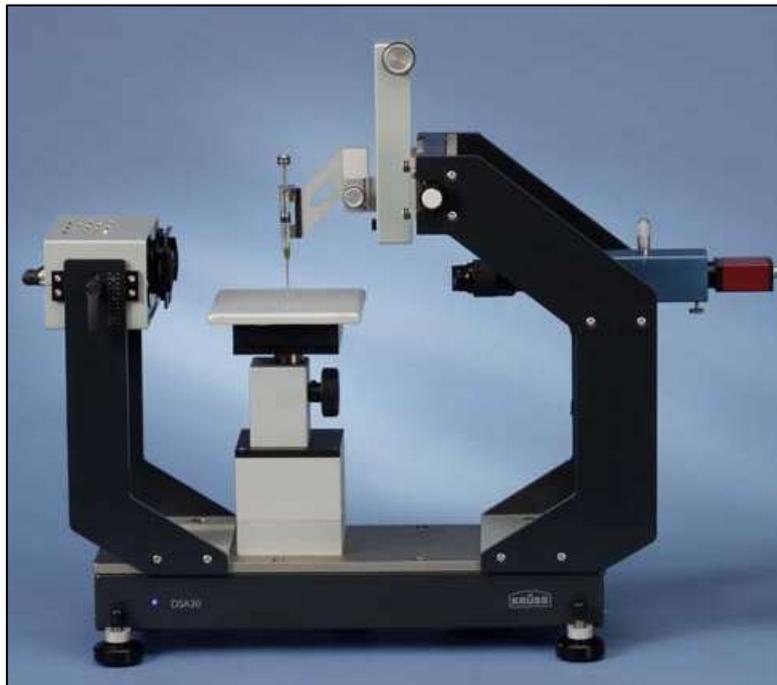
En el ensayo realizado (*ver 2.2, lubricantes*) se ha obtenido el ángulo medio en el contacto entre el lubricante y el acero así como distintas imágenes en el instante inicial y final del ensayo, ya que el ángulo puede variar en función del tiempo transcurrido sobre la superficie.

Figura 67. Alteración del ángulo de contacto estático en función del tiempo.



Para la medida del ángulo de contacto, *DSA (Drop Shape Analysis)* se ha utilizado el siguiente instrumento de medida, de la marca Krüss, modelo DSA30B, como la que se muestra en la siguiente imagen.

Figura 68. Instrumento de medida del ángulo de contacto DSA30B.



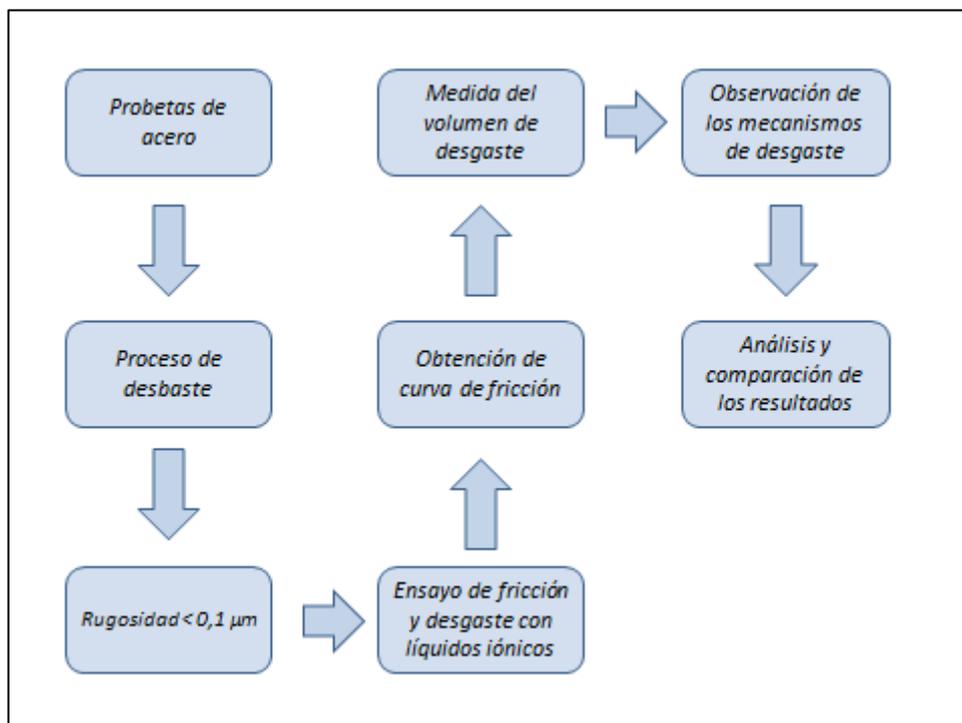
Este aparato permite medir la tensión superficial además del ángulo de contacto. Las características principales de este equipo son:

- Rango de medidas
 - Ángulo de contacto: 1-180°
 - Tensión superficial: 0.01-1000 mN/m
- Resolución
 - Ángulo de contacto: 0.01°
 - Tensión superficial: 0.01 mN/m
- Sistema de vídeo a 60 frames por segundo.
- Peso: 25 kg.
- Dimensiones: 660x240x610 mm

2.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL SEGUIDO

Para la realización de este proyecto se ha seguido la siguiente secuencia experimental:

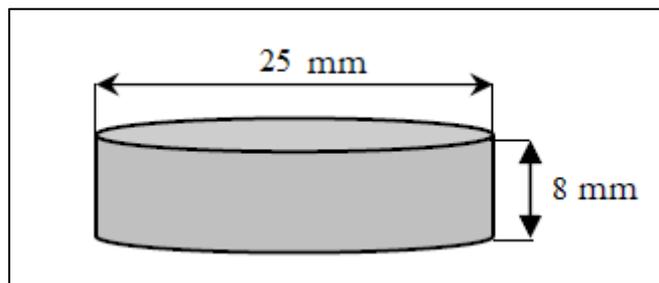
Figura 69. Procedimiento experimental.



2.4.1. Preparación de las probetas

Partiendo de las probetas de los distintos aceros, de 25 mm de diámetro y 8 mm de espesor, se le aplican los tratamientos térmicos de temple y revenido al acero AISI 52100 como ya se había especificado, dejando el AISI 316L sin ningún tipo de tratamiento.

Figura 70. Dimensiones de las probetas.



Posteriormente se realiza un pulido a todas las probetas (AISI 52100 y AISI 316L) hasta conseguir que tengan una rugosidad media inferior a 0.1 micras, ($\overline{R}_a < 0.1\mu\text{m}$) utilizando los distintos discos de carburo de silicio de los que se dispone.

2.4.2. Medida de la rugosidad

Se han de tomar los valores promedio de la rugosidad media, \overline{R}_a , y máxima, \overline{R}_t . Para ello, se han tomado medidas en cuatro direcciones distintas. En la siguiente tabla solamente se muestran los ensayos promedio (las medidas de las rugosidades así como todas las condiciones de cada ensayo están en el anexo tribológico, ver ANEXO 1. ENSAYOS TRIBOLÓGICOS)

Tabla 14. Rugosidades de las muestras.

<i>Acero</i>	<i>Lubricante</i>	<i>Ensayo</i>	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
<i>AISI 52100</i>	<i>EM-638</i>	<i>Promedio</i>	<i>0.059</i>	<i>0.678</i>
	<i>EM-642</i>	<i>Promedio</i>	<i>0.063</i>	<i>0.777</i>
<i>AISI 316L</i>	<i>EM-638</i>	<i>Promedio</i>	<i>0.069</i>	<i>0.751</i>
	<i>EM-642</i>	<i>Promedio</i>	<i>0.066</i>	<i>0.954</i>

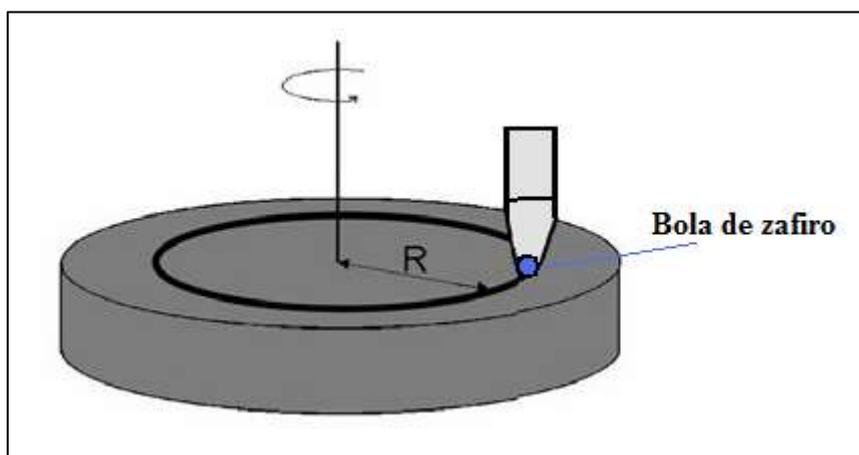
2.4.3. Condiciones de los ensayos

La presión que ejercerá la bola de zafiro sobre las probetas de acero se calculará mediante la expresión de Hertz.

Tabla 15. Parámetros de los ensayos.

Parámetro	
Bola	Zafiro
Carga aplicada	0,98 N
Presión máxima de contacto	2.02 GPa (AISI 52100) 1.95 GPa (AISI 316L)
Presión media de contacto	1.34 GPa (AISI 52100) 1.30 GPa (AISI 316L)
Volumen de lubricante utilizado	1 ml
Radio de giro	9 mm
Velocidad	0.1 m/s
Distancia recorrida	500 m
Tª y HR(%)	Ambiente de laboratorio, variables

Figura 71. Ejemplo de ensayo.



2.4.4. Determinación de la fricción y el desgaste

El coeficiente de fricción y el volumen (y tasa) de desgaste se obtienen directamente a partir de los distintos programas informáticos (ver tribómetro 2.3.2, y

microperfilómetro 2.3.6, respectivamente). En el caso de desgaste además, se han realizado, para cada probeta, imágenes de la huella de desgaste en puntos equidistantes a distintos aumentos (10x, 20x y 50x) para una mejor apreciación del mismo.

CAPITULO 3.
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para cada ensayo que se realice se analizarán tanto la fricción como el desgaste, así como los mecanismos de desgaste a través de imágenes procedentes del microscopio óptico, perfilómetro o micrografías electrónicas de las huellas. También se realizará un análisis de energías dispersivas (EDS) para observar si existen variaciones de composición química dentro y fuera de la huella producida.

3.1. ENSAYO AISI 52100 / EM-638

Tabla 16. Condiciones medias en el ensayo AISI 52100/ EM-638.

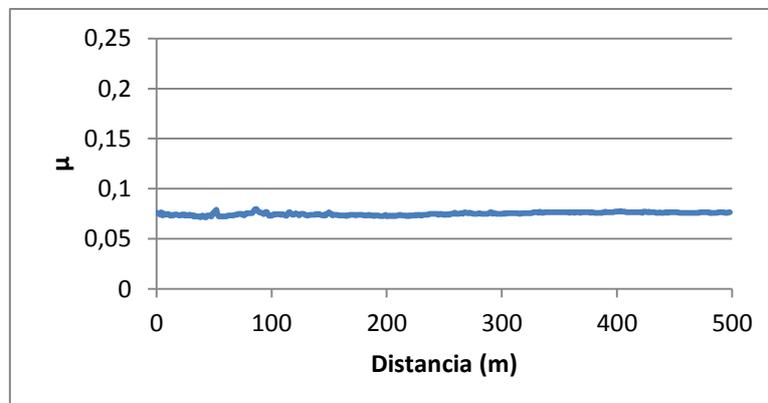
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
<i>Promedio</i>	23.2	49	0.059	0.678

3.1.1. Coeficiente de fricción

Tabla 17. Coeficiente de fricción promedio en el ensayo AISI 52100 / EM-638.

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.075	0.001

Figura 72. Evolución del coeficiente de fricción medio en el ensayo AISI 52100 / EM-638.



Puede apreciarse que la fricción apenas oscila en este ensayo, obteniéndose un valor pequeño y estacionario casi inmediato, en torno a 0,075. Se verifica que el EM-638 posee unas buenas propiedades antifricción con este acero.

La ausencia de grandes cambios en la fricción es un indicador de lo que está ocurriendo en las superficies de los materiales en contacto, es decir, se trata de una fricción que a priori, no debe producir demasiado desgaste.

3.1.2. Desgaste

Tabla 18. Volumen y tasa de desgaste medio en el ensayo AISI 52100 / EM-638.

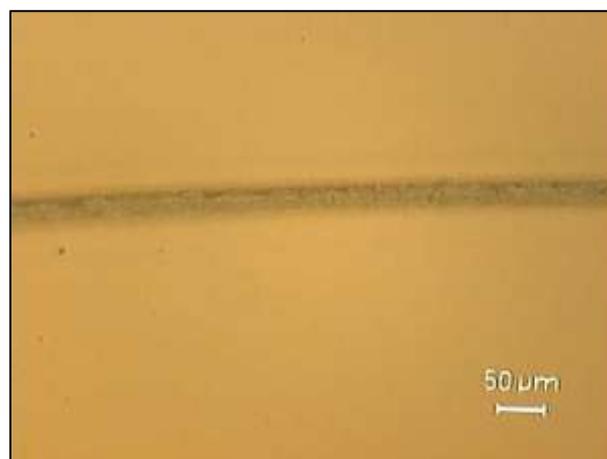
Volumen desgastado (mm^3)	Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)	Tasa de desgaste (mm^3/m)
Despreciable	No aplicable	No aplicable

En efecto, como cabía de esperar, apenas se ha producido desgaste alguno en la probeta, con lo cual se confirma que el EM-638 se comporta como un excelente lubricante para el AISI 52100.

3.1.3. Mecanismos de desgaste

En las siguientes imágenes puede observarse las huellas producidas en el ensayo a través del microscopio óptico.

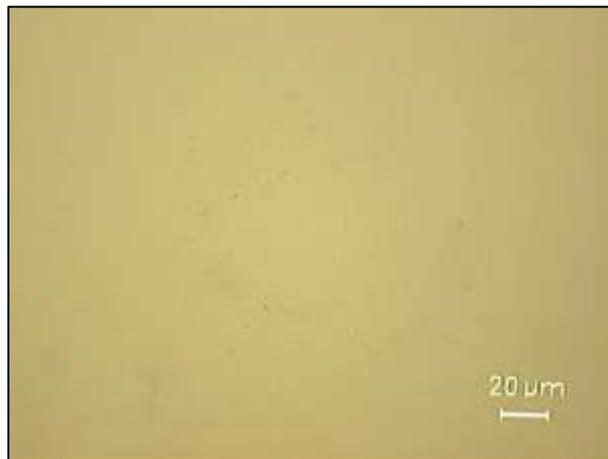
Figura 73. Imagen de la huella a 20x para AISI 52100 / EM-638.



Como puede verse, y se ha comentado anteriormente, apenas hay una mínima marca del punzón sobre la probeta, sin llegar a penetrar hacia el interior de la misma.

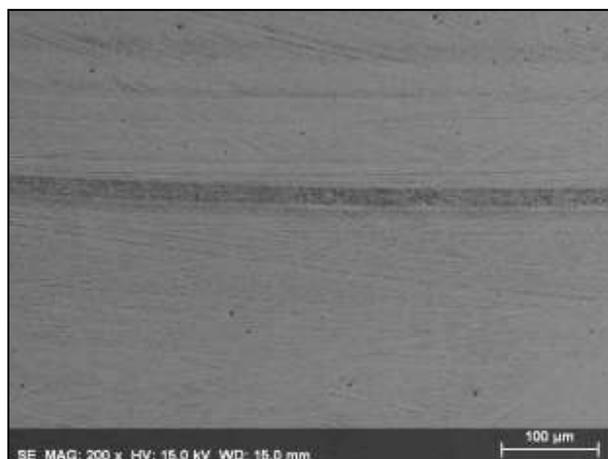
Del mismo modo, hay que analizar también la bola de zafiro, para ver si se ha producido adhesión de partículas de la muestra en el punzón. En la imagen que se muestra a continuación, puede verse el punzón completamente limpio, sin partículas de desgaste alguno.

Figura 74. Imagen de la huella a 50x en el punzón en el ensayo AISI 52100 / EM-638.



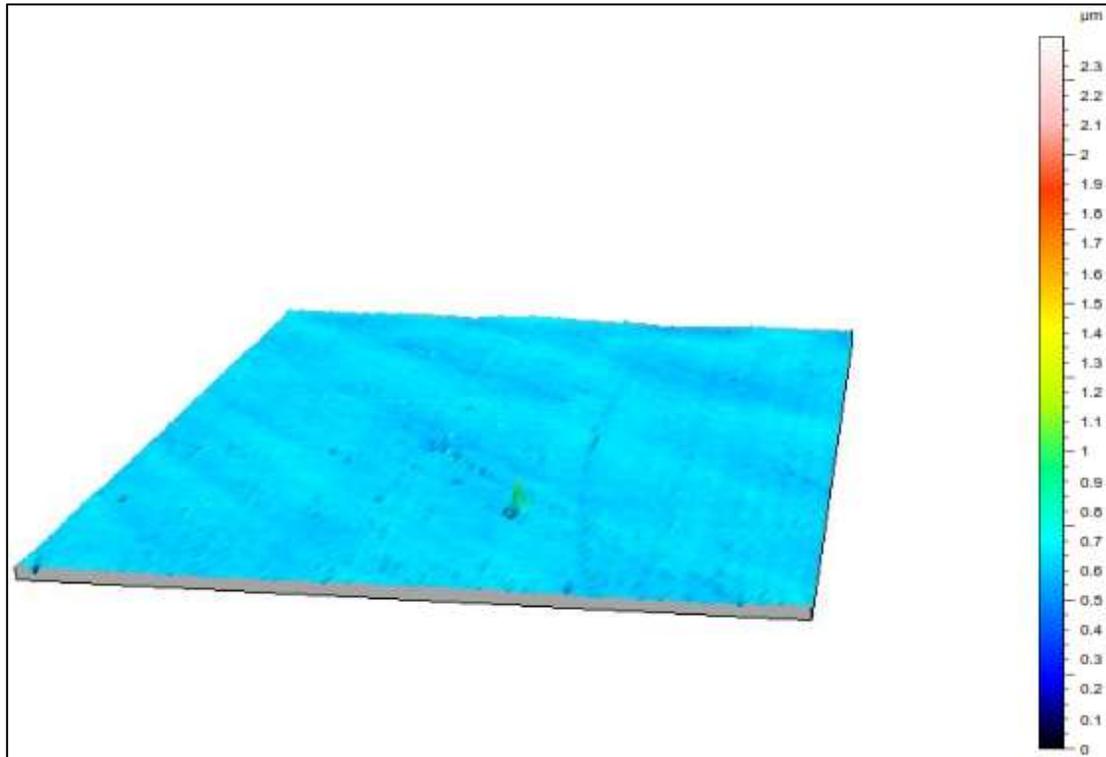
A continuación, con la ayuda de una micrografía electrónica puede observarse con más detalle lo comentado anteriormente. Se aprecia incluso que la profundidad de la huella producida es más pequeña que la propia rugosidad de la muestra.

Figura 75. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638 (200x)



Para una vista completa tridimensional de la superficie se hará uso del microperfilómetro. En la figura 76 se puede observar el hecho de que toda la probeta posee el mismo color, lo que corresponde al mismo nivel de rugosidad. Por tanto, se confirma de nuevo que el punzón no ha producido ningún desgaste en la probeta.

Figura 76. Perfil topográfico de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638.



Es de destacar que el color que posee la probeta corresponde aproximadamente a $0,7 \mu\text{m}$, superior a la rugosidad de la probeta medida. Esto es debido a que la medida de la rugosidad se realiza inmediatamente tras el pulido, con la probeta completamente limpia y la medida del perfil topográfico se realiza tras el ensayo y puede haber restos de lubricante al limpiarla únicamente con un paño seco, ya que no se puede añadir otros elementos para limpiarla (agua, etanol, acetona, etc.) para evitar contaminar la muestra y no producir así reacciones químicas en la superficie al añadirle estos elementos.

Finalmente, para acabar este ensayo, se realizará el análisis de energías dispersivas, que se muestra a continuación. Es necesario hacer constar que la técnica EDS no permite un análisis cuantitativo exacto, aunque sí es útil para establecer la variación cualitativa, en función de la intensidad relativa de los picos de cada elemento.

Figura 77. Espectro EDS del interior de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638.

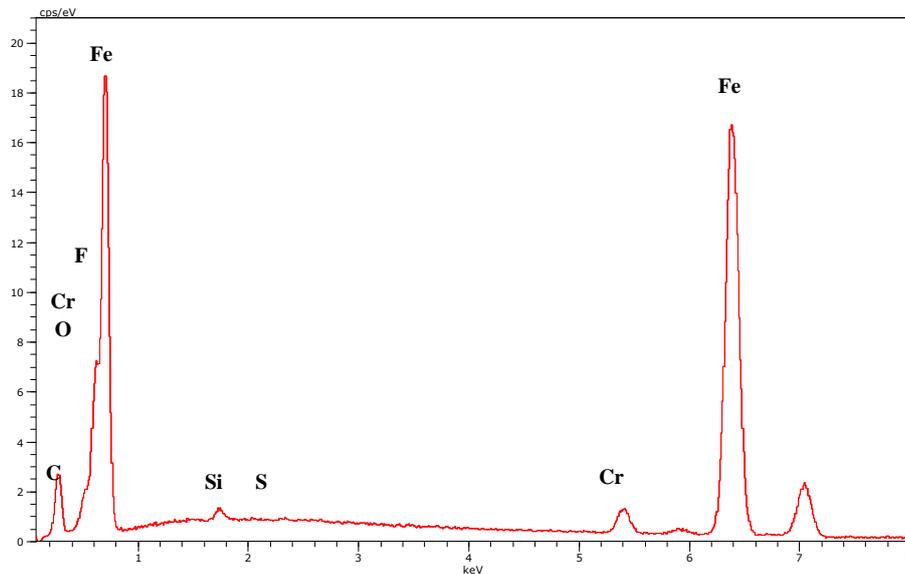
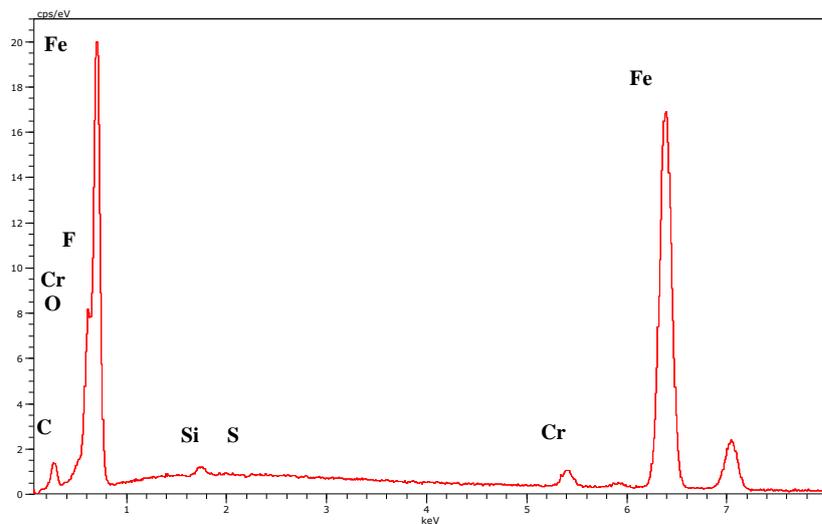


Figura 78. Espectro EDS del exterior de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638.



A simple vista puede observarse que no hay cambios en los espectros dentro y fuera de la huella. Esto indica que no se ha producido ninguna interacción triboquímica entre la superficie del AISI 52100 y el líquido iónico EM-638. Para poder cuantificarlo se recurre a un análisis elemental dentro y fuera de la huella, que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 19. Análisis elemental dentro y fuera de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638

Elemento	Dentro de la huella (wt %)	Fuera de la huella (wt %)
<i>Fe</i>	79,85	84,92
<i>Cr</i>	2,57	2,11
<i>O</i>	0,32	0,00
<i>C</i>	9,60	5,21
<i>S</i>	0,07	0,03
<i>Si</i>	0,58	0,58
<i>F</i>	7,00	7,15

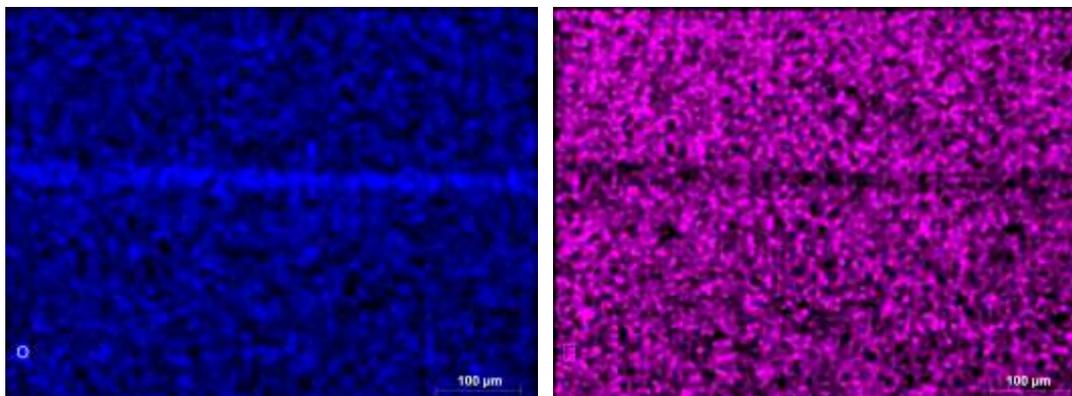
Puede compararse fácilmente que existe una pequeña disminución de Hierro y un aumento considerable de Carbono dentro de la huella así como oxidación en la huella.

En lo que respecta a las características particulares de este líquido iónico, Flúor y Azufre puede observarse que ambos se mantienen prácticamente iguales dentro y fuera de la huella.

En las siguientes imágenes puede observarse el mapa elemental de algunos de esos elementos (el mapa elemental completo puede observarse en el Anexo 2, Ver **ANEXO 2. ENSAYOS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)**)

Figura 79. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638

Oxígeno (izq.) y Flúor (der.)



Se ve claramente cómo se produce la oxidación y la disminución de flúor en su interior.

3.2. ENSAYO AISI 52100 / EM-642

Tabla 20. Condiciones medias en el ensayo AISI 52100/ EM-642

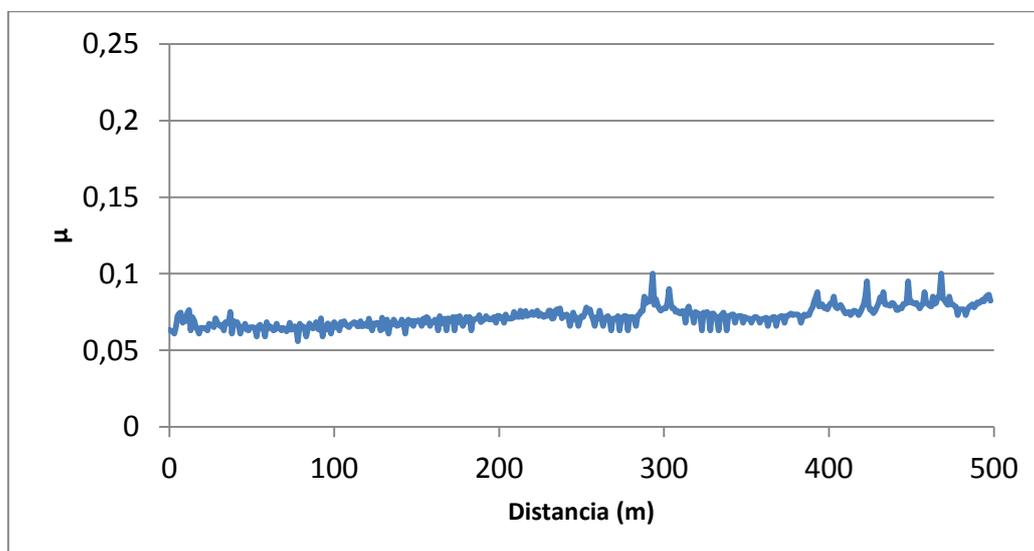
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
<i>Promedio</i>	<i>23.5</i>	<i>48.7</i>	<i>0.063</i>	<i>0.777</i>

3.2.1. Coeficiente de fricción

Tabla 21. Coeficiente de fricción promedio en el ensayo AISI 52100 / EM-642

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
<i>0.072</i>	<i>0.002</i>

Figura 80. Evolución del coeficiente de fricción medio en el ensayo AISI 52100 / EM-642.



En esta ocasión, a pesar de que nuevamente se trata de un valor promedio de fricción pequeño e incluso inferior al del ensayo anterior, se observa que no se trata de una gráfica uniforme y casi constante. Existen picos a lo largo de todo el recorrido, incluso algunos llegando a valores de fricción de 0,1. Esto puede ser debido a la propia viscosidad del EM-642 (0,0476 Pa·s frente a 0,0743 Pa·s del EM-638). Por este motivo

cabe de esperar que el desgaste producido en la probeta no sea similar al del líquido iónico anterior.

3.2.2. Desgaste

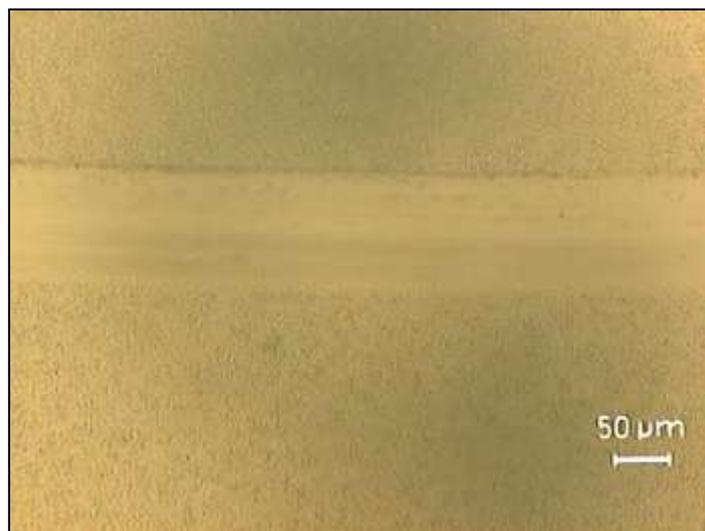
Tabla 22. Volumen y tasa de desgaste medio en el ensayo AISI 52100 / EM-642

Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
$4.98 \cdot 10^{-4}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$	$1.02 \cdot 10^{-6}$	$2.98 \cdot 10^{-7}$	$9.97 \cdot 10^{-7}$	$2.92 \cdot 10^{-7}$

Se trata de valores pequeños de desgaste. Sin embargo, los resultados obtenidos son peores a los que proporciona el otro líquido iónico de estudio. A continuación vamos a ver como se ha producido ese desgaste.

3.2.3. Mecanismos de desgaste

Figura 81. Imagen de la huella a 20x para AISI 52100 / EM-642.

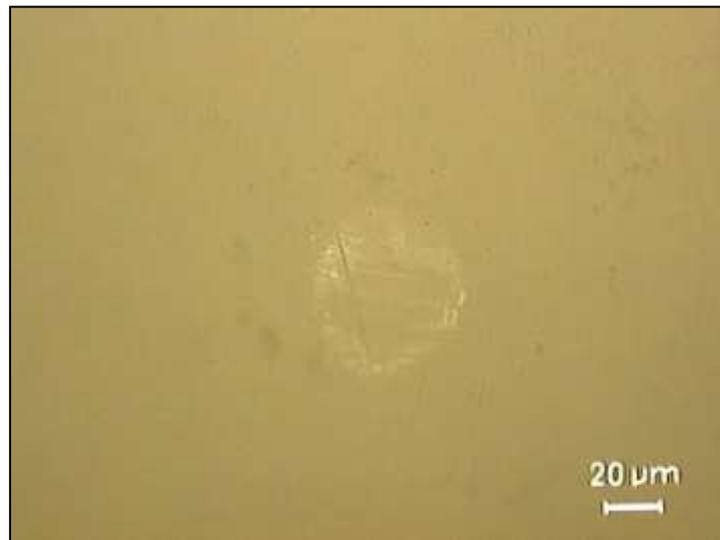


Lo primero que salta a la vista es la situación de la superficie de la probeta fuera de la huella. Esto puede ser debido a una reacción entre el EM-642 y el AISI 52100.

Para desechar esta teoría se debería de realizar un ensayo de inmersión de la probeta en dicho líquido, pero debido a la poca cantidad de la que se disponía no se puede realizar.

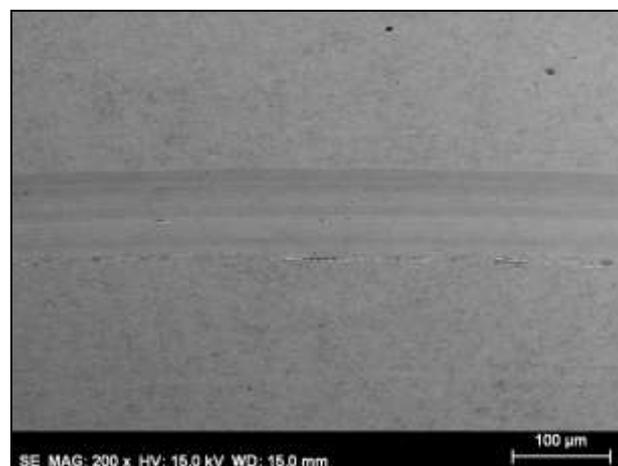
Hecho este comentario, analizamos la superficie de la probeta. Se trata de una huella aproximadamente tres veces superior que en el caso de usar el EM-638. Hay que analizar si esa huella, además de ser más ancha, es también más profunda. Antes de ello, es preciso observar el desgaste en la huella.

Figura 82. Imagen de la huella en el punzón en el ensayo AISI 52100 / EM-638 (50x)



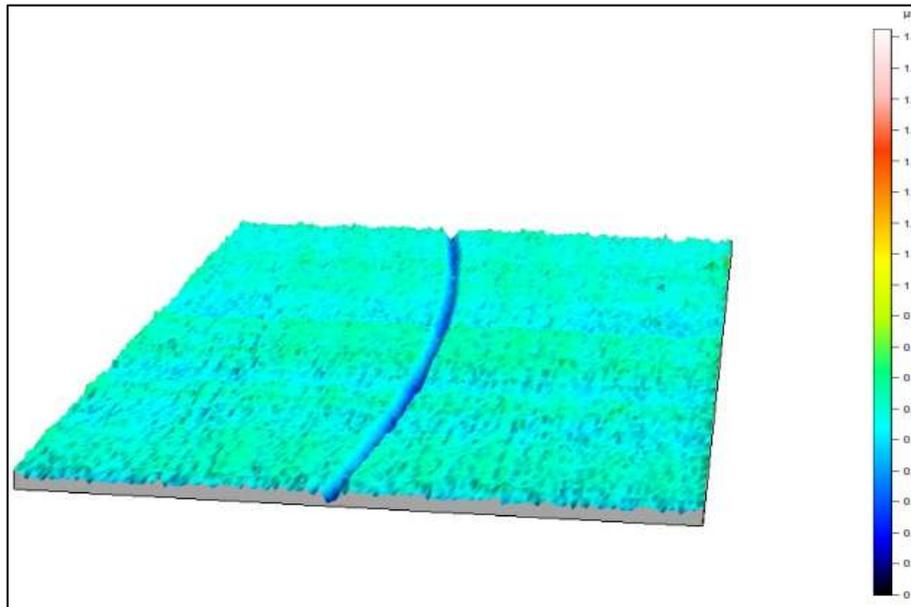
En esta ocasión sí pueden apreciarse partículas de desgaste en el punzón de la bola de zafiro. Se trata de un desgaste abrasivo, ya que así lo indican las líneas paralelas visibles en la huella.

Figura 83. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642 (200x)



En la micrografía puede verse claramente un surco continuo producido por la huella, así como la acumulación de material en los bordes que ha producido la bola al deslizar sobre el acero.

Figura 84. Perfil topográfico de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642.



En este perfil puede verse con mayor claridad lo dicho. Se observa el surco de la bola así como la profundidad alcanzada, que no es excesiva. Se trata, pues, de un desgaste suave. Incluso así, es muy superior al EM-638.

Ahora analizamos los espectros dentro y fuera de la huella para ver las diferencias.

Figura 85. Espectro EDS del interior de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642.

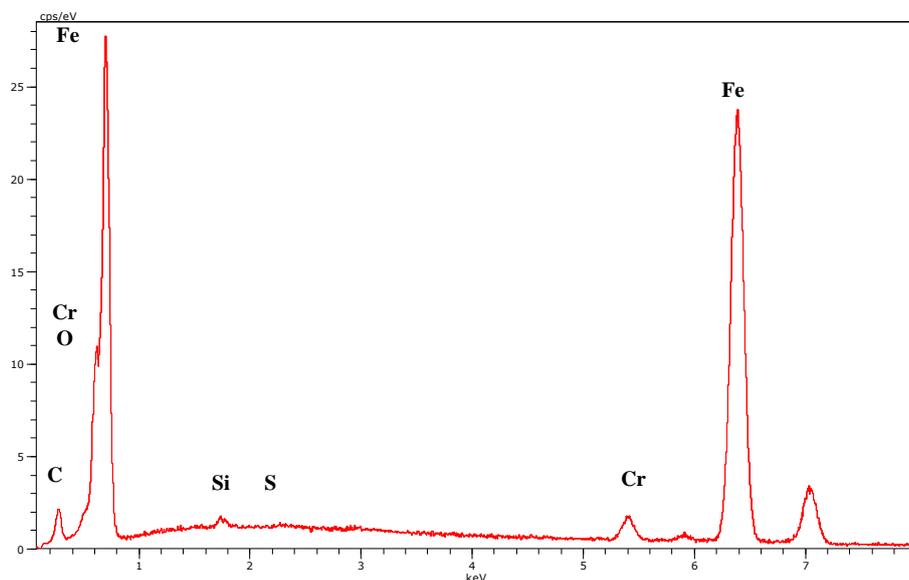
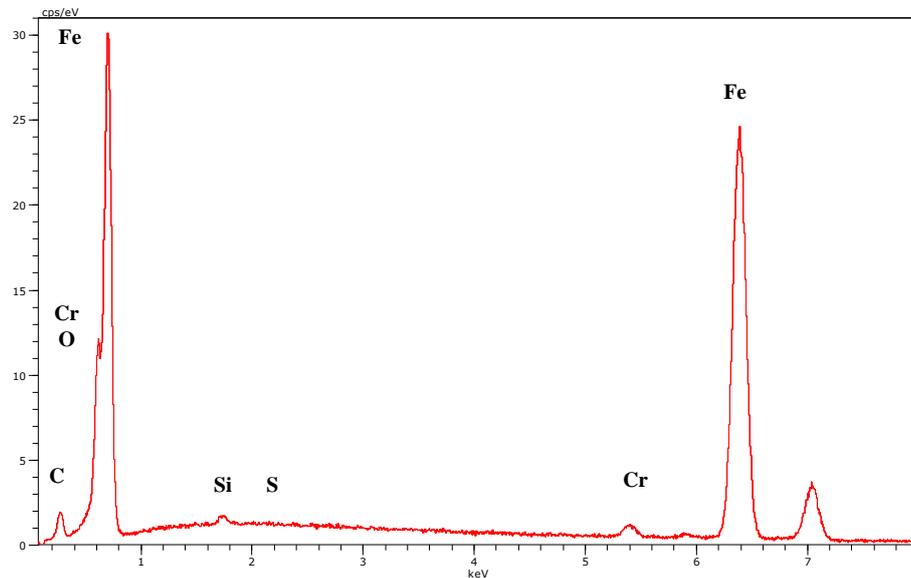


Figura 86. Espectro EDS del exterior de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642.



A simple vista puede observarse un ligero aumento del pico de Cromo en el interior de la huella. Por lo demás, apenas hay diferencia alguna.

En cuanto al análisis elemental que se muestra a continuación, se verifica ese aumento de Cromo en el interior de la huella. Apenas hay oxidación en el interior con respecto al exterior. Existen unas pequeñas disminuciones de Hierro y Silicio, pero no son significativas. Además del Cromo, también existe un aumento de Carbono y de Azufre en el interior.

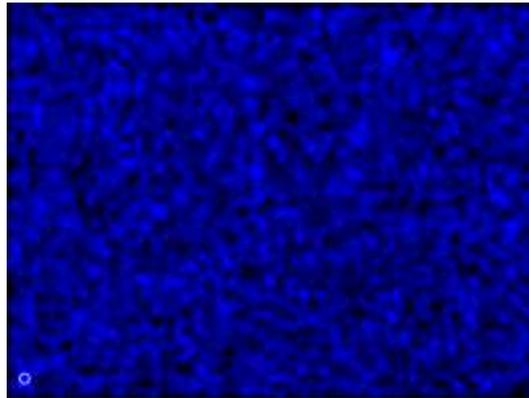
Tabla 23. Análisis elemental dentro y fuera de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642

<i>Elemento</i>	<i>Dentro de la huella (wt %)</i>	<i>Fuera de la huella (wt %)</i>
<i>Fe</i>	90,43	92,37
<i>Cr</i>	2,74	1,54
<i>O</i>	0,08	0,06
<i>C</i>	6,02	5,30
<i>S</i>	0,19	0,06
<i>Si</i>	0,54	0,67

Nuevamente se observa una parte del mapa elemental. En este caso se muestra el Oxígeno para visualizar que no hay oxidación en el interior de la huella a diferencia del EM-638.

Figura 87. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638

Oxígeno



3.3. ENSAYO AISI 316L / EM-638

Tabla 24. Condiciones medias en el ensayo AISI 316L/ EM-638

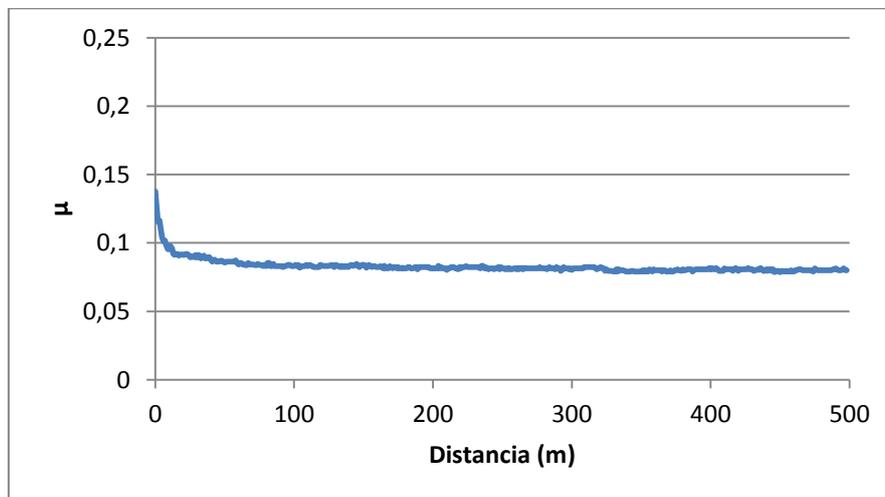
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
<i>Promedio</i>	<i>23.7</i>	<i>51</i>	<i>0.069</i>	<i>0.751</i>

3.3.1. Coeficiente de fricción

Tabla 25. Coeficiente de fricción promedio en el ensayo AISI 316L / EM-638

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
<i>0.083</i>	<i>0.008</i>

Figura 88. Evolución del coeficiente de fricción medio en el ensayo AISI 316L / EM-638.



Utilizando el AISI 316L con el EM-638 se aprecia en la gráfica que, tras el periodo transitorio inicial, el valor de la fricción tiende a ser constante, en torno a 0,083, sin apenas variaciones. Recordando el caso AISI 52100 / EM-638, donde se apreciaba algo similar, existía un valor casi estacionario sin apenas variaciones, con la salvedad del valor numérico, que lógicamente es distinto. En cualquier caso, este EM- 638 es un excelente lubricante en cuanto a fricción, ya que proporciona valores bajos y uniformes

sea cual sea el material (lógicamente en el AISI 52100 se obtienen valores de fricción inferiores que en el AISI 316L debido a la mayor dureza del primero).

3.3.2. Desgaste

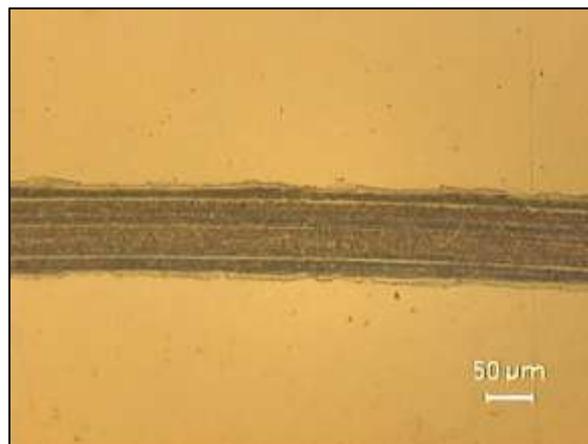
Tabla 26. Volumen y tasa de desgaste medio en el ensayo AISI 316L / EM-638

Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
$1.21 \cdot 10^{-3}$	$2.36 \cdot 10^{-4}$	$2.46 \cdot 10^{-6}$	$4.81 \cdot 10^{-7}$	$2.41 \cdot 10^{-6}$	$4.72 \cdot 10^{-7}$

Como se ha comentado, el AISI 316L posee menor dureza que el AISI 52100, con lo cual se va a producir desgaste, y además severo que los anteriores viendo los órdenes de magnitud. A continuación hay que observar cómo se ha producido ese desgaste.

3.3.3. Mecanismos de desgaste

Figura 89. Imagen de la huella a 20x para AISI 316L / EM-638.



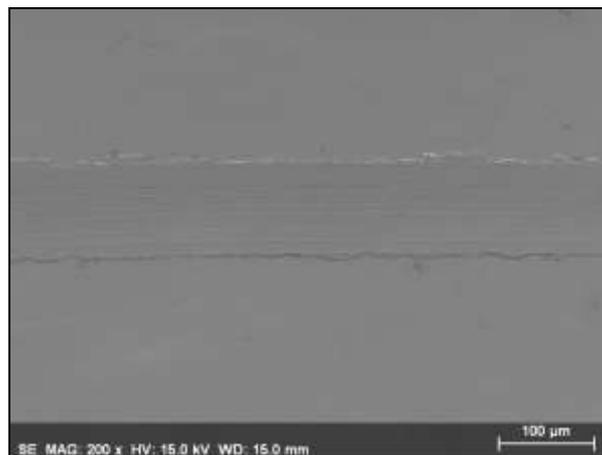
En la figura 89 puede verse el surco dejado por la bola, donde se observa que el desgaste producido es principalmente abrasivo. En cambio, en la bola (figura 90), se observan pequeños restos de material, en forma de líneas rectas, lo que le da un carácter

abrasivo al desgaste, además de que se han quedado pegadas, lo que hace indicar que se ha producido un desgaste adhesivo con componentes de abrasión en la probeta.

Figura 90. Imagen de la huella en el punzón en el ensayo AISI 52100 / EM-638 (50x)



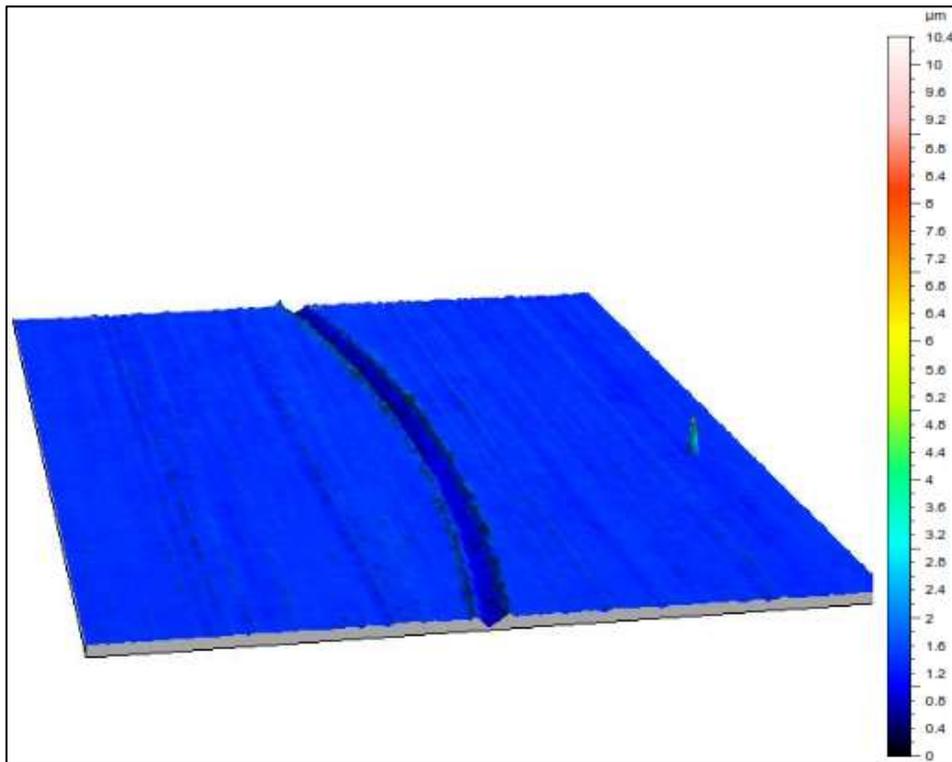
Figura 91. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638 (200x)



En esta micrografía puede verse muy claramente la huella producida tras el ensayo, donde los bordes del surco se han adherido plásticamente al metal adyacente y se aprecia el mecanismo de desgaste adhesivo con componente de abrasión descrito anteriormente.

A continuación puede verse el perfil tridimensional de la superficie de la probeta ensayada. Se aprecia que existe una mayor profundidad que en los ensayos anteriores.

Figura 92. Perfil topográfico de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.



Por último, el análisis de energías dispersivas dentro y fuera de la huella donde se observa que apenas hay variación alguna.

Figura 93. Espectro EDS del interior de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.

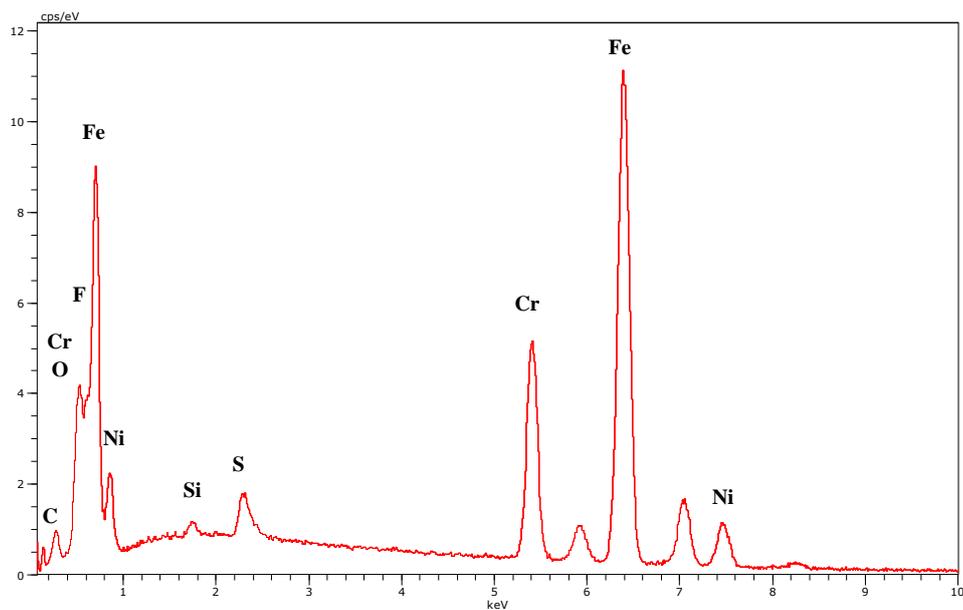
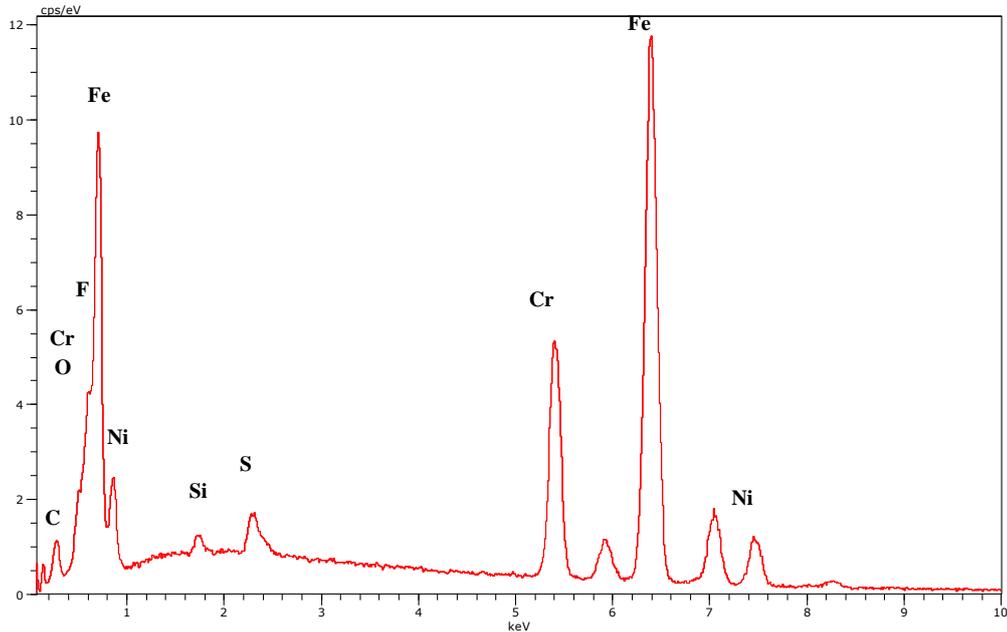


Figura 94. Espectro EDS del exterior de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638.



Por último, comentar que se ha producido una notable oxidación en el interior de la huella, perdiendo parte de Hierro, Carbono, Níquel y Cromo. En cuanto a los componentes propios del líquido EM-638, Azufre y Flúor, apenas hay variación alguna, aumentando ligeramente en el interior.

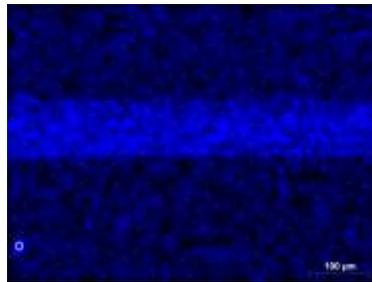
Tabla 27. Análisis elemental dentro y fuera de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638

<i>Elemento</i>	<i>Dentro de la huella (wt %)</i>	<i>Fuera de la huella (wt %)</i>
<i>Fe</i>	59,87	63,38
<i>Cr</i>	15,60	16,46
<i>O</i>	5,67	0,34
<i>C</i>	4,09	4,84
<i>S</i>	1,86	1,73
<i>Si</i>	0,50	0,59
<i>Ni</i>	8,88	9,26
<i>F</i>	3,54	3,41

Se muestra a continuación el mapa elemental del Oxígeno

Figura 95. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638

Oxígeno



Se visualiza claramente la oxidación producida en el interior de la huella.

3.4. ENSAYO AISI 316L / EM-642

Tabla 28. Condiciones medias en el ensayo AISI 316L/ EM-642

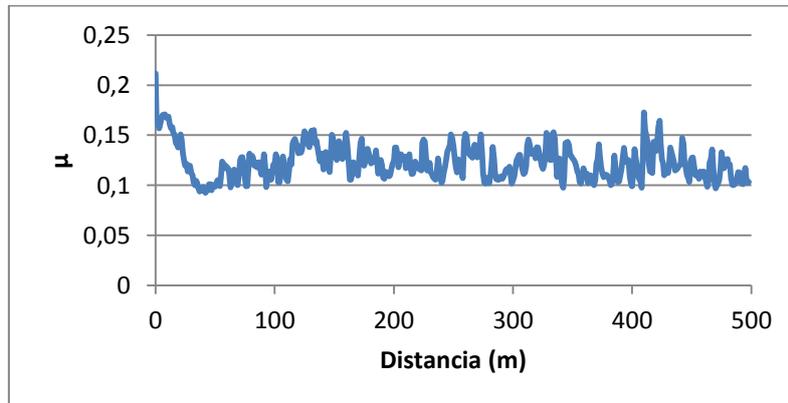
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
<i>Promedio</i>	<i>22.8</i>	<i>44</i>	<i>0.066</i>	<i>0.954</i>

3.4.1. Coeficiente de fricción

Tabla 29. Coeficiente de fricción promedio en el ensayo AISI 316L / EM-642

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
<i>0.122</i>	<i>0.005</i>

Figura 96. Evolución del coeficiente de fricción medio en el ensayo AISI 316L / EM-642.



En primer lugar, hay que destacar que la fricción que se produce con el AISI 316L / EM-642 es la mayor de todos los ensayos, en torno a 0,122. Además, esta fricción es muy irregular e instantánea, no produciéndose estabilización alguna a lo largo de los ensayos realizados. Supera por momentos valores de 0.17 cuando el EM-638 para este acero era incluso la mitad de este valor (0,083). Cabe esperar que esta fricción produzca un desgaste severo en el material.

Como ya se comentó, esto puede ser debido a la diferencia de viscosidad de ambos fluidos, o por la formación de compuestos químicos en la interfase que, en este caso, empeoran la fricción.

3.4.2. Desgaste

Tabla 30. Volumen y tasa de desgaste medio en el ensayo AISI 316L / EM-642

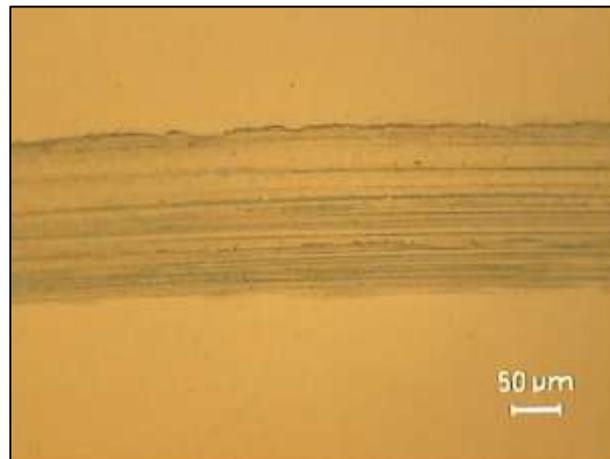
Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
$1.69 \cdot 10^{-3}$	$1.92 \cdot 10^{-4}$	$3.46 \cdot 10^{-6}$	$3.91 \cdot 10^{-7}$	$3.39 \cdot 10^{-6}$	$3.83 \cdot 10^{-7}$

A la vista de los resultados de desgaste obtenidos, se verifica lo dicho anteriormente. Este lubricante, EM-642, se comporta peor en contacto con el AISI 316L que el EM-638, al igual que ocurría con el otro acero ensayado.

Se prevé que el desgaste producido sea adhesivo con componente de abrasión, ya que el AISI 316L ha dado ese análisis con el otro lubricante.

3.4.3. Mecanismos de desgaste

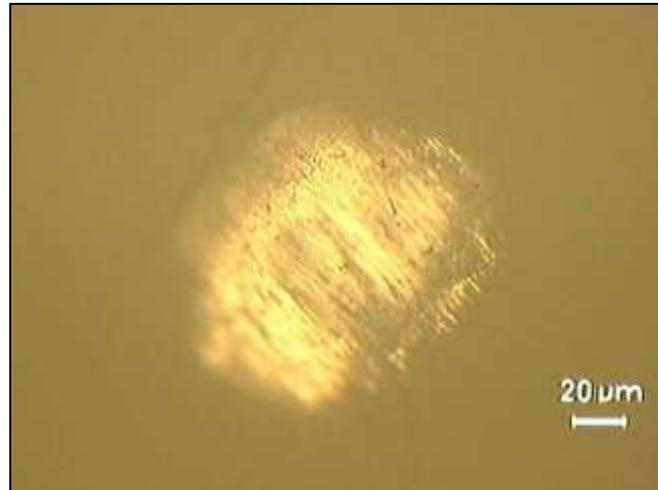
Figura 96. Imagen de la huella a 20x para AISI 316L / EM-642.



En la imagen del microscopio óptico se ven multitud de líneas, en el paso de la bola por la superficie. Es debido al gran surco que va produciendo y que hace que el material removido se sitúe en las paredes cercanas. Por tanto, existe adhesión y abrasión

en las muestras. Además, destaca la anchura de la huella, superior a la de los ensayos anteriores.

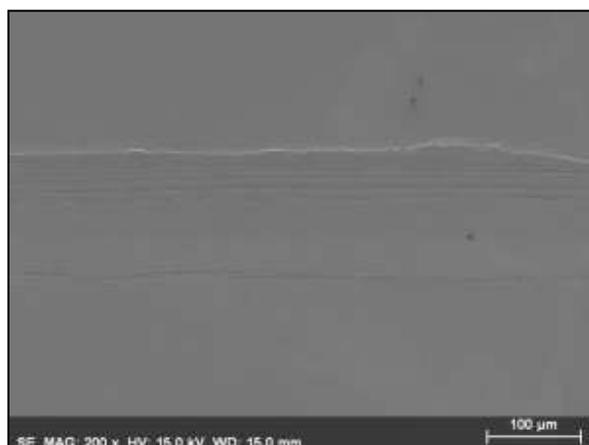
Figura 97. Imagen de la huella en el punzón en el ensayo AISI 52100 / EM-638 (50x)



En cuanto a la bola de zafiro, se ve con mucha nitidez el metal adherido a la superficie, así como las líneas paralelas que le dan carácter abrasivo al desgaste. Por tanto, existe también el mismo mecanismo de desgaste que en el caso anterior.

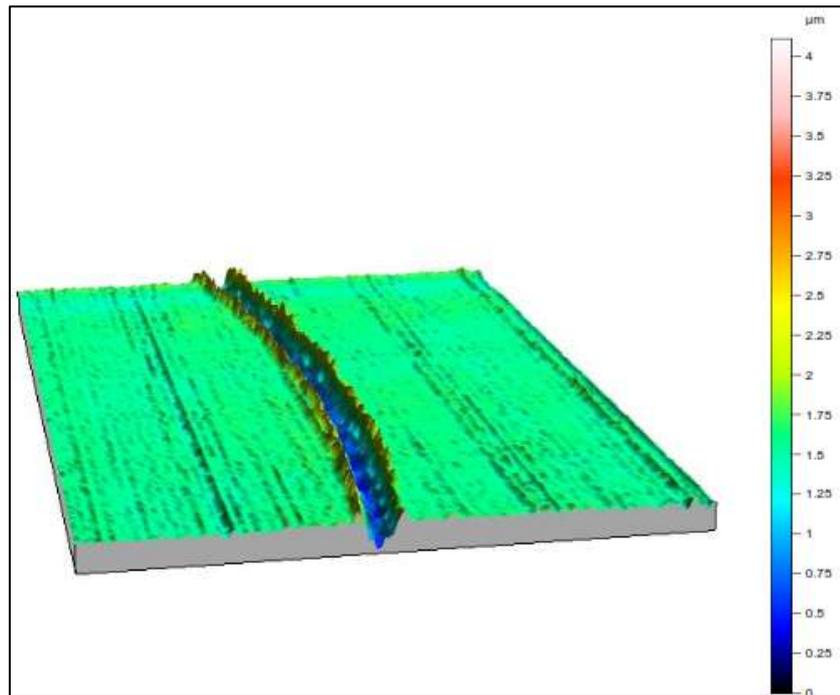
A continuación se muestra una micrografía electrónica de la probeta. Pueden verse longitudinalmente las líneas que muestran los picos producidos por las pasadas de la bola en el ensayo.

Figura 98. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642 (200x)



Pero quizás la mejor forma de verlo es a través del perfil tridimensional siguiente:

Figura 99. Perfil topográfico de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642.



Se aprecia muy claramente la gran profundidad alcanzada, la anchura y la diferencia de color de la superficie sin ensayar (verde, aprox. 1.5 µm) frente al huella (azul, 0.5 µm) y los picos (amarillo, 2.25 µm). Se ha producido una deformación plástica con acumulación de material en los bordes de la huella. Este lubricante produce mucho más desgaste que el EM-638, donde la bola penetraba mucho menos y no se producían estas grandes diferencias.

Figura 100. Espectro EDS del interior de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642.

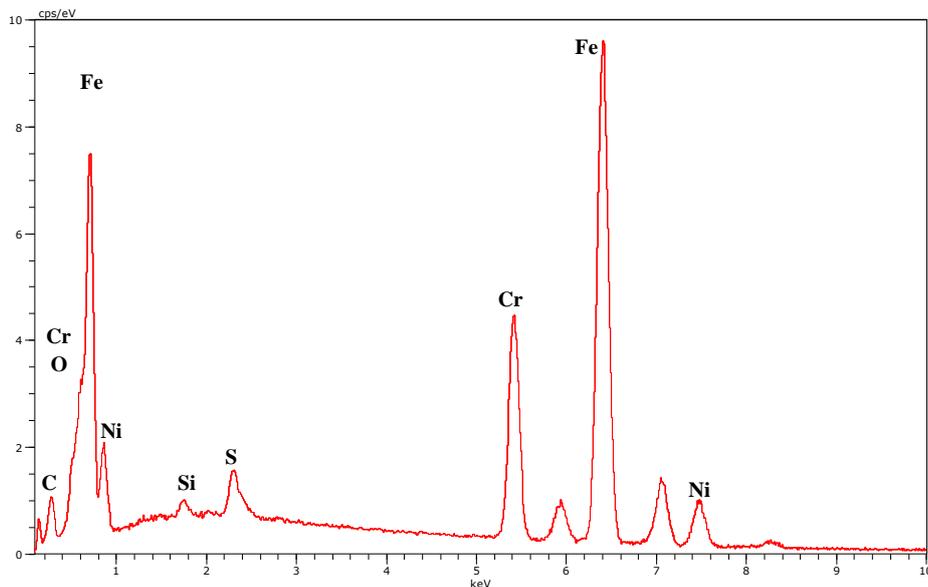
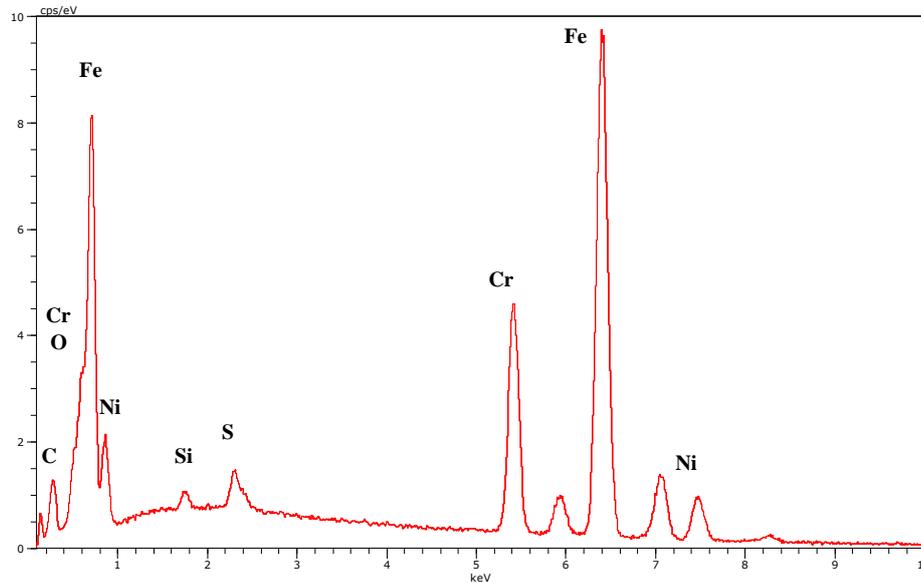


Figura 101. Espectro EDS del exterior de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642.



En el análisis de energías dispersivas no existe variación aparente dentro y fuera de la huella. En cuanto al análisis elemental, se ha producido un ligero aumento de Hierro, Níquel y Azufre en el interior de la huella. También hay una disminución de Carbono penas se ha producido oxidación en el interior. Los demás elementos prácticamente se mantienen constantes.

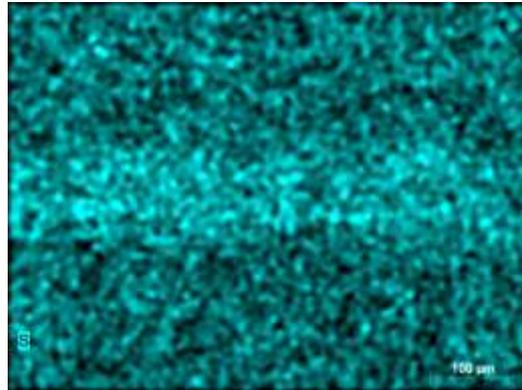
Tabla 31. Análisis elemental dentro y fuera de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638

Elemento	Dentro de la huella (wt %)	Fuera de la huella (wt %)
Fe	64,23	63,85
Cr	16,83	16,85
O	0,61	0,56
C	5,54	6,75
S	2,21	1,89
Si	0,60	0,67
Ni	9,98	9,42

En el mapa elemental de abajo puede verse el aumento de Azufre mencionado antes.

Figura 102. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638

Azufre



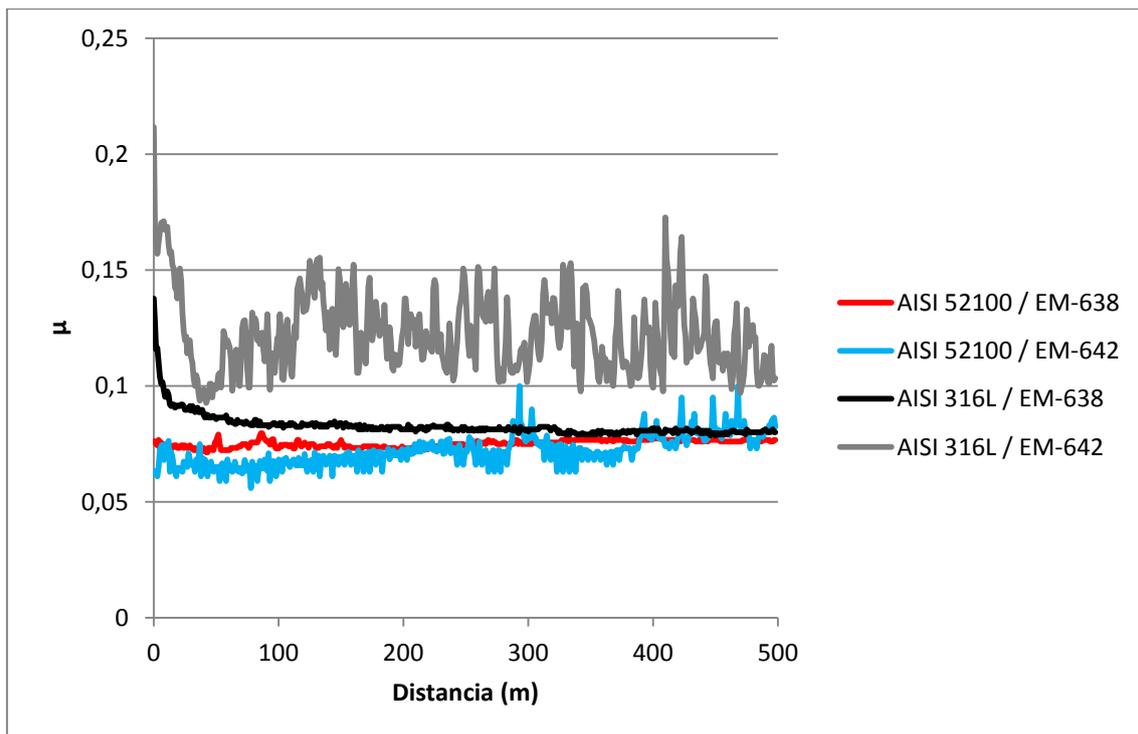
3.5. RESUMEN DE LOS RESULTADOS

3.5.1. Resultados globales de fricción

Tabla 32. Tabla Resumen de los ensayos de fricción

Ensayo	Coeficiente de fricción (μ)	
	Valor medio	Desviación típica
<i>AISI 52100 / EM-638</i>	<i>0.075</i>	<i>0.001</i>
<i>AISI 52100 / EM-642</i>	<i>0.072</i>	<i>0.002</i>
<i>AISI 316L / EM-638</i>	<i>0.083</i>	<i>0.008</i>
<i>AISI 316L / EM-642</i>	<i>0.122</i>	<i>0.005</i>

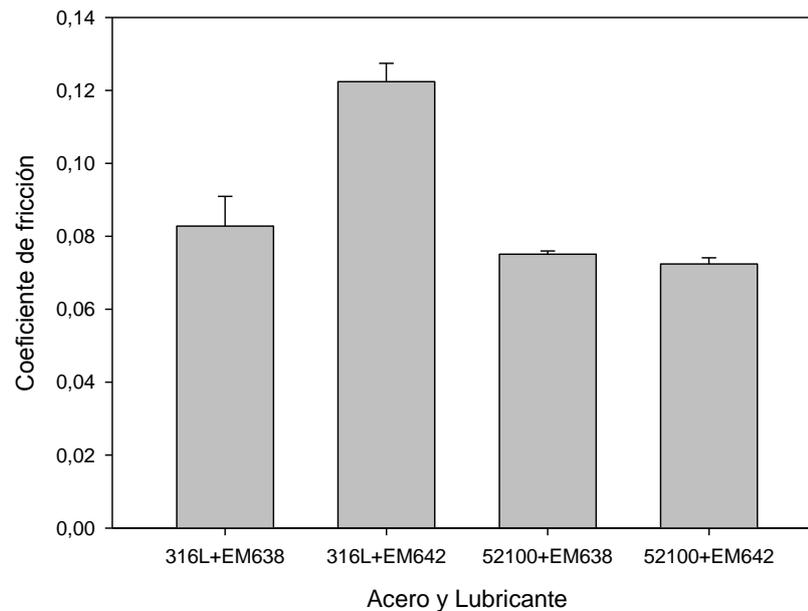
Figura 103. Comparación de la evolución del coeficiente de fricción medio en todos los ensayos.



En esta gráfica puede verse, modo comparativo, lo comentado en cada ensayo. El EM-638 produce una fricción prácticamente uniforme, mientras que el EM-642 es muy irregular.

En la siguiente figura se muestran la media y desviación típica de todos los ensayos de fricción.

Figura 104. Comparación del coeficiente de fricción en todos los ensayos.



Puede observarse claramente qué lubricante funciona mejor para cada acero en cuanto a fricción. En concreto, la fricción para el *AISI 316L* utilizando el *EM-638* es un 32 % menor frente al *EM-642*, mientras que para el *AISI 52100*, la fricción utilizando el *EM-642* es un 4 % inferior que el *EM-638*. Sin embargo, si se observa la Figura 103, se ve que ambas están muy próximas y que la fricción producida por el *EM-638* es más estacionaria mientras que la del *EM-642* inicialmente es inferior, pero a la mitad del ensayo comienza a superarla considerablemente.

En cuanto a los lubricantes, se observa que ambos funcionan mejor en el *AISI 52100* que en el *AISI 316L*. Como se ha dicho, esto es debido a la mayor dureza que posee el *AISI 52100*. Aun así, utilizando el *EM-638*, el *AISI 52100* proporciona una fricción ligeramente inferior (9 %) que si se usa el *AISI 316L*, estabilizándose al final hasta casi un mismo valor, mientras que para el segundo lubricante, el *EM-642*, este porcentaje es muy superior, obteniéndose una disminución del 41% de la fricción usando el *AISI 52100* frente al *AISI 316L*.

3.5.2. Resultados globales de desgaste

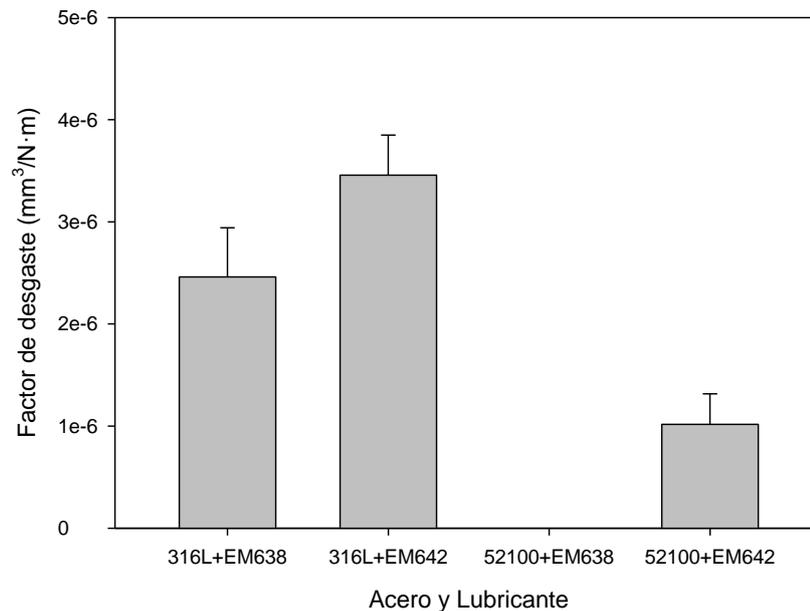
Tabla 33. Tabla Resumen de volumen y tasa de desgaste

Ensayo	Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
<i>AISI 52100 / EM-638</i>	<i>Despreciable</i>		<i>No aplicable</i>		<i>No aplicable</i>	
<i>AISI 52100 / EM-642</i>	$4.98 \cdot 10^{-4}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$	$1.02 \cdot 10^{-6}$	$2.98 \cdot 10^{-7}$	$9.97 \cdot 10^{-7}$	$2.92 \cdot 10^{-7}$
<i>AISI 316L / EM-638</i>	$1.21 \cdot 10^{-3}$	$2.36 \cdot 10^{-4}$	$2.46 \cdot 10^{-6}$	$4.81 \cdot 10^{-7}$	$2.41 \cdot 10^{-6}$	$4.72 \cdot 10^{-7}$
<i>AISI 316L / EM-642</i>	$1.69 \cdot 10^{-3}$	$1.92 \cdot 10^{-4}$	$3.46 \cdot 10^{-6}$	$3.91 \cdot 10^{-7}$	$3.39 \cdot 10^{-6}$	$3.83 \cdot 10^{-7}$

En esta tabla resumen se muestran los resultados de desgaste de todos los ensayos promedios (los individuales tanto de fricción como de desgaste están en el ANEXO 1. ENSAYOS TRIBOLÓGICOS).

Puede verse como el AISI 52100 tiene un orden de magnitud inferior al resto en cuanto al desgaste siendo la tasa de desgaste también muy inferior, tal como puede verse en la siguiente figura.

Figura 105. Comparación del volumen de desgaste en todos los ensayos.

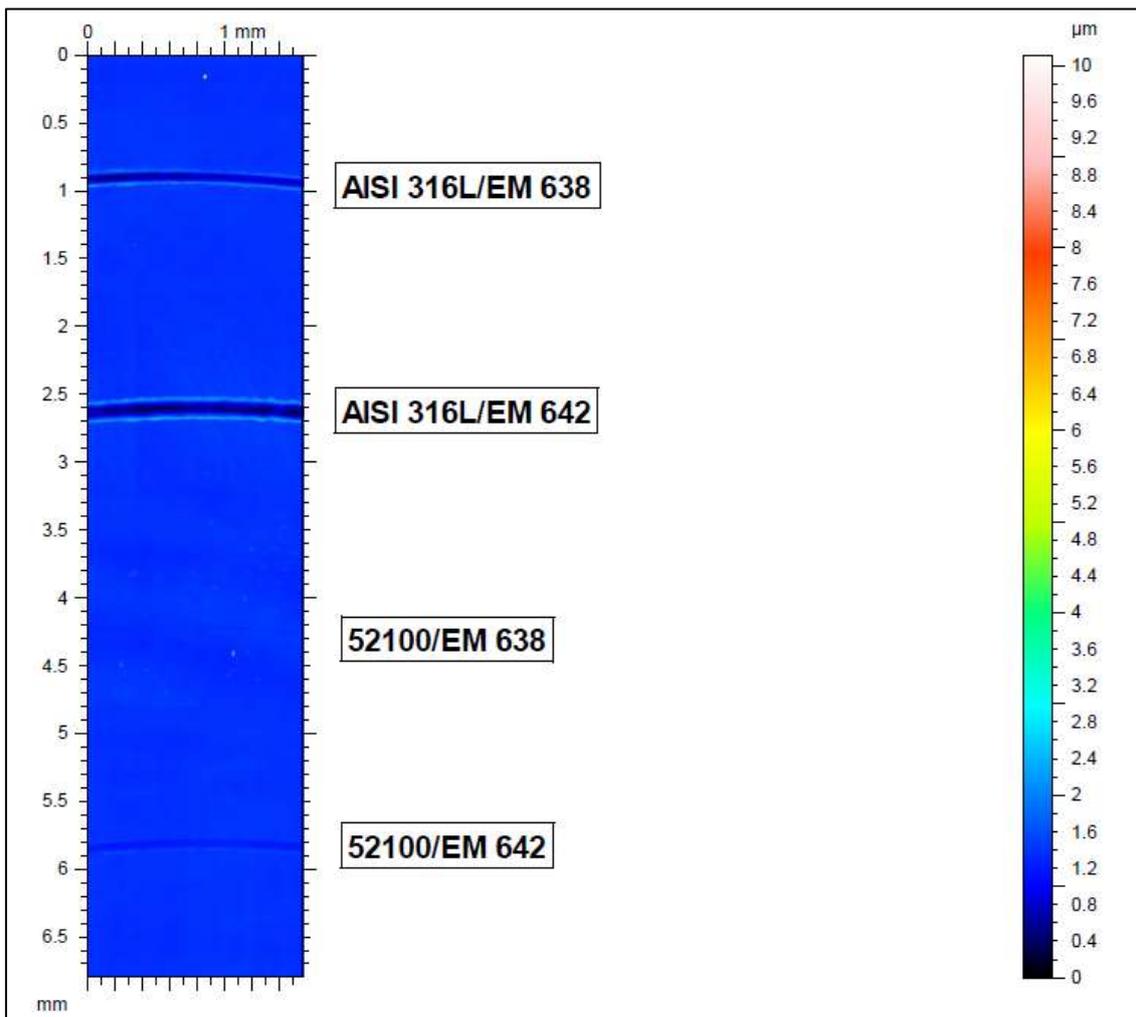


A modo comparativo, cabe destacar que el volumen desgastado es muy inferior en el *AISI 52100* que en el *AISI 316L*, (en concreto para el *EM-642* viene dado por una disminución de un 70%), pero esta diferencia reside fundamentalmente en la alta dureza que posee el *AISI 52100*. Como se aprecia en la tabla superior, el desgaste en el *AISI 52100 / EM-638* es nulo), con lo cual este lubricante *EM-638* funciona mejor en el *AISI 52100* que el *EM-642*.

Por otro lado, en el *AISI 316L* ocurre algo similar, disminuyendo en un 29% el desgaste utilizando el *EM-638* frente al *EM-642*.

En la siguiente figura se comparan las huellas producidas en los ensayos. Se aprecia con claridad la magnitud de las huellas producidas.

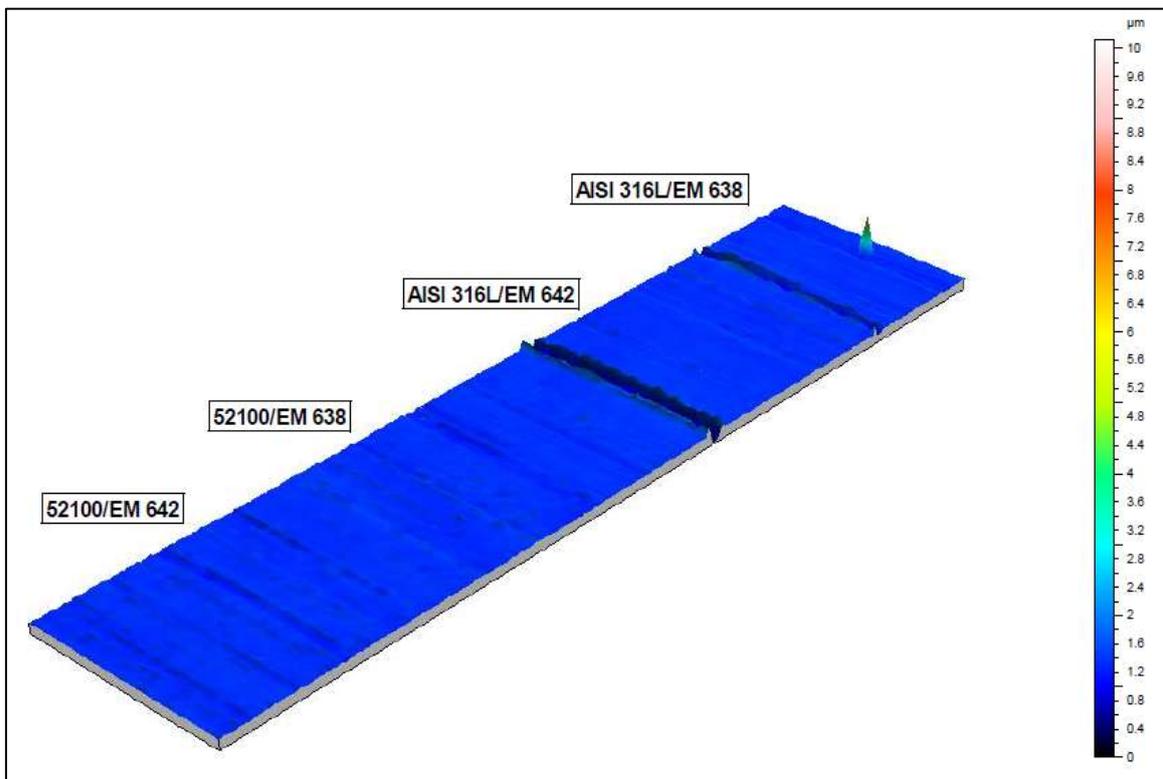
Figura 106. Comparación de la huella producida en los ensayos.



En la figura 107 puede verse el perfil tridimensional de cada ensayo. Se aprecia muy claramente la diferencia de desgaste en los dos tipos de aceros, siendo el más severo el producido en el ensayo AISI 316L/EM-642. Existe una gran diferencia de tamaño de la huella en un ensayo y otro, tanto en anchura como profundidad.

En cuanto al AISI 52100, en esta imagen apenas hay variación significativa en esta imagen.

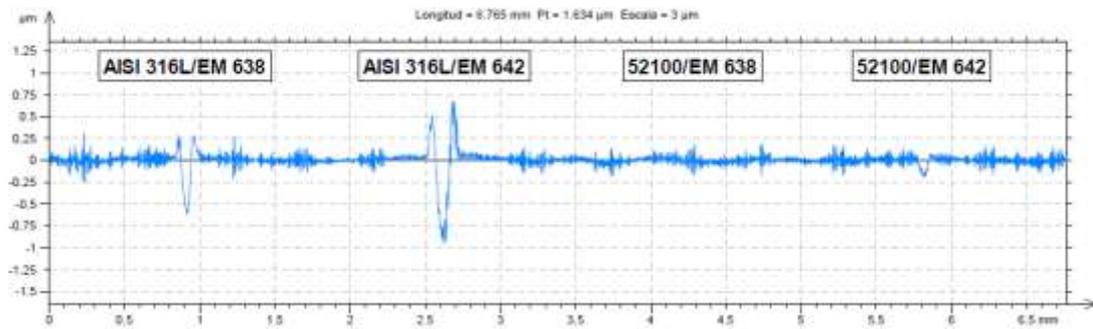
Figura 107. Comparación de los perfiles tridimensionales producidos en los ensayos.



Por último, en la siguiente figura se analiza el perfil bidimensional, donde puede verse la profundidad que alcanza la bola en los ensayos. Aunque en la figura 107 apenas había diferencia entre los ensayos del AISI 52100, en la figura 108 se puede ver un ligero pico en el AISI 52100 / EM-642, que lo hace tener peores cualidades como lubricante para este acero de rodamientos con respecto al otro ensayado.

Además, puede observarse la gran diferencia que se produce en el AISI 316L con los dos lubricantes, alcanzando el EM-642 una profundidad de casi el doble que si se utiliza el EM-638.

Figura 108. Comparación de los perfiles producidos en los ensayos.



CAPITULO 4.
CONCLUSIONES

4. CONCLUSIONES

A raíz de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. A nivel tribológico, tanto para el AISI 52100 como para el AISI 316L, el líquido iónico EM-638, con el anión que contiene azufre y flúor, es el que proporciona unos valores de desgaste menores que el lubricante EM-642, que posee el anión dicianamida (solamente Carbono y Nitrógeno).
2. En particular, en el AISI 52100, este desgaste es imperceptible. Por tanto, el EM-638 funciona como un excelente lubricante en con este acero.
3. El mecanismo de desgaste que se produce en todos los ensayos es el de adhesión con una componente de abrasión.
4. En lo referente a los coeficientes de fricción, para el AISI 52100 se obtienen valores inferiores del coeficiente de fricción usando el EM-642 mientras que para el AISI 316L se obtienen mejores resultados utilizando el EM-638.
5. Futuros estudios se podrían hacer con disoluciones de estos líquidos iónicos en aceites base.

CAPITULO 5.
BIBLIOGRAFÍA

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Consideration of Stribeck Diagram Parameters in the Investigation on Wear and Friction Behavior in Lubricated Sliding. (Marcia Marie Maru, Deniol K. Tanaka).
- [2]. Líquidos iónicos a temperatura ambiente: un nuevo medio para las reacciones químicas. Arturo Romero Salvador. Vol. 102, Nº. 1, pp 79-90, 2008. IX Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica.
- [3]. Aplicaciones de los líquidos iónicos en la industria química. E. García Bernal, A.P. de los Ríos, FJ. Hernández Fernández, A. Larrosa-Guerrero, A. Ginestá, S. Sánchez Segado, LJ. Lozano, C. Godínez.
- [4]. Apuntes de Mecánica de Fluidos Aplicada. Antonio Viedma Robles.
- [5]. Comportamiento al desgaste por deslizamiento en aceros inoxidable. PFC Jordi Renedo.
- [6]. Química verde: toxicidad y biodegradabilidad de líquidos iónicos. Dr. Jordi Sierra, Dra. M. Antonia Garau, Dra. Esther Martí, Dr. Robert Cruañas.
- [7]. Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.
- [8]. Formación de películas lubricantes límite en deslizamiento de alúmina contra acero lubricado por fluidos compatibles con el medio ambiente. PFC Miguel Jiménez Martínez.
- [9]. Estudio del comportamiento tribológico y de las interacciones de superficie de nuevos nanofluidos iónicos. Tulia Espinosa Rodríguez.
- [10]. The electrodeposition of aluminium from nonaqueous solutions at room temperature. F. H. Hurley, T. P. Weir. Journal Electrochemical Society 98 (1951) 207-212.
- [11]. Ionic Liquids: Past, present and future. C. Austen Angell, Younes Ansari and Zuofeng Zhao
- [12]. Ionic Liquids as Advanced Lubricant Fluids. María-Dolores Bermúdez, Ana-Eva Jiménez, José Sanes and Francisco-José Carrión

- [13]. Room temperature ionic liquid 1-ethyl-3 hexylimidazoliumbis (trifluoromethylsulfonyl) -imide as lubricant for steel–steel contact. Qiming Lu, Haizhong Wang, Chengfeng Ye, Weimin Liu _, Qunji Xue.
- [14]. Tribological behaviour of two imidazolium ionic liquids as lubricant additives for steel/steel contacts. A.Hernández Batteza, R. González, J.L. Viescaa, D. Blancob, E. Asedegbega, A. Osorio
- [15]. Imidazolium hexafluorophosphate ionic liquids as high temperature lubricants for steel–steel contacts. Meihuan Yao, Mingjin Fan, Yongmin Liang, Feng Zhou, Yanqiu Xia,
- [16]. Study of tribochemical decomposition of ionic liquids on a nascent steel surface. Renguo Lu, Shigeyuki Mori, Kimihiro Kobayashi, Hidetaka Nanao
- [17]. Ionic Liquids as Novel Lubricants and Additives for Diesel Engine Applications. Jun Qu, Peter J. Blau, Sheng Dai, Huimin Luo, Harry M. Meyer III
- [18]. Lubrication of Steel/Steel Contacts by Choline Chloride Ionic Liquids. S. D. A. Lawes, S. V. Hainsworth, P. Blake, K. S. Ryder, A. P. Abbott
- [19]. A Review of Ionic Liquids for Green Molecular Lubrication in Nanotechnology. Manuel Palacio, Bharat Bhushan
- [20]. Crown-Type Ionic Liquids as Lubricants for Steel-on-Steel System. Dong Jiang, Litian Hu, Dapeng Feng

II. ANEXOS

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

INDICE DE FIGURAS DE LOS ANEXOS	167
INDICE DE TABLAS DE LOS ANEXOS.....	170
ANEXO 1. ENSAYOS TRIBOLÓGICOS	165
1.1. Ensayos AISI 52100 / EM-638.....	165
1.1.1. Ensayo 52100_638_1	165
1.1.1.1. Coeficiente de fricción	165
1.1.1.2. Desgaste producido	165
1.1.1.3. Huellas en el punzón	166
1.1.1.4. Huellas en las probetas	167
1.1.2. Ensayo 52100_638_2	168
1.1.2.1. Coeficiente de fricción	168
1.1.2.2. Desgaste producido	168
1.1.2.3. Huellas en el punzón	169
1.1.2.4. Huellas en la probeta	170
1.1.3. Ensayo 52100_638_3	171
1.1.3.1. Coeficiente de fricción	171
1.1.3.2. Desgaste producido	171
1.1.3.3. Huellas en el punzón	172
1.1.3.4. Huellas en la probeta	173
1.2. Ensayos AISI 52100 / EM-642.....	174
1.2.1. Ensayo 52100_642_1	174
1.2.1.1. Coeficiente de fricción	174
1.2.1.2. Desgaste producido	175

ESTUDIO COMPARATIVO DE ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DE RODAMIENTOS EN
PRESENCIA DE NUEVOS TIPOS DE LUBRICANTES SINTÉTICOS

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

1.2.1.3.	Huellas en el punzón	175
1.2.1.4.	Huellas en la probeta	176
1.2.2.	Ensayo 52100_642_2	177
1.2.2.1.	Coeficiente de fricción	177
1.2.2.2.	Desgaste producido	177
1.2.2.3.	Huellas en el punzón	178
1.2.2.4.	Huellas en la probeta	179
1.2.3.	Ensayo 52100_642_3	180
1.2.3.1.	Coeficiente de fricción	180
1.2.3.2.	Desgaste producido	180
1.2.3.3.	Huellas en el punzón	181
1.2.3.4.	Huellas en la probeta	182
1.3.	Ensayos AISI 316L / EM-638	183
1.3.1.	Ensayo 316_638_1	183
1.3.1.1.	Coeficiente de fricción	183
1.3.1.2.	Desgaste producido	183
1.3.1.3.	Huellas en el punzón	184
1.3.1.4.	Huellas en la probeta	185
1.3.2.	Ensayo 316_638_2	186
1.3.2.1.	Coeficiente de fricción	186
1.3.2.2.	Desgaste producido	186
1.3.2.3.	Huellas en el punzón	187
1.3.2.4.	Huellas en la probeta	188
1.3.3.	Ensayo 316_638_3	189
1.3.3.1.	Coeficiente de fricción	189
1.3.3.2.	Desgaste producido	189

1.3.3.3.	Huellas en el punzón	190
1.3.3.4.	Huellas en la probeta	191
1.4.	Ensayos AISI 316L / EM-642	192
1.4.1.	Ensayo 316_642_1	192
1.4.1.1.	Coeficiente de fricción	192
1.4.1.2.	Desgaste producido	193
1.4.1.3.	Huellas en el punzón	194
1.4.1.4.	Huellas en la probeta	194
1.4.2.	Ensayo 316_642_2	195
1.4.2.1.	Coeficiente de fricción	195
1.4.2.2.	Desgaste producido	196
1.4.2.3.	Huellas en el punzón	197
1.4.2.4.	Huellas en la probeta	197
1.4.3.	Ensayo 316_642_3	198
1.4.3.1.	Coeficiente de fricción	198
1.4.3.2.	Desgaste producido	199
1.4.3.3.	Huellas en el punzón	200
1.4.3.4.	Huellas en la probeta	200
ANEXO 2. ENSAYOS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)		21
2.1.	Ensayos AISI 52100 / EM-638.....	205
2.2.	Ensayos AISI 52100 / EM-642.....	207
2.3.	Ensayos AISI 316L / EM-638	209
2.4.	Ensayos AISI 316L / EM-642	211

INDICE DE FIGURAS DE LOS ANEXOS

Figura A1. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_1.....	165
Figura A2. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_638_1	166
Figura A3. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_638_1	166
Figura A4. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_638_1 ...	167
Figura A5. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_638_1 ...	167
Figura A6. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_638_1 ...	167
Figura A7. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_2.....	168
Figura A8. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_638_2	169
Figura A9. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_638_2	169
Figura A10. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_638_2 .	170
Figura A11. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_638_2 .	170
Figura A12. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_638_2 .	170
Figura A13. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_3.....	171
Figura A14. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_638_3	172
Figura A15. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_638_3	172
Figura A16. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_638_3 .	173
Figura A17. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_638_3 .	173
Figura A18. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_638_3 .	173
Figura A19. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_1.....	174
Figura A20. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_642_1	175
Figura A21. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_642_1	175
Figura A22. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_642_1 .	176
Figura A23. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_642_1 .	176
Figura A24. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_642_1 .	176
Figura A25. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_2.....	177
Figura A26. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_642_2	178
Figura A27. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_642_2	178
Figura A28. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_642_2 .	179
Figura A29. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_642_2 .	179
Figura A30. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_642_2 .	179
Figura A31. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_3.....	180
Figura A32. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_642_3	181
Figura A33. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_642_3	181
Figura A34. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_642_3 .	182
Figura A35. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_642_3 .	182
Figura A36. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_642_3 .	182
Figura A37. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_1.....	183
Figura A38. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_638_1	184

Figura A39. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_638_1	184
Figura A40. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_638_1	185
Figura A41. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_638_1	185
Figura A42. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_638_1	185
Figura A43. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_2.....	186
Figura A44. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_638_2	187
Figura A45. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_638_2	187
Figura A46. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_638_2	188
Figura A47. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_638_2	188
Figura A48. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_638_2	188
Figura A49. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_3.....	189
Figura A50. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_638_3	190
Figura A51. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_638_3	190
Figura A52. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_638_3	191
Figura A53. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_638_3	191
Figura A54. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_638_3	191
Figura A55. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_1.....	192
Figura A56. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_642_1	193
Figura A57. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_638_1	194
Figura A58. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_638_1	194
Figura A59. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_638_1	194
Figura A60. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_638_1	195
Figura A61. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_2.....	195
Figura A62. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_642_2	196
Figura A63. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_642_2	197
Figura A64. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_642_2	197
Figura A65. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_642_2	197
Figura A66. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_642_2	198
Figura A67. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_3.....	198
Figura A68. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_642_3	199
Figura A69. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_642_3	200
Figura A70. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_642_3	200
Figura A71. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_642_3	200
Figura A72. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_642_3	201
Figura A73. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638 a 100x	205
Figura A74. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638 a 200x	205
Figura A75. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638.....	205
Figura A76. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642 a 100x.....	207

Figura A77. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642 a 200x.....	207
Figura A79. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-642.....	208
Figura A80. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638 a 100x.....	209
Figura A81. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638 a 200x.....	209
Figura A82. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638 a 400x.....	209
Figura A83. Mapa elemental del ensayo AISI 316L / EM-638.....	210
Figura A84. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642 a 100x.....	211
Figura A85. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642 a 200x.....	211
Figura A86. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642 a 400x.....	211
Figura A87. Mapa elemental del ensayo AISI 316L / EM-642.....	212
FiguraA78. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642 a 400x.....	207

INDICE DE TABLAS DE LOS ANEXOS

Tabla A1. Condiciones en el ensayo 52100_638_1	165
Tabla A2. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_1	165
Tabla A3. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_638_1	165
Tabla A4. Condiciones en el ensayo 52100_638_2	168
Tabla A5. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_2	168
Tabla A6. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_638_2	168
Tabla A7. Condiciones en el ensayo 52100_638_3	171
Tabla A8. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_3	171
Tabla A9. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_638_3	171
Tabla A10. Condiciones en el ensayo 52100_642_1	174
Tabla A11. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_1	174
Tabla A12. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_642_1	175
Tabla A13. Condiciones en el ensayo 52100_642_2	177
Tabla A14. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_2	177
Tabla A15. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_642_2	177
Tabla A16. Condiciones en el ensayo 52100_642_3	180
Tabla A17. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_3	180
Tabla A18. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_642_3	180
Tabla A19. Condiciones en el ensayo 316_638_1	183
Tabla A20. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_1	183
Tabla A21. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_638_1	183
Tabla A22. Condiciones en el ensayo 316_638_2	186
Tabla A23. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_2	186
Tabla A24. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_638_2	186
Tabla A25. Condiciones en el ensayo 316_638_3	189
Tabla A26. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_3	189
Tabla A27. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_638_3	189
Tabla A28. Condiciones en el ensayo 316_642_1	192
Tabla A29. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_1	192
Tabla A30. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_642_1	193
Tabla A31. Condiciones en el ensayo 316_642_2	195
Tabla A32. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_2	195
Tabla A33. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_642_2	196
Tabla A34. Condiciones en el ensayo 316_642_3	198
Tabla A35. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_3	198
Tabla A36. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_642_3	199

ANEXO 1. ENSAYOS TRIBOLÓGICOS

1.1. Ensayos AISI 52100 / EM-638

1.1.1. Ensayo 52100_638_1

Tabla A1. Condiciones en el ensayo 52100_638_1

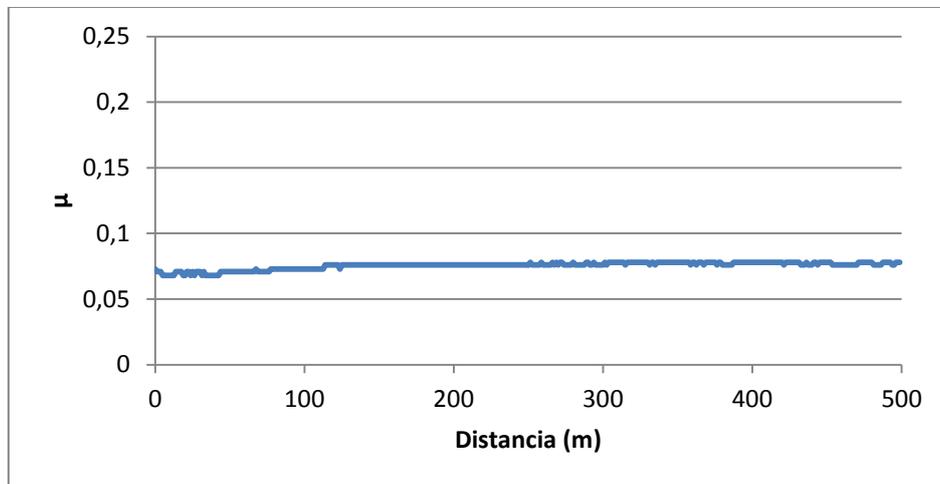
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
52100_638_1	23.5	52	0.071	0.860

1.1.1.1. Coeficiente de fricción

Tabla A2. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_1

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.075	0.0027

Figura A1. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_1.

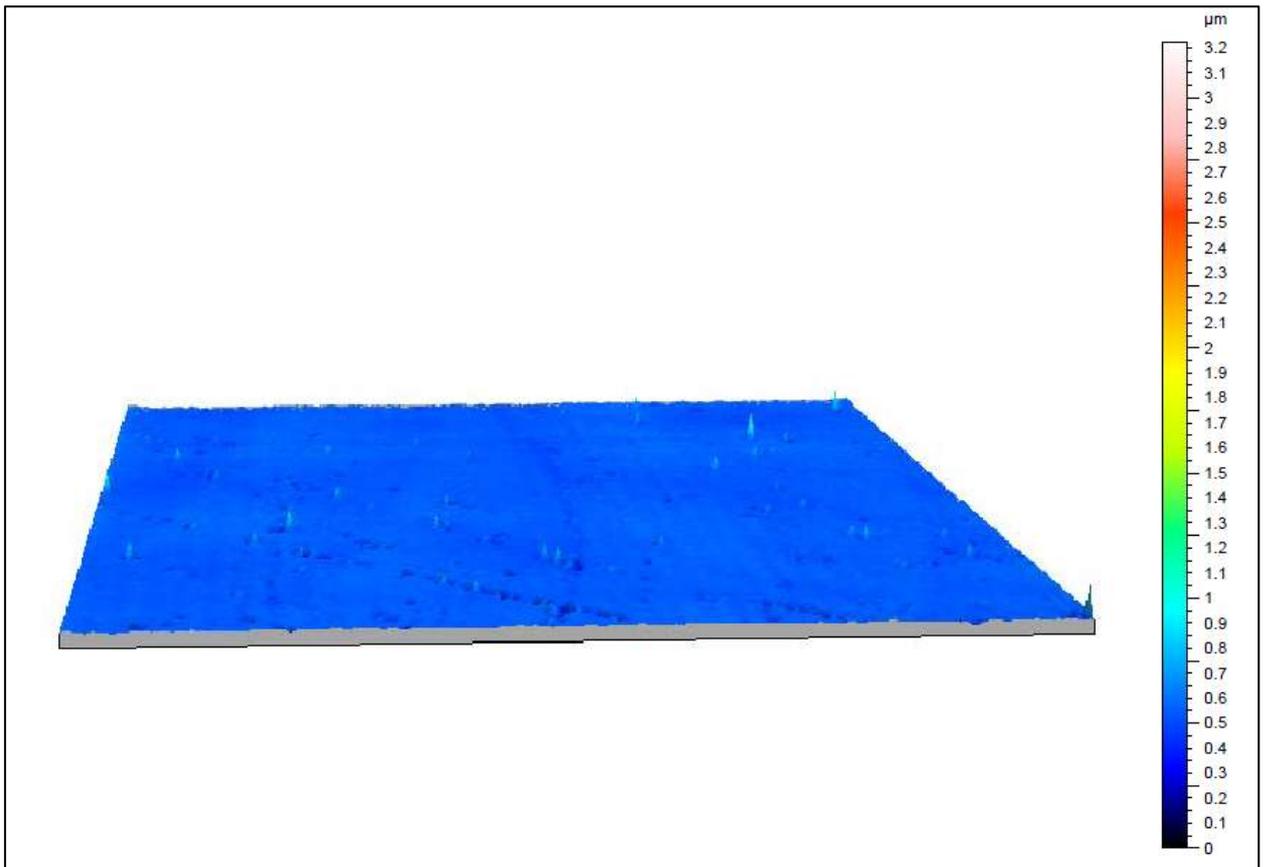


1.1.1.2. Desgaste producido

Tabla A3. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_638_1

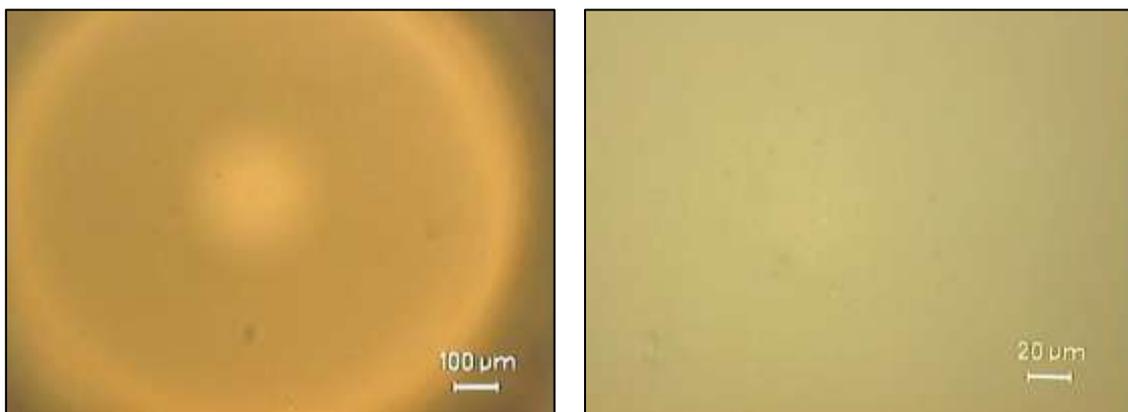
Volumen desgastado (mm^3)	Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)	Tasa de desgaste (mm^3/m)
Despreciable	No aplicable	No aplicable

Figura A2. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_638_1



1.1.1.3. Huellas en el punzón

Figura A3. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_638_1



1.1.1.4. Huellas en las probetas

Figura A4. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_638_1

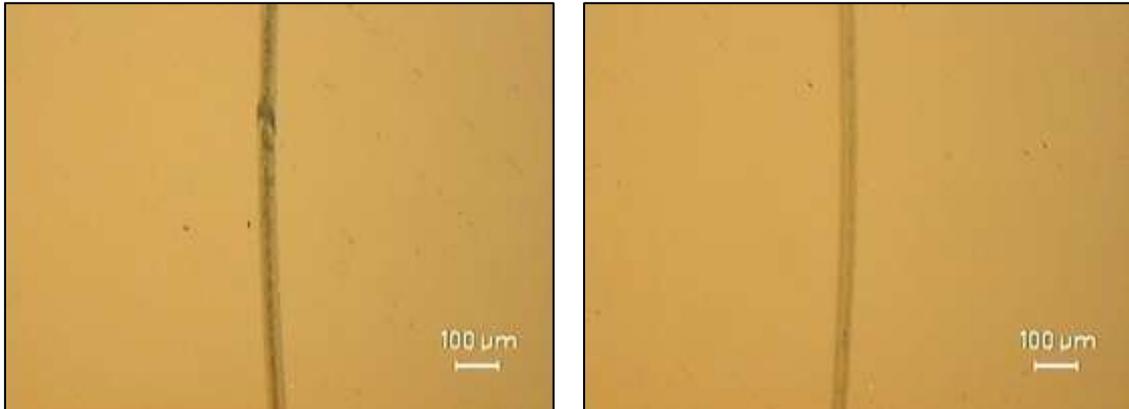


Figura A5. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_638_1

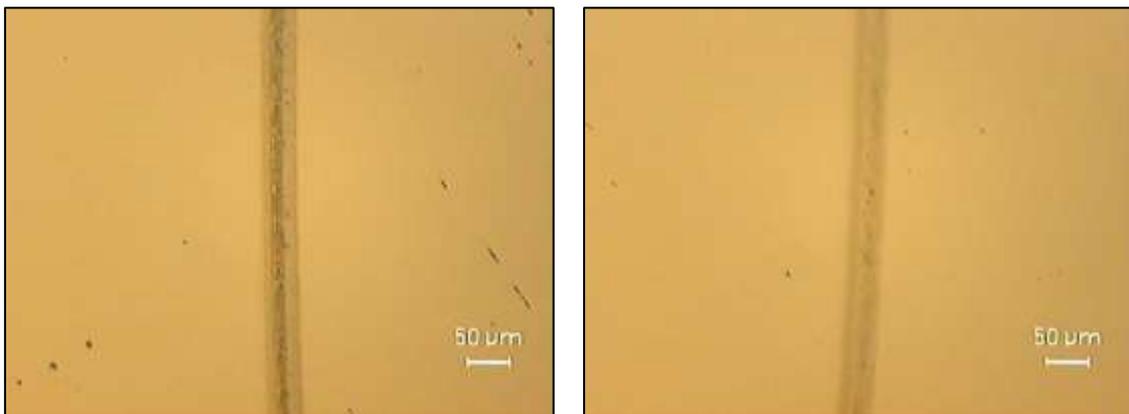
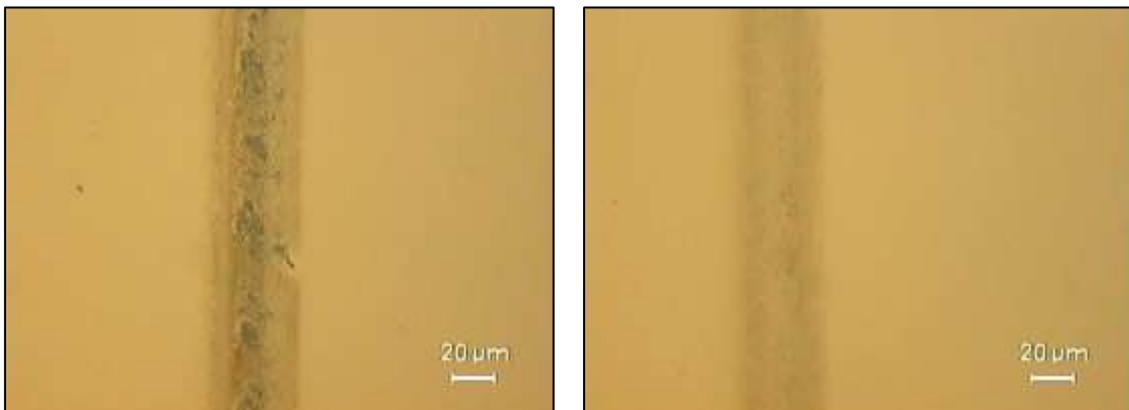


Figura A6. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_638_1



1.1.2. Ensayo 52100_638_2

Tabla A4. Condiciones en el ensayo 52100_638_2

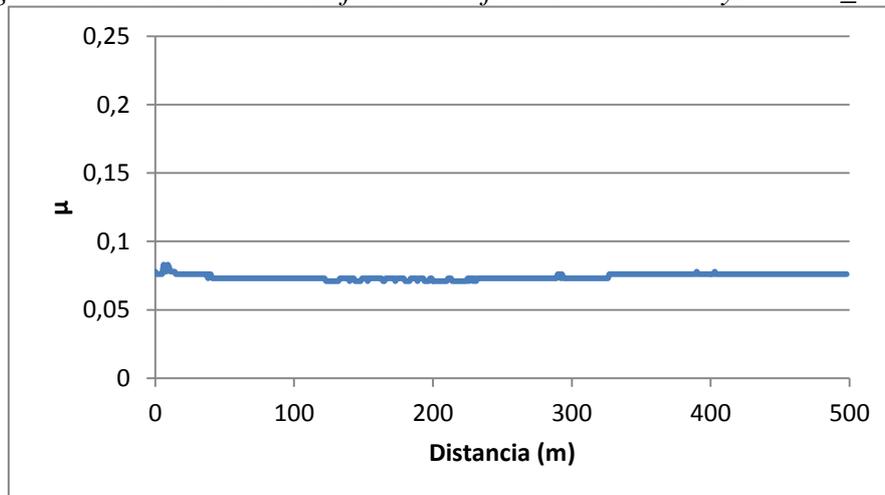
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
52100_638_2	23.8	45	0.058	0.608

1.1.2.1. Coeficiente de fricción

Tabla A5. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_2

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.074	0.0019

Figura A7. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_2.

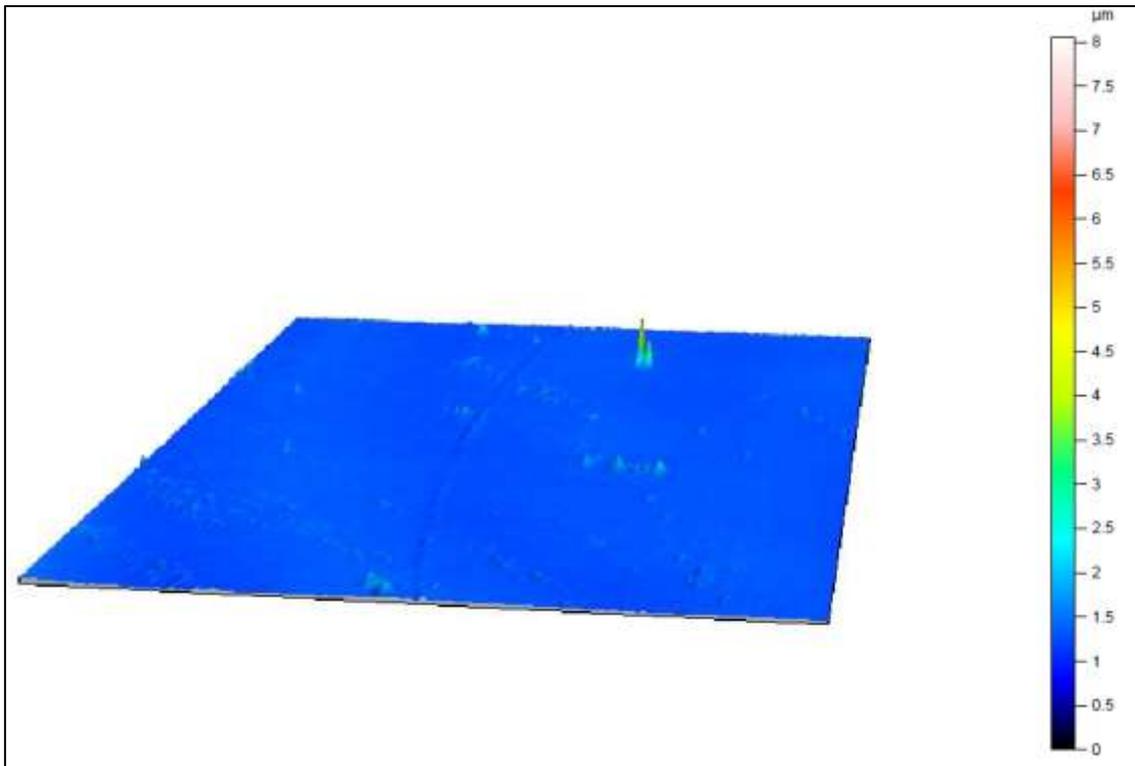


1.1.2.2. Desgaste producido

Tabla A6. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_638_2

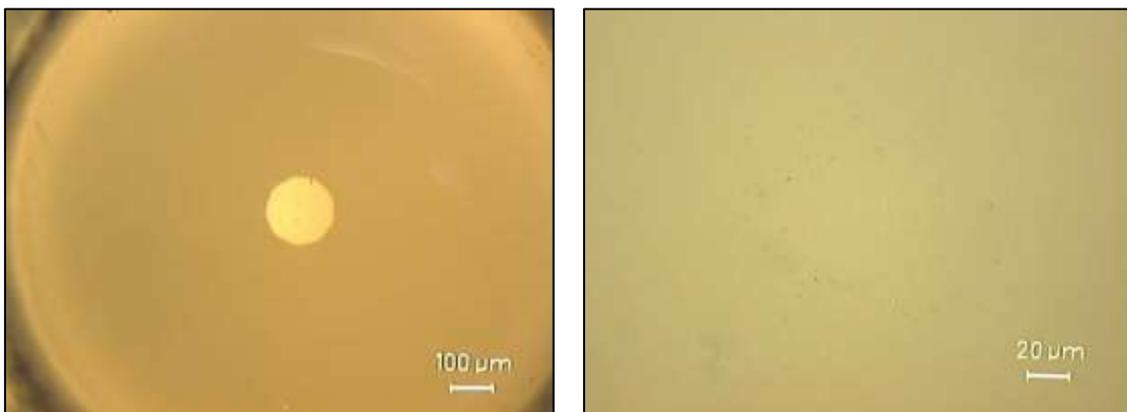
Volumen desgastado (mm ³)	Tasa de desgaste (mm ³ /N · m)	Tasa de desgaste (mm ³ /m)
Despreciable	No aplicable	No aplicable

Figura A8. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_638_2



1.1.2.3. Huellas en el punzón

Figura A9. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_638_2



1.1.2.4. Huellas en la probeta

Figura A10. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_638_2

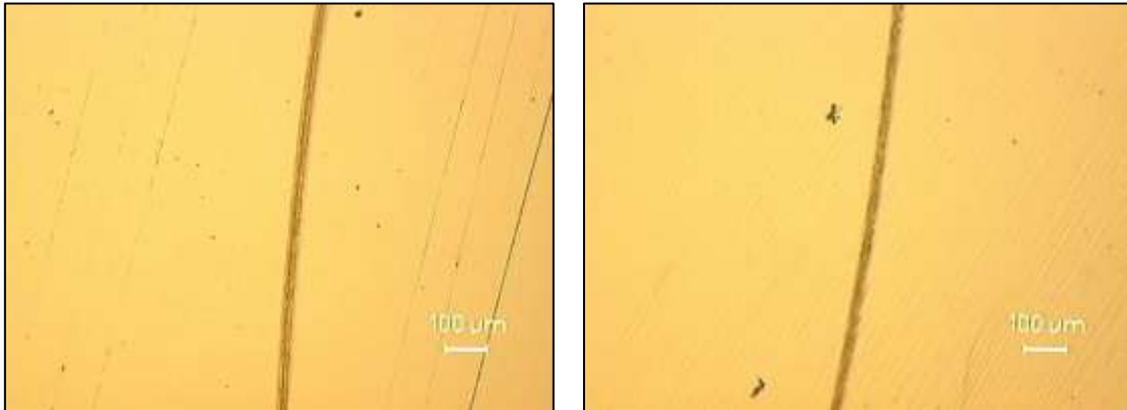


Figura A11. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_638_2

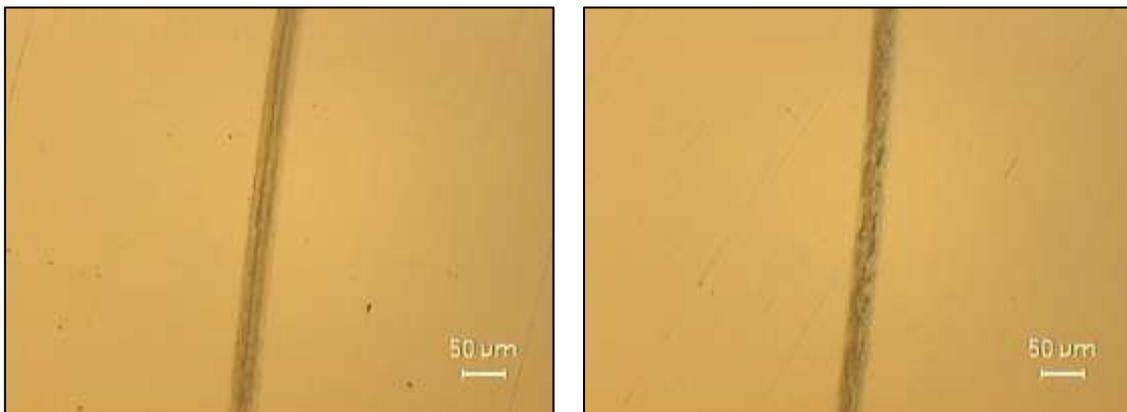
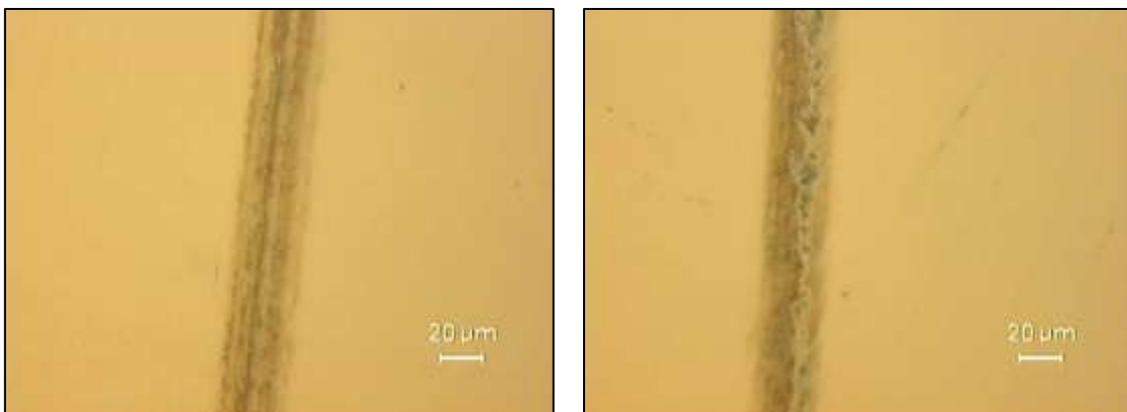


Figura A12. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_638_2



1.1.3. Ensayo 52100_638_3

Tabla A7. Condiciones en el ensayo 52100_638_3

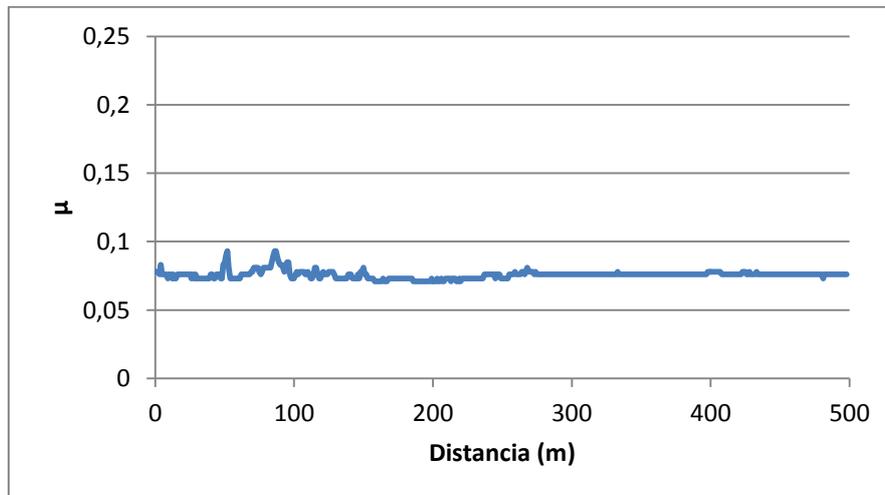
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
52100_638_3	23.5	52	0.049	0.568

1.1.3.1. Coeficiente de fricción

Tabla A8. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_3

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.076	0.003

Figura A13. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_638_3.

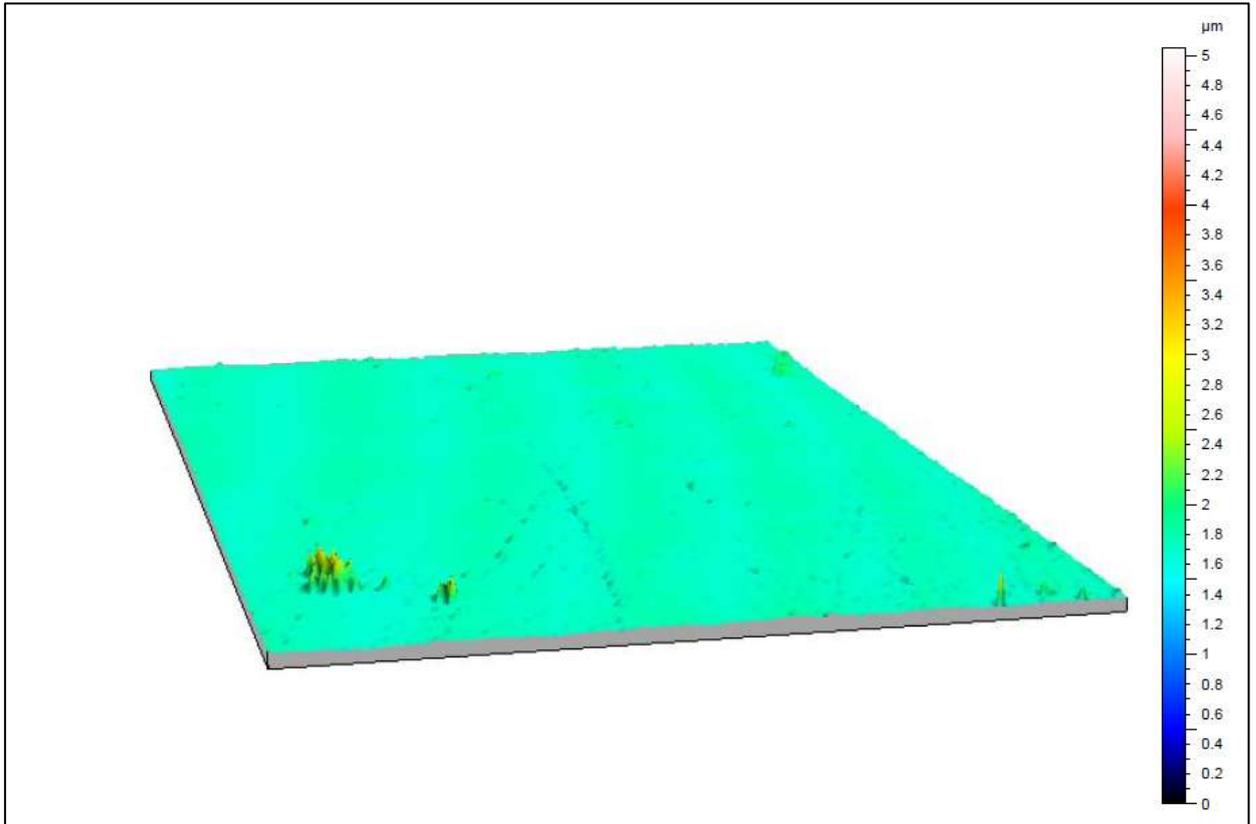


1.1.3.2. Desgaste producido

Tabla A9. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_638_3

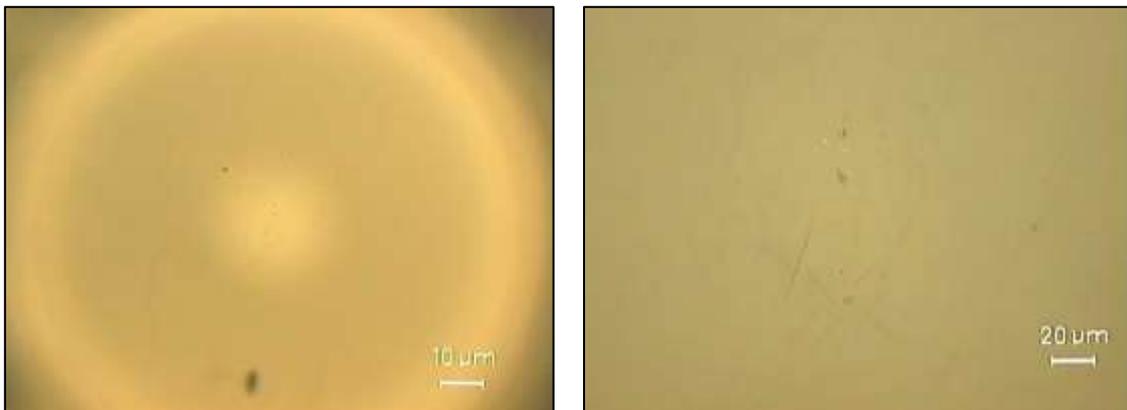
Volumen desgastado (mm^3)	Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)	Tasa de desgaste (mm^3/m)
Despreciable	No aplicable	No aplicable

Figura A14. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_638_3



1.1.3.3. Huellas en el punzón

Figura A15. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_638_3



1.1.3.4. Huellas en la probeta

Figura A16. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_638_3

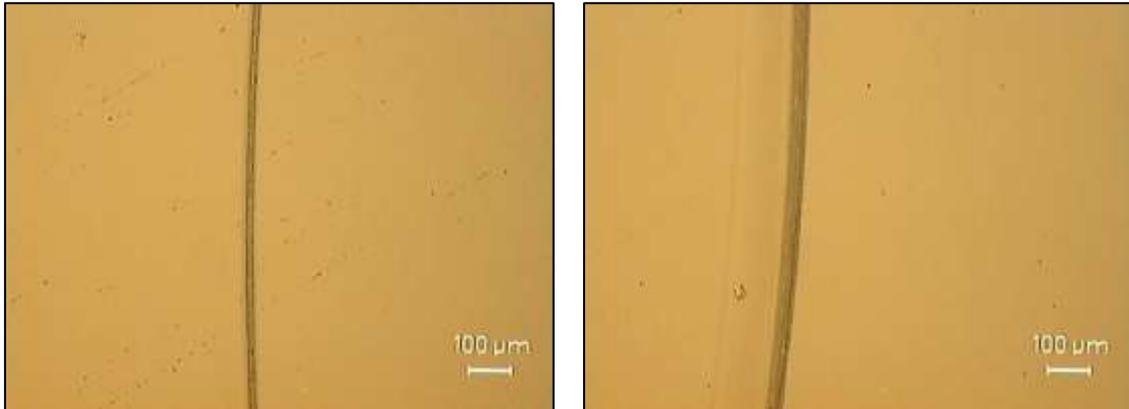


Figura A17. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_638_3

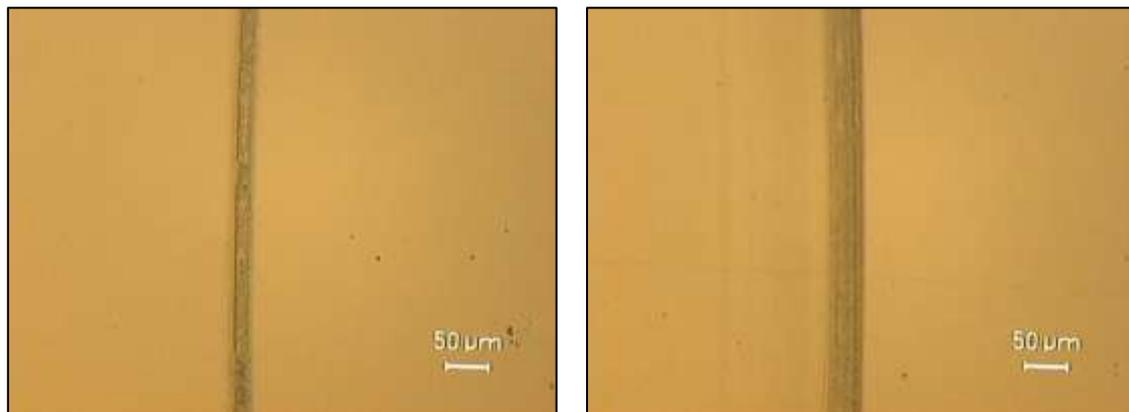
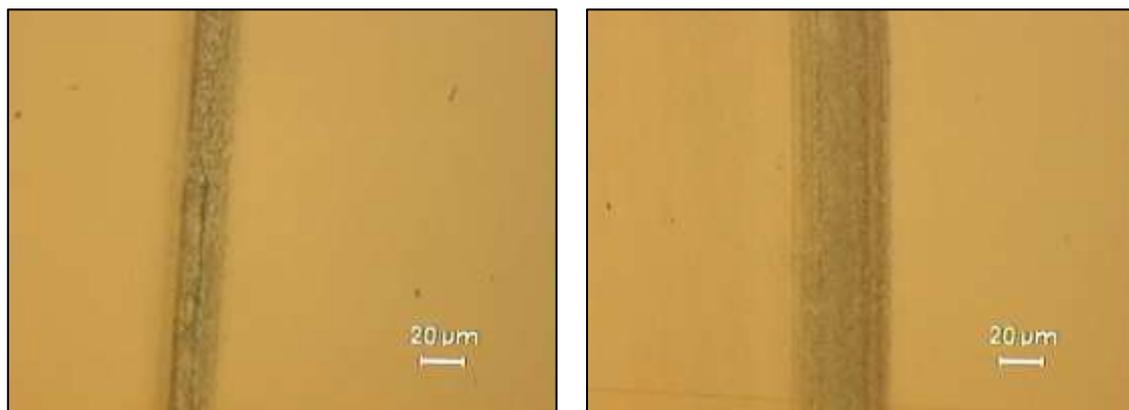


Figura A18. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_638_3



1.2. Ensayos AISI 52100 / EM-642

1.2.1. Ensayo 52100_642_1

Tabla A10. Condiciones en el ensayo 52100_642_1

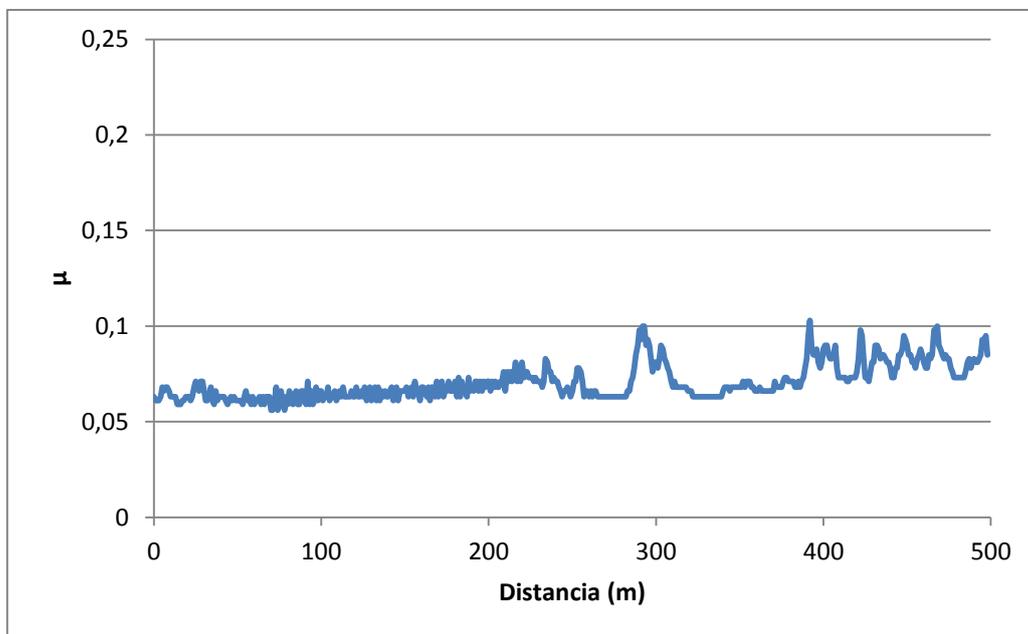
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
52100_642_1	23.1	50	0.064	0.960

1.2.1.1. Coeficiente de fricción

Tabla A11. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_1

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.070	0.009

Figura A19. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_1.

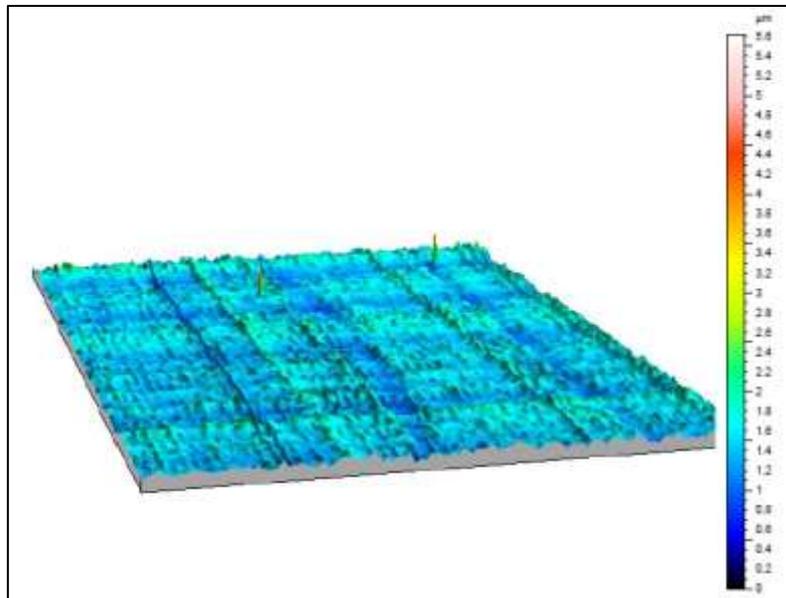


1.2.1.2. Desgaste producido

Tabla A12. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_642_1

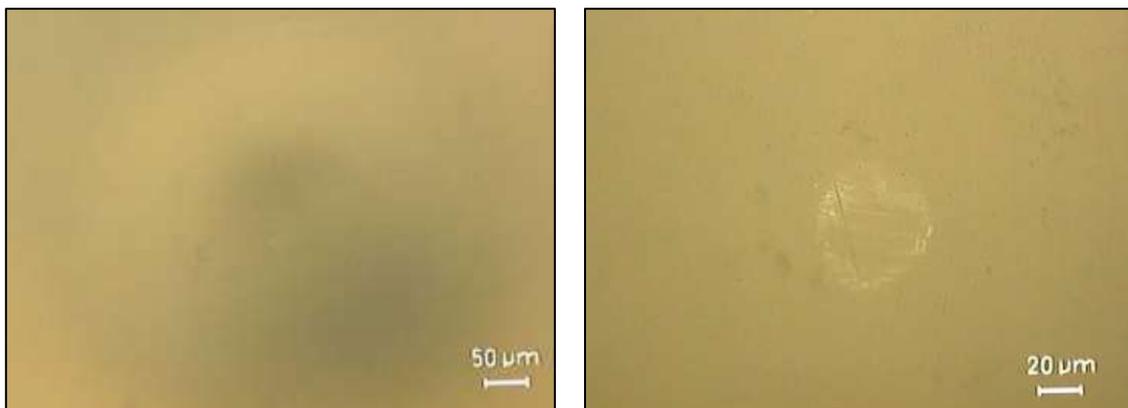
Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
$6.13 \cdot 10^{-4}$	$2.11 \cdot 10^{-4}$	$1.25 \cdot 10^{-6}$	$4.30 \cdot 10^{-7}$	$1.23 \cdot 10^{-6}$	$4.22 \cdot 10^{-7}$

Figura A20. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_642_1



1.2.1.3. Huellas en el punzón

Figura A21. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 20x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_642_1



1.2.1.4. Huellas en la probeta

Figura A22. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_642_1

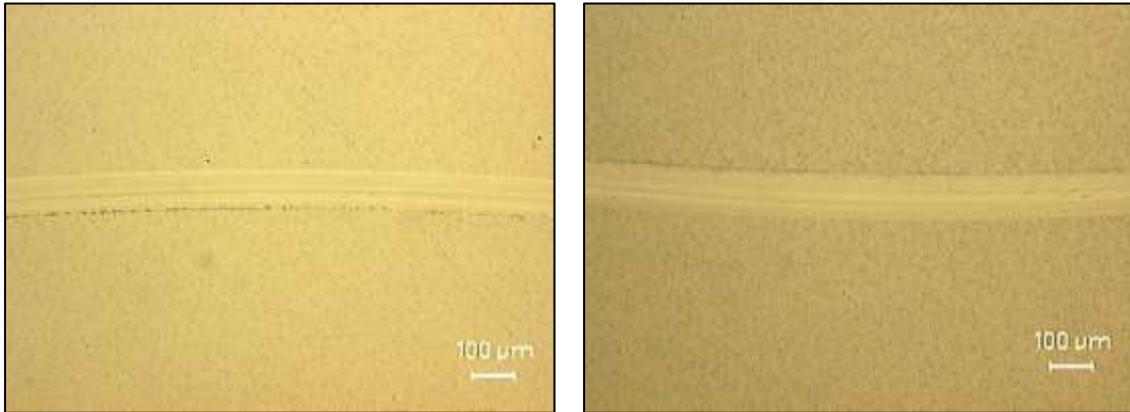


Figura A23. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_642_1

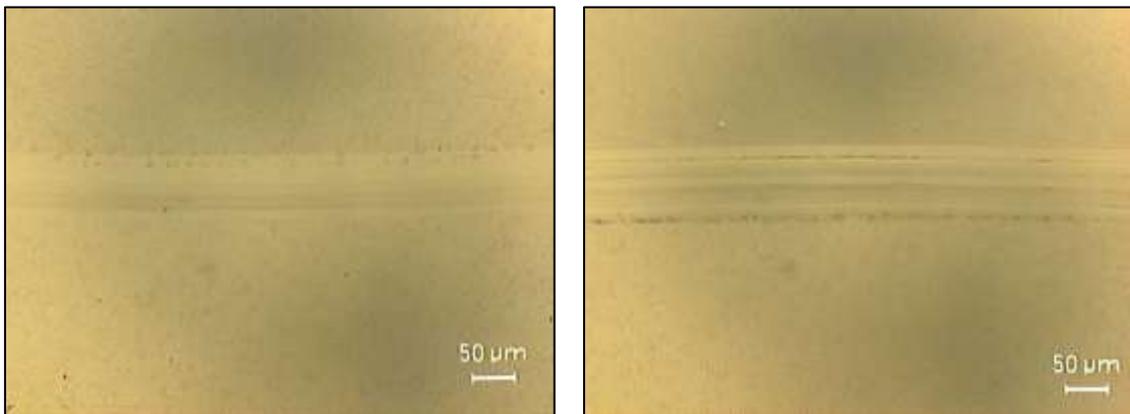
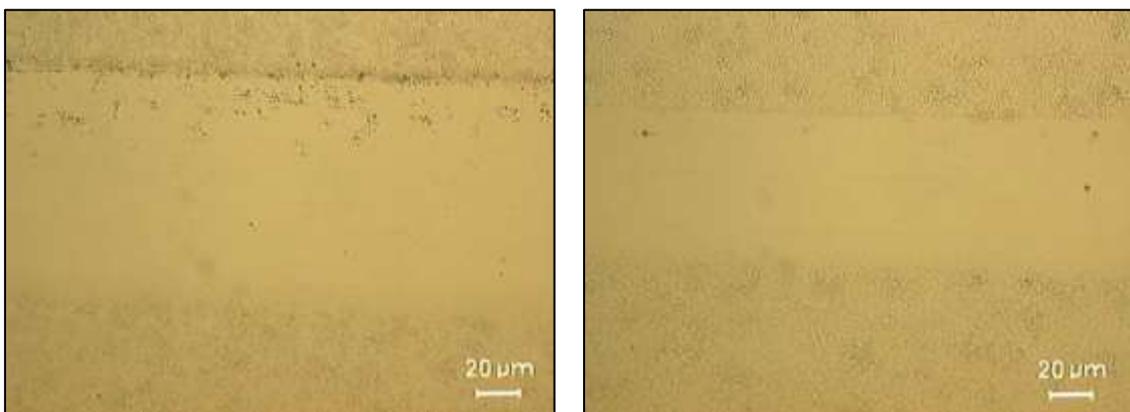


Figura A24. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_642_1



1.2.2. Ensayo 52100_642_2

Tabla A13. Condiciones en el ensayo 52100_642_2

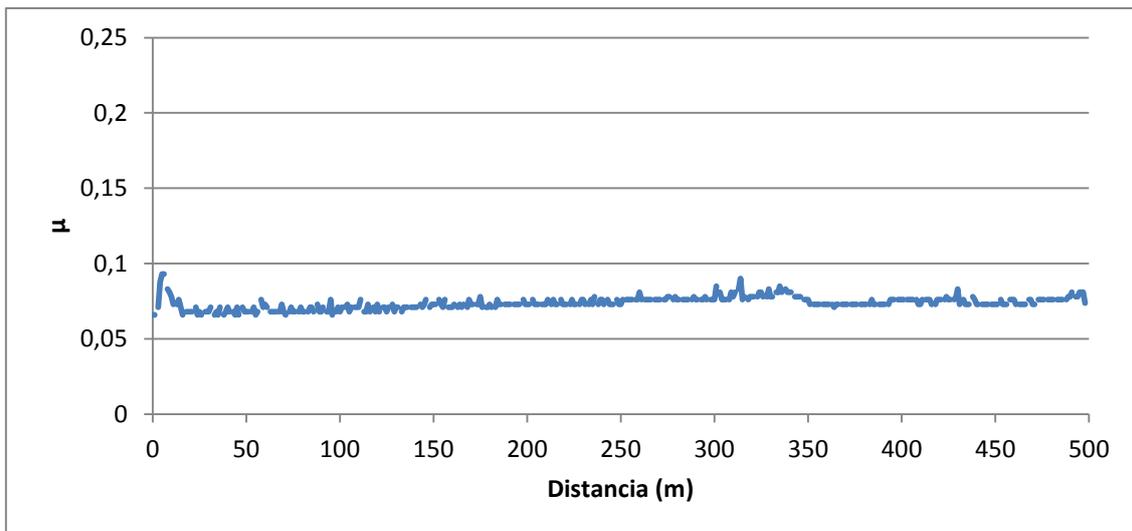
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
52100_642_2	23.1	50	0.057	1.069

1.2.2.1. Coeficiente de fricción

Tabla A14. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_2

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.074	0.004

Figura A25. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_2.

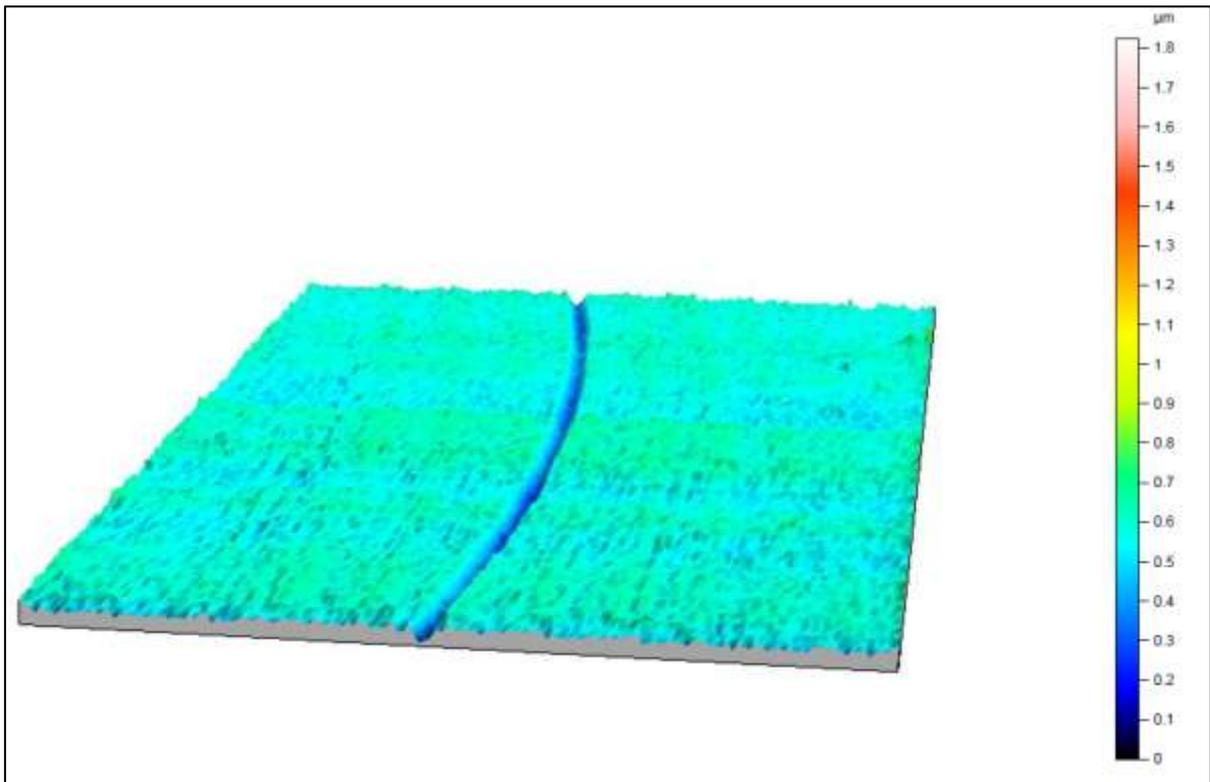


1.2.2.2. Desgaste producido

Tabla A15. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_642_2

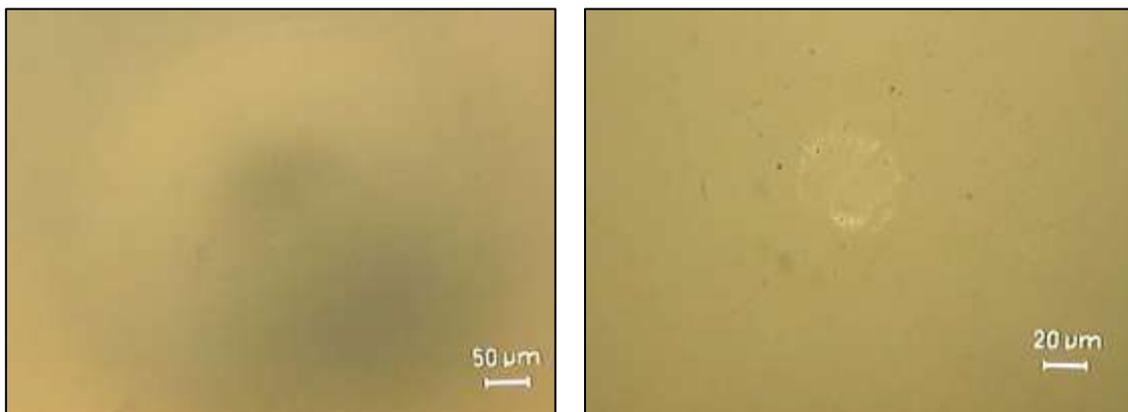
Volumen desgastado (mm ³)		Tasa de desgaste (mm ³ /N · m)		Tasa de desgaste (mm ³ /m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
3.34 · 10 ⁻⁴	1.41 · 10 ⁻⁴	6.82 · 10 ⁻⁷	2.87 · 10 ⁻⁷	6.68 · 10 ⁻⁷	2.81 · 10 ⁻⁷

Figura A26. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_642_2



1.2.2.3. Huellas en el punzón

Figura A27. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 50x para 52100_642_2



1.2.2.4. Huellas en la probeta

Figura A28. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_642_2

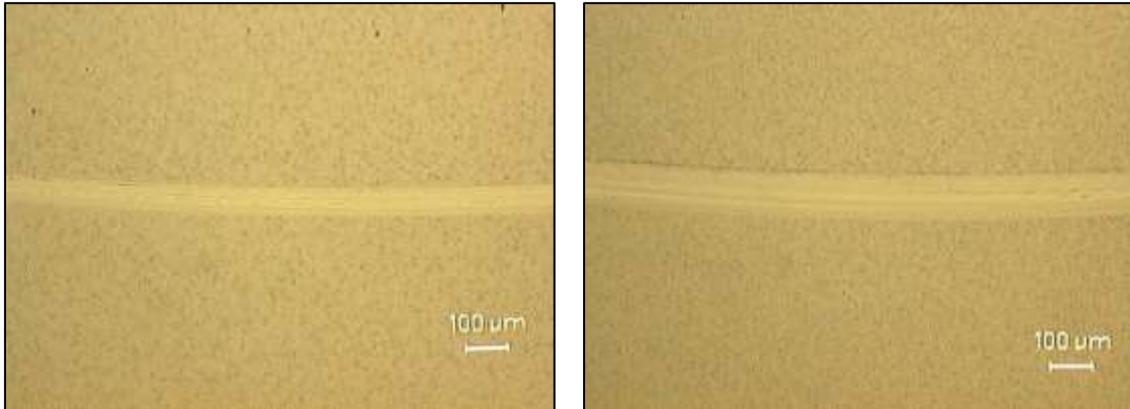


Figura A29. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_642_2

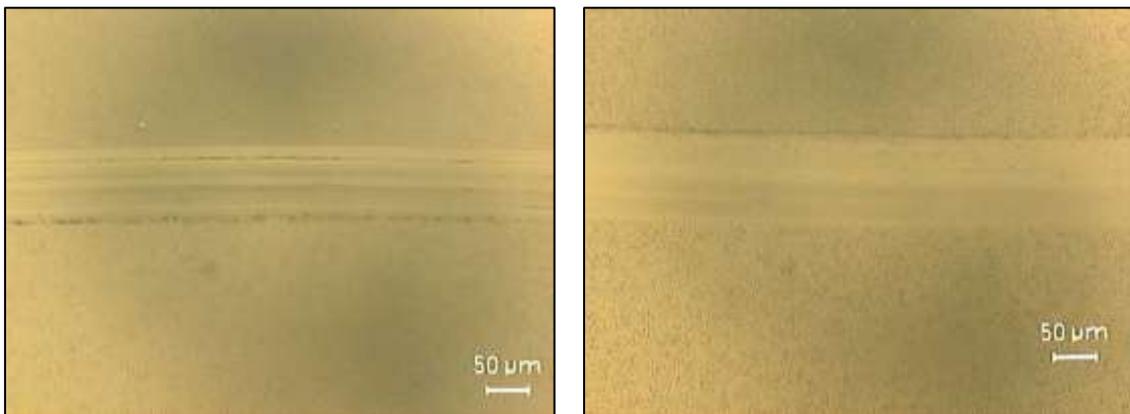
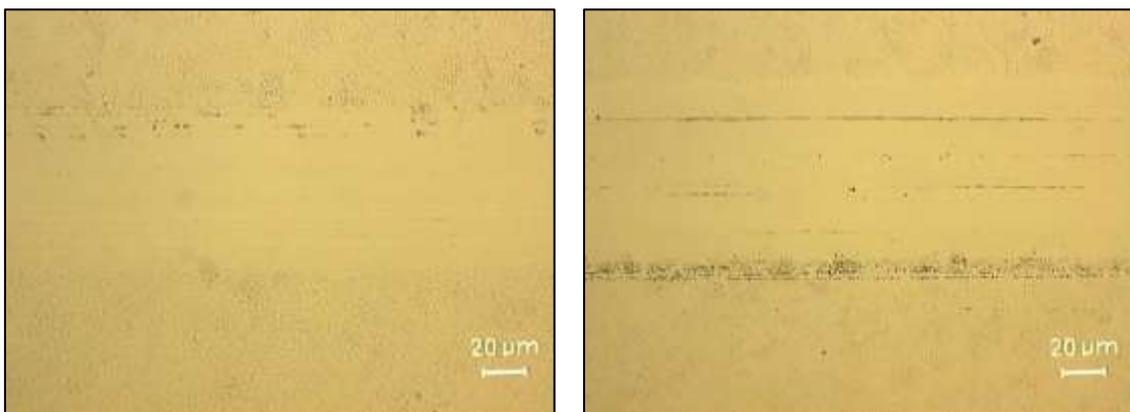


Figura A30. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_642_2



1.2.3. Ensayo 52100_642_3

Tabla A16. Condiciones en el ensayo 52100_642_3

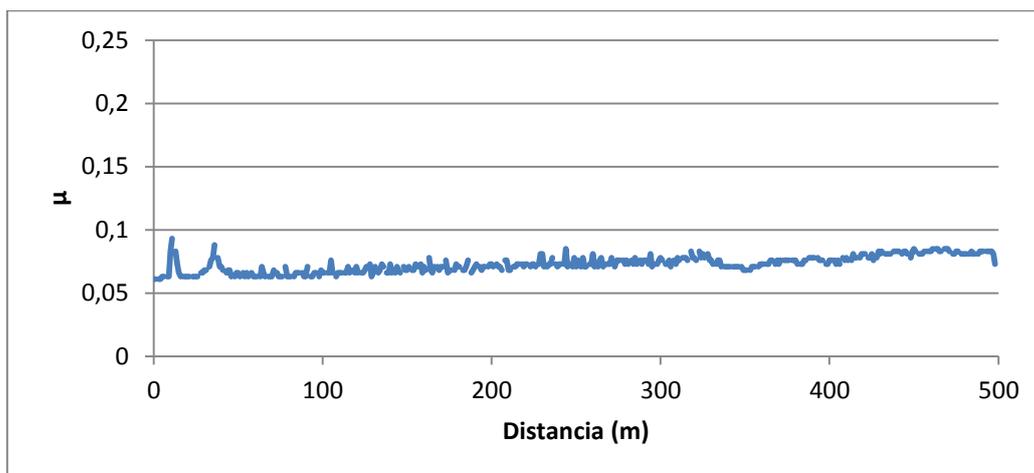
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
52100_642_3	24.4	46	0.067	0.301

1.2.3.1. Coeficiente de fricción

Tabla A17. Coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_3

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.073	0.006

Figura A31. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 52100_642_3.

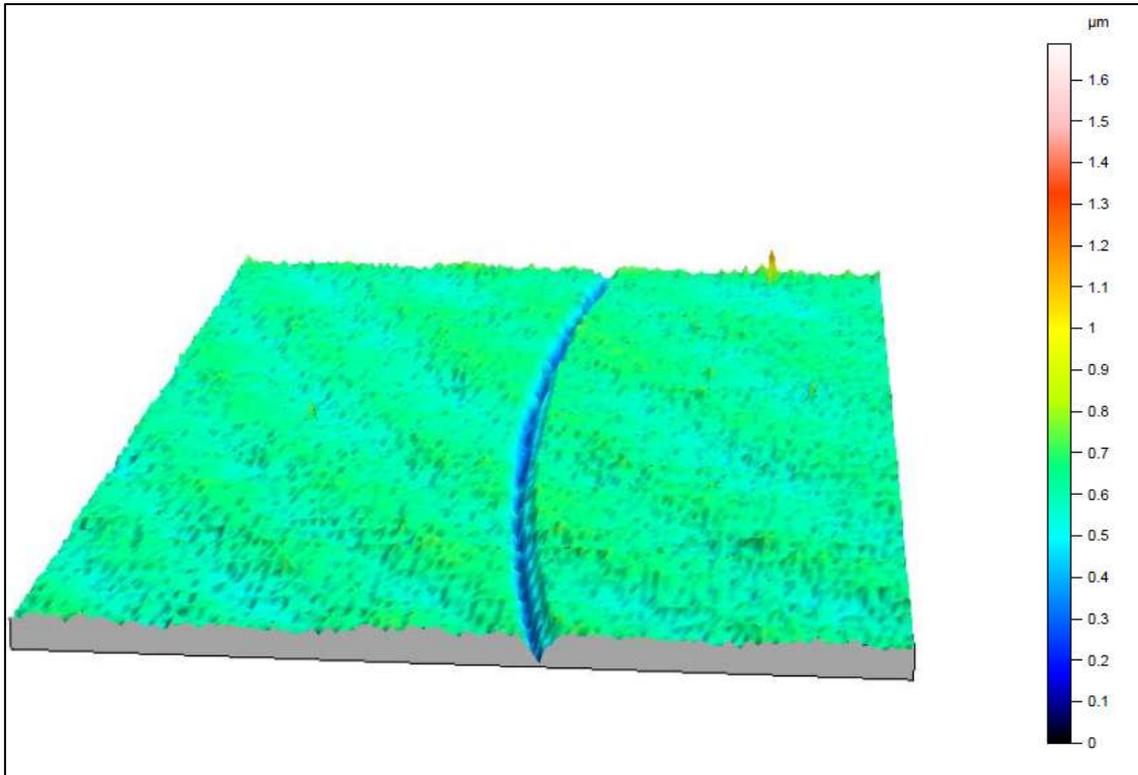


1.2.3.2. Desgaste producido

Tabla A18. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 52100_642_3

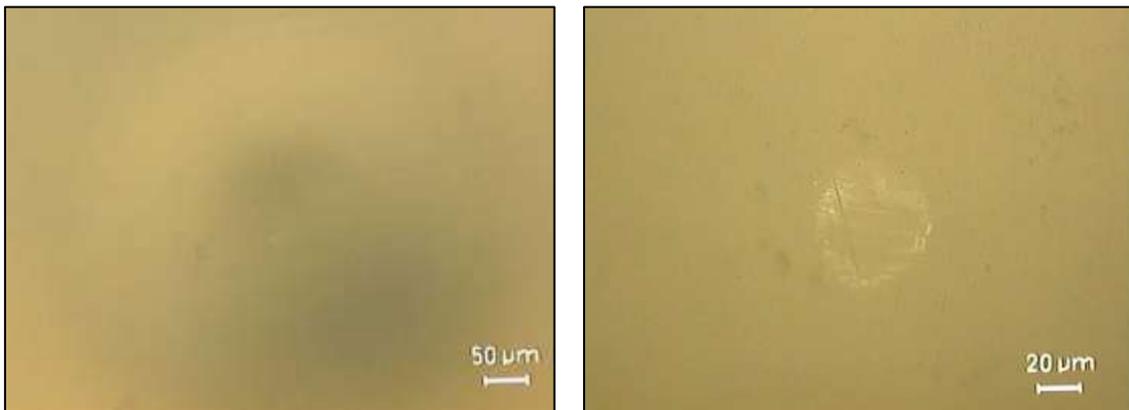
Volumen desgastado (mm ³)		Tasa de desgaste (mm ³ /N · m)		Tasa de desgaste (mm ³ /m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
5.48 · 10 ⁻⁴	9.46 · 10 ⁻⁵	1.12 · 10 ⁻⁶	1.93 · 10 ⁻⁷	1.10 · 10 ⁻⁶	1.89 · 10 ⁻⁷

Figura A32. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 52100_642_3



1.2.3.3. Huellas en el punzón

Figura A33. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 20x (izq.) y a 50x (der.) para 52100_642_3



1.2.3.4. Huellas en la probeta

Figura A34. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 52100_642_3

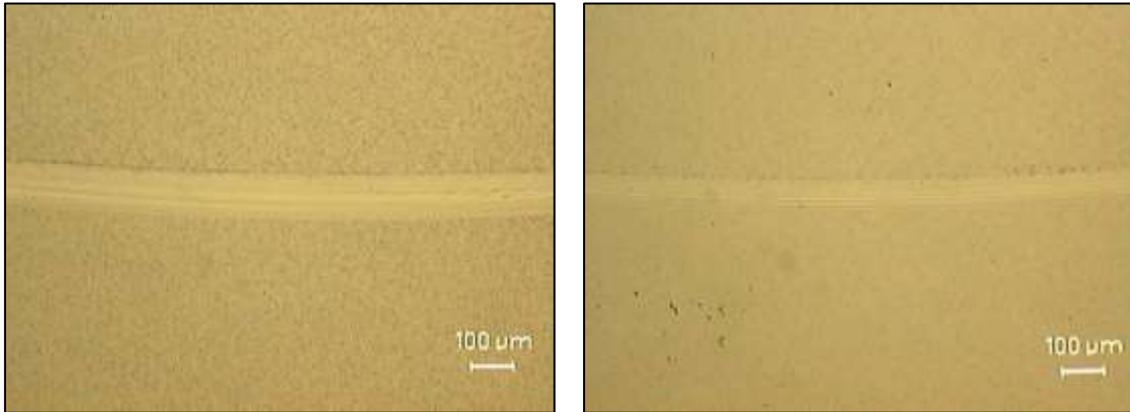


Figura A35. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 52100_642_3

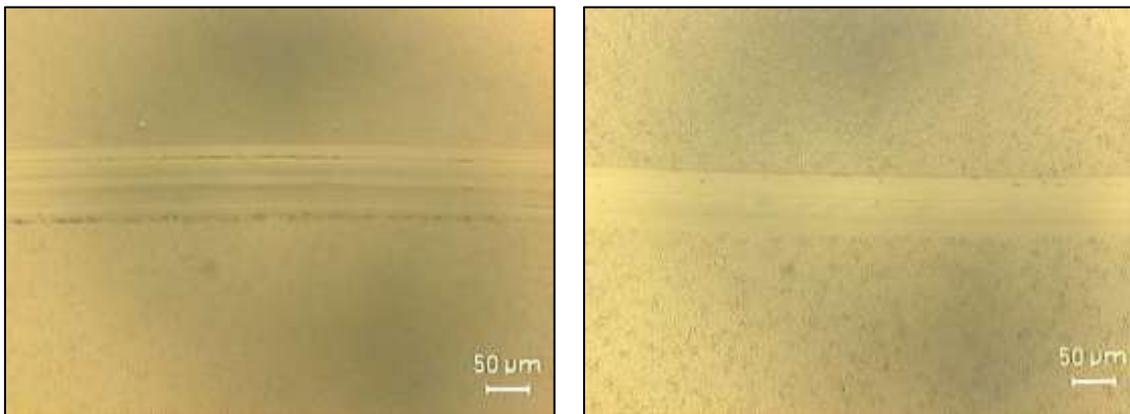
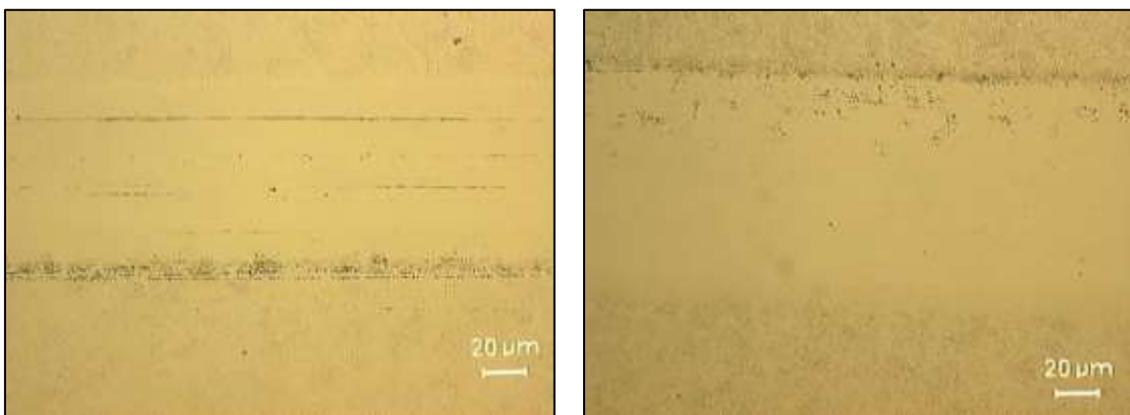


Figura A36. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 52100_642_3



1.3. Ensayos AISI 316L / EM-638

1.3.1. Ensayo 316_638_1

Tabla A19. Condiciones en el ensayo 316_638_1

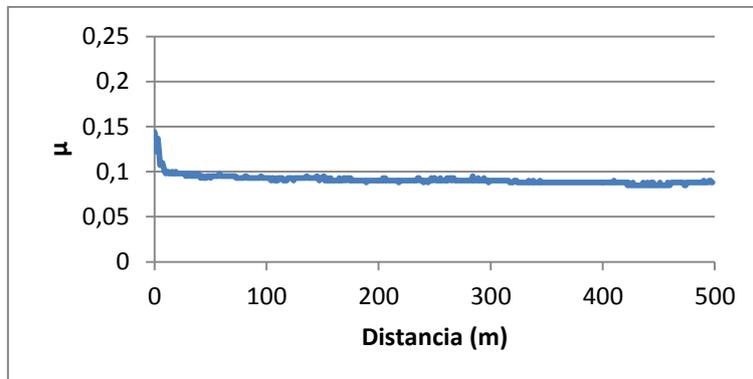
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
316_638_1	24	51	0.063	0.612

1.3.1.1. Coeficiente de fricción

Tabla A20. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_1

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.091	0.0055

Figura A37. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_1.

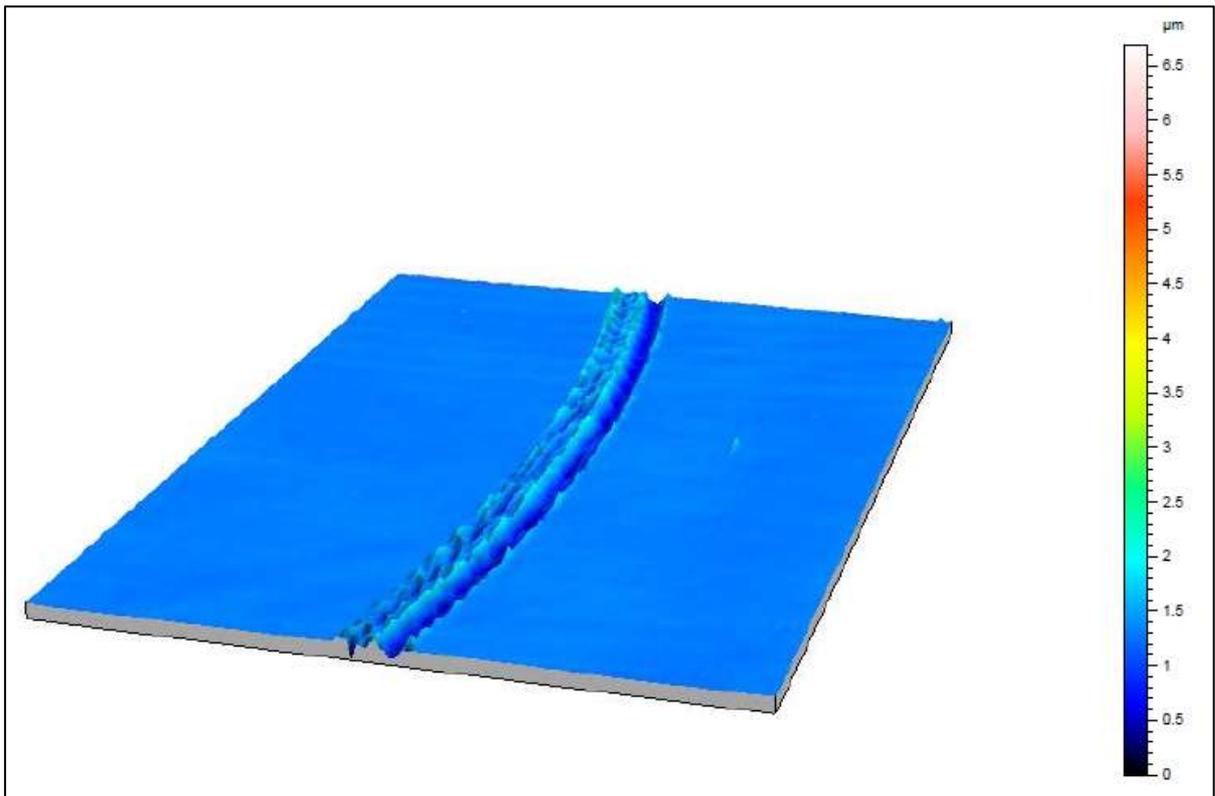


1.3.1.2. Desgaste producido

Tabla A21. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_638_1

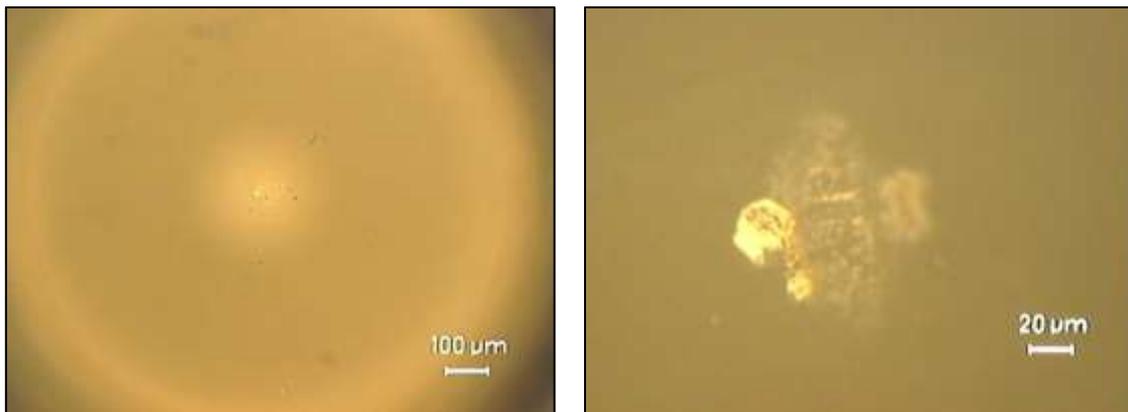
Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
$1.33 \cdot 10^{-3}$	$2.94 \cdot 10^{-4}$	$2.71 \cdot 10^{-6}$	$6.00 \cdot 10^{-7}$	$2.65 \cdot 10^{-6}$	$5.88 \cdot 10^{-7}$

Figura A38. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_638_1



1.3.1.3. Huellas en el punzón

Figura A39. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_638_1



1.3.1.4. Huellas en la probeta

Figura A40. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_638_1

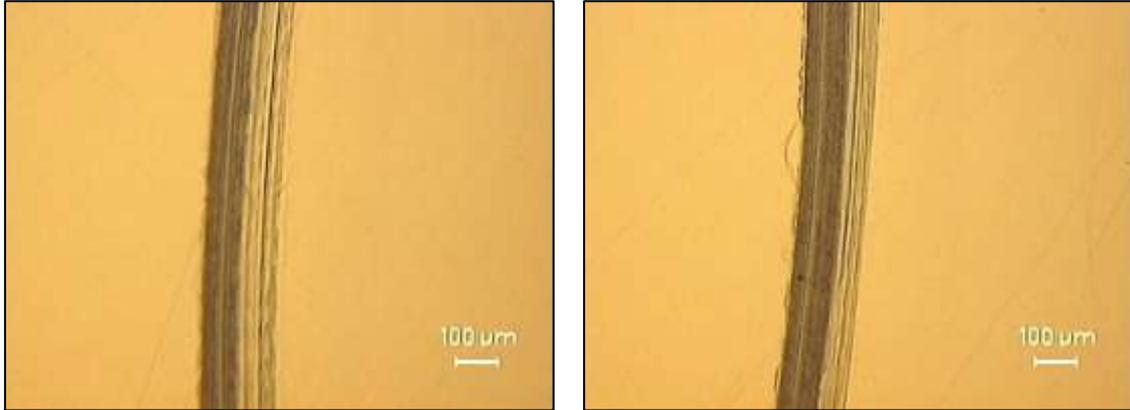


Figura A41. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_638_1

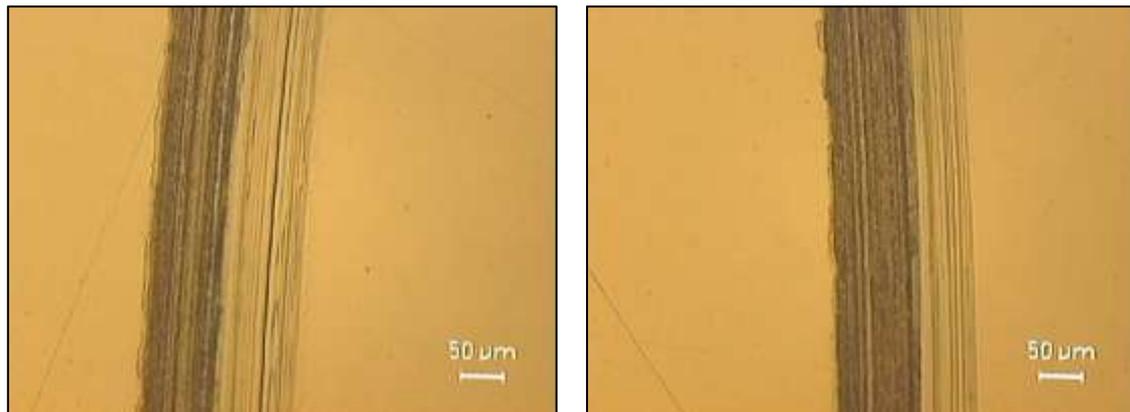
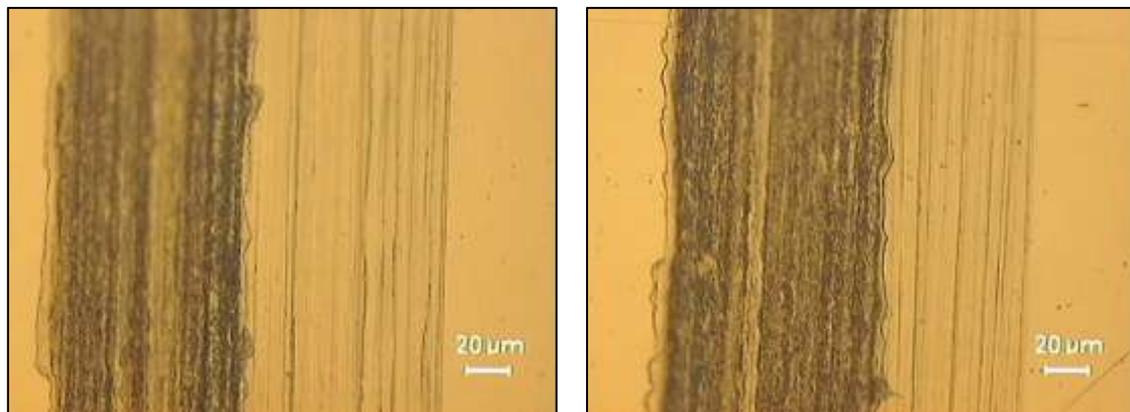


Figura A42. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_638_1



1.3.2. Ensayo 316_638_2

Tabla A22. Condiciones en el ensayo 316_638_2

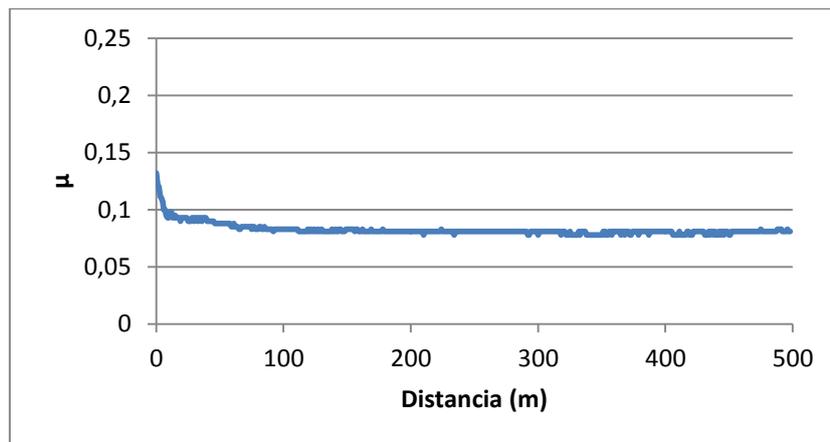
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
316_638_2	24	51	0.077	0.648

1.3.2.1. Coeficiente de fricción

Tabla A23. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_2

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.083	0.0054

Figura A43. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_2.

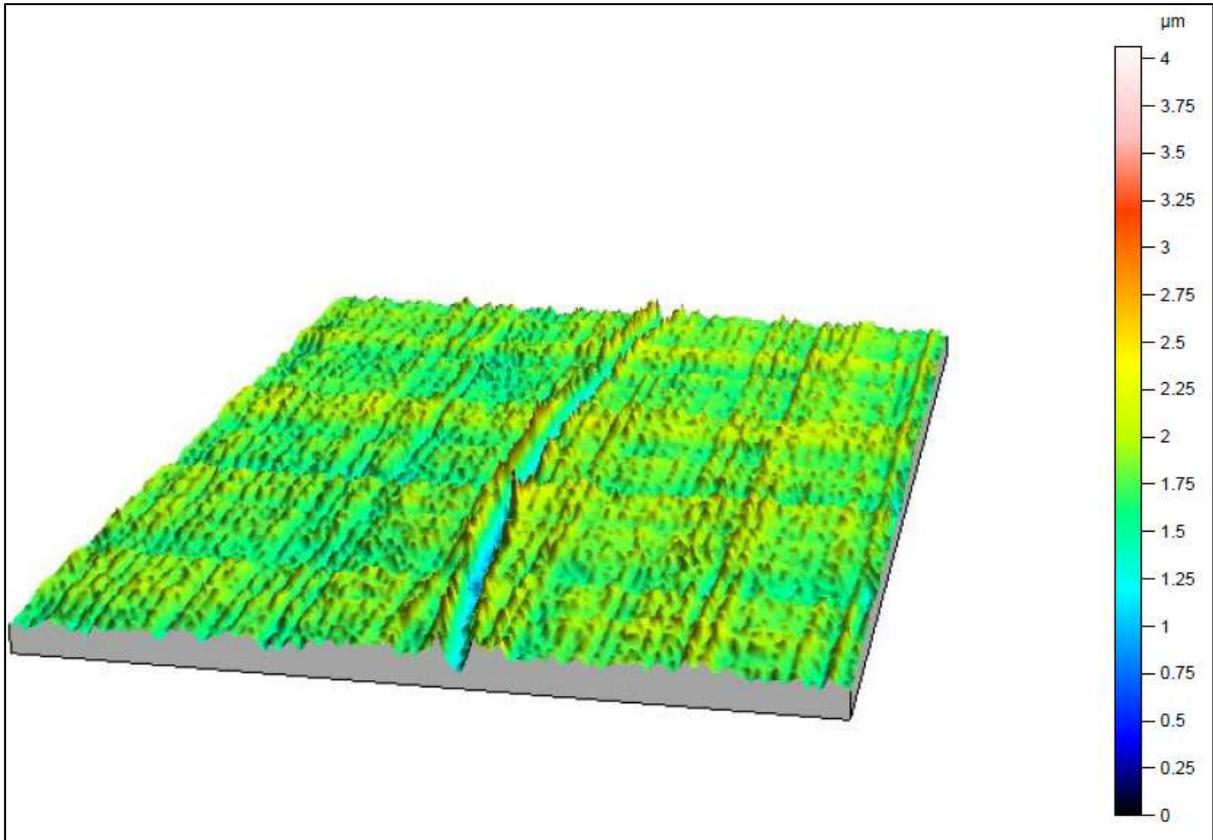


1.3.2.2. Desgaste producido

Tabla A24. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_638_2

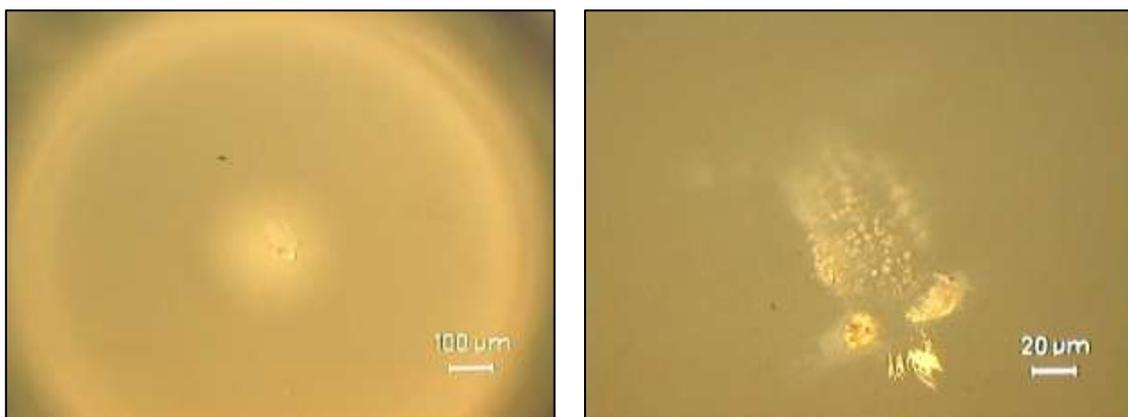
Volumen desgastado (mm ³)		Tasa de desgaste (mm ³ /N · m)		Tasa de desgaste (mm ³ /m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
9.34 · 10 ⁻⁴	1.66 · 10 ⁻⁴	1.91 · 10 ⁻⁶	3.38 · 10 ⁻⁷	1.87 · 10 ⁻⁶	3.32 · 10 ⁻⁷

Figura A44. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_638_2



1.3.2.3. Huellas en el punzón

Figura A45. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_638_2



1.3.2.4. Huellas en la probeta

Figura A46. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_638_2

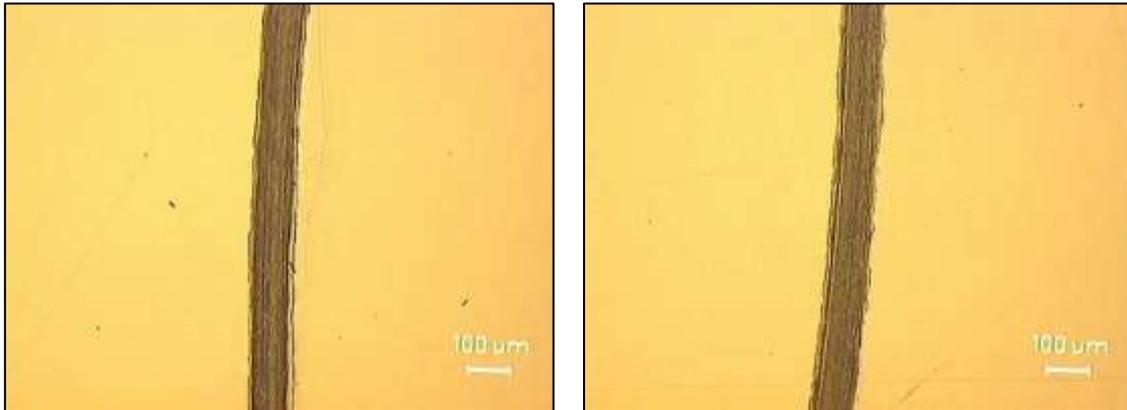


Figura A47. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_638_2

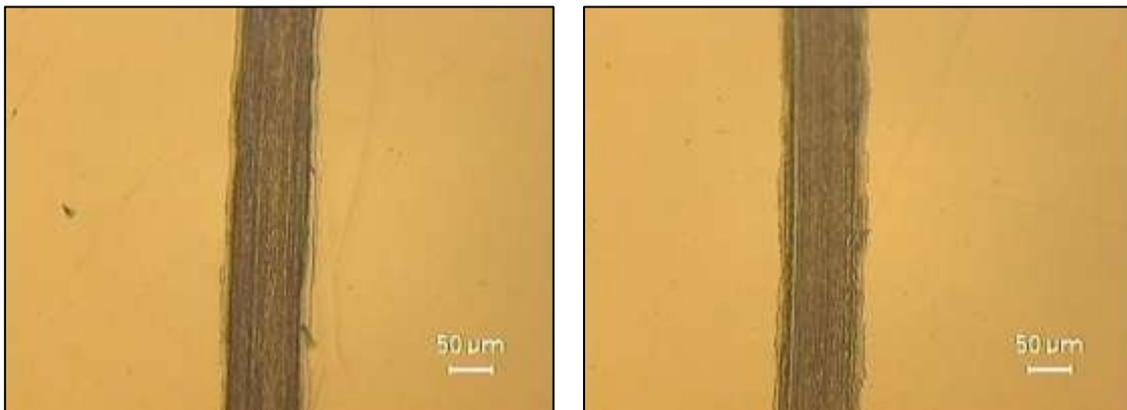
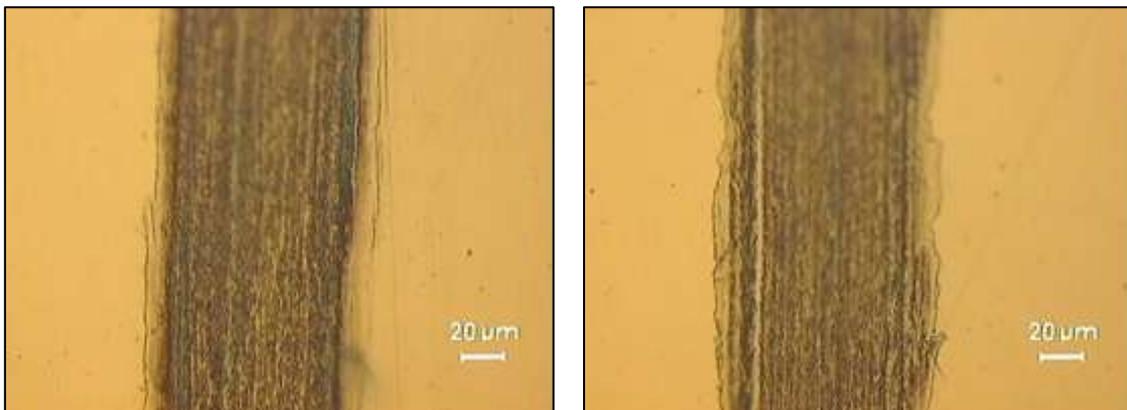


Figura A48. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_638_2



1.3.3. Ensayo 316_638_3

Tabla A25. Condiciones en el ensayo 316_638_3

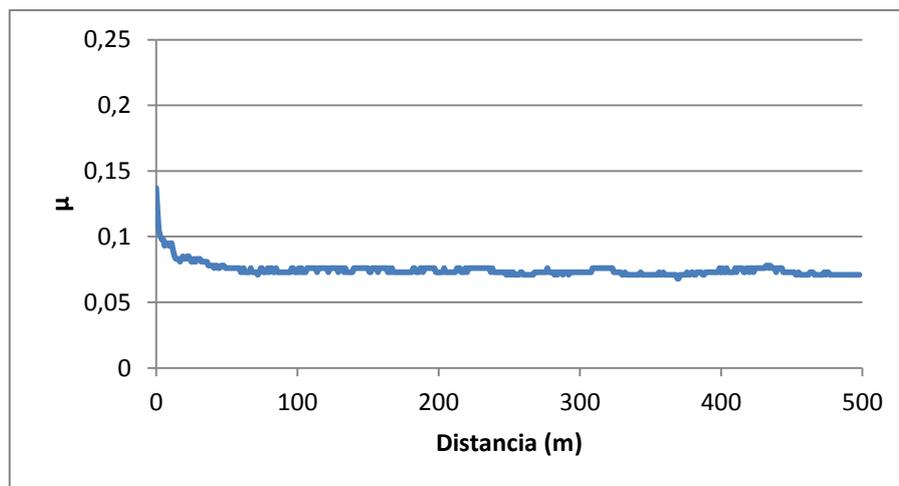
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
316_638_3	23.5	51	0.066	0.992

1.3.3.1. Coeficiente de fricción

Tabla A26. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_3

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.075	0.0055

Figura A49. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_638_3.

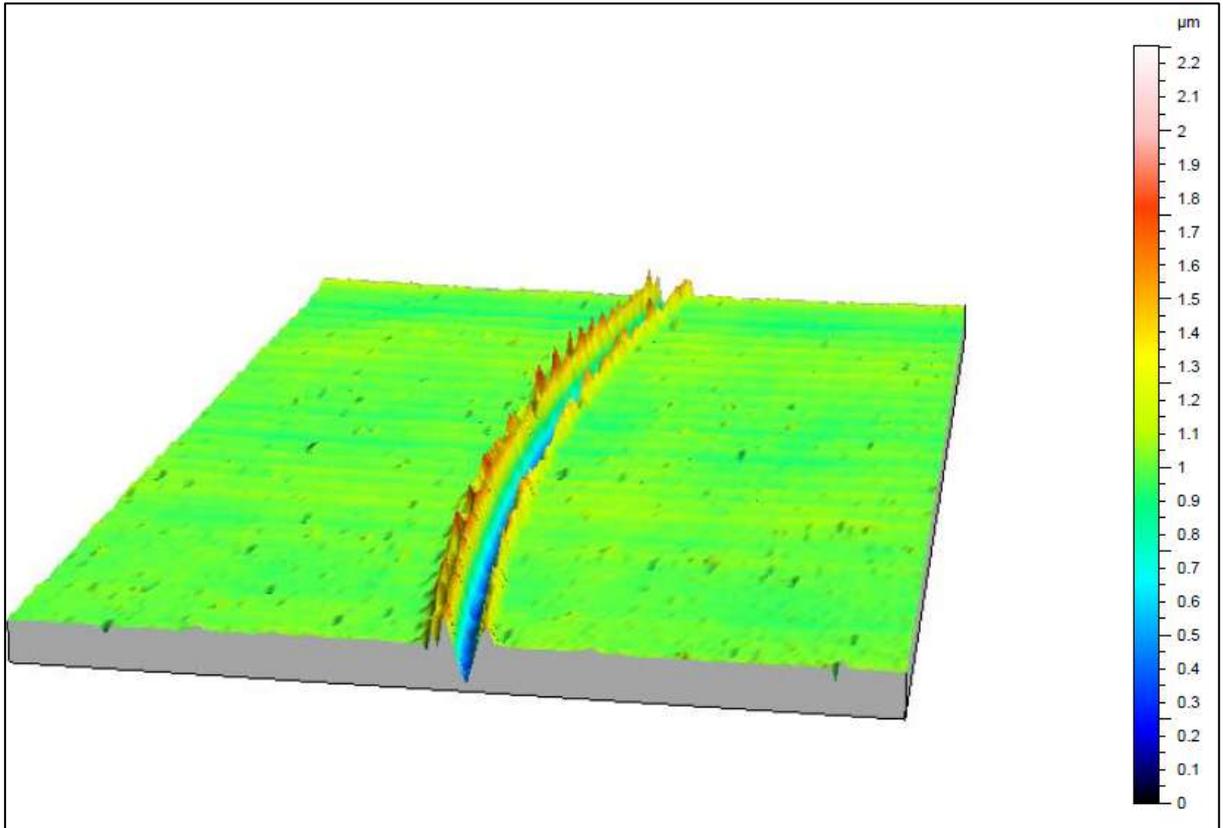


1.3.3.2. Desgaste producido

Tabla A27. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_638_3

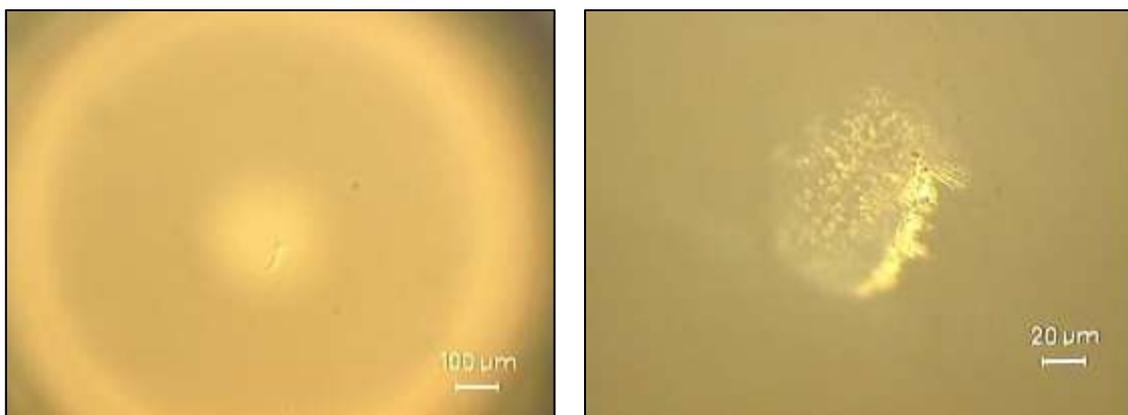
Volumen desgastado (mm ³)		Tasa de desgaste (mm ³ /N · m)		Tasa de desgaste (mm ³ /m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
1.36 · 10 ⁻³	8.01 · 10 ⁻⁴	2.77 · 10 ⁻⁶	1.63 · 10 ⁻⁶	2.71 · 10 ⁻⁶	1.60 · 10 ⁻⁶

Figura A50. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_638_3



1.3.3.3. Huellas en el punzón

Figura A51. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_638_3



1.3.3.4. Huellas en la probeta

Figura A52. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_638_3

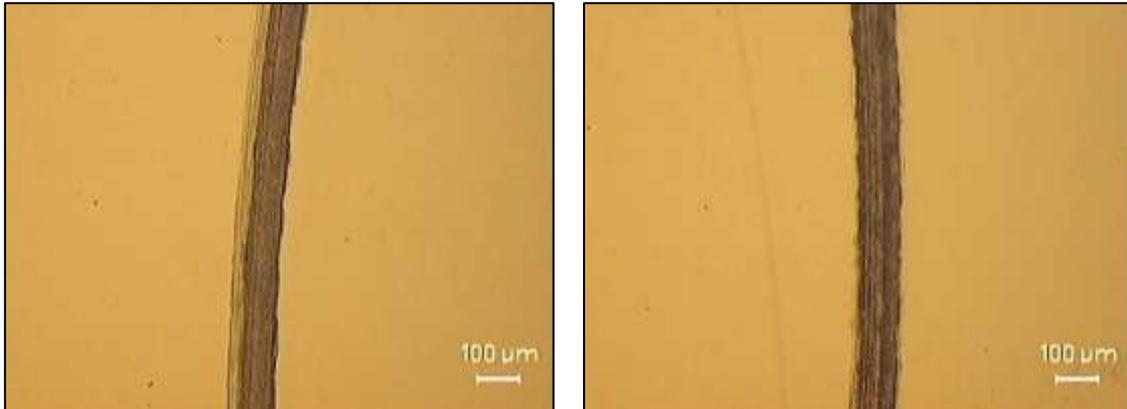


Figura A53. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_638_3

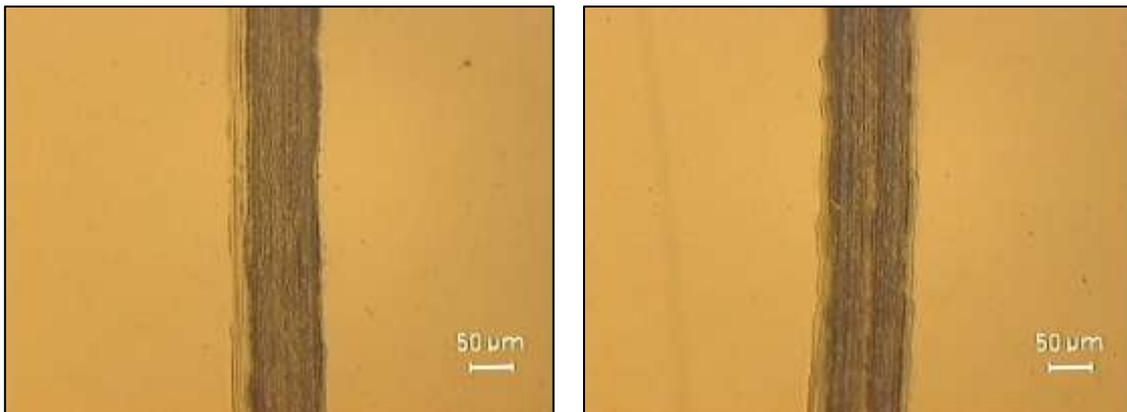
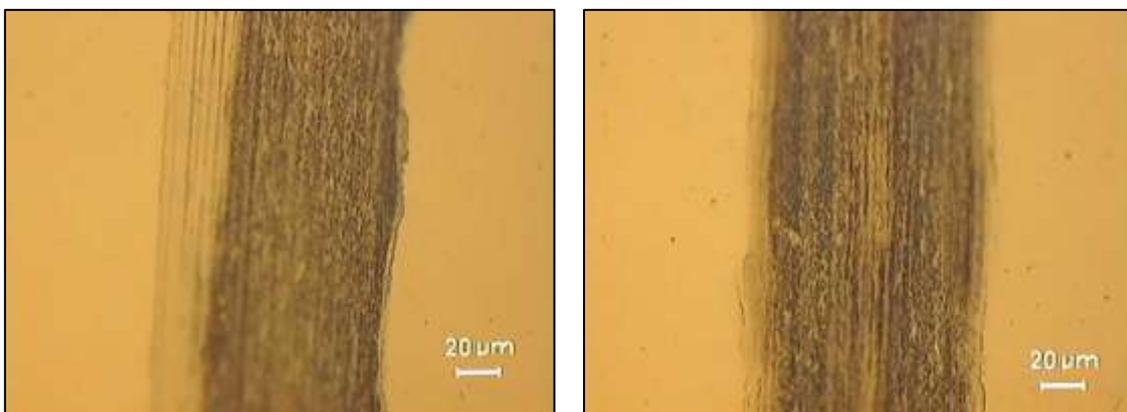


Figura A54. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_638_3



1.4. Ensayos AISI 316L / EM-642

1.4.1. Ensayo 316_642_1

Tabla A28. Condiciones en el ensayo 316_642_1

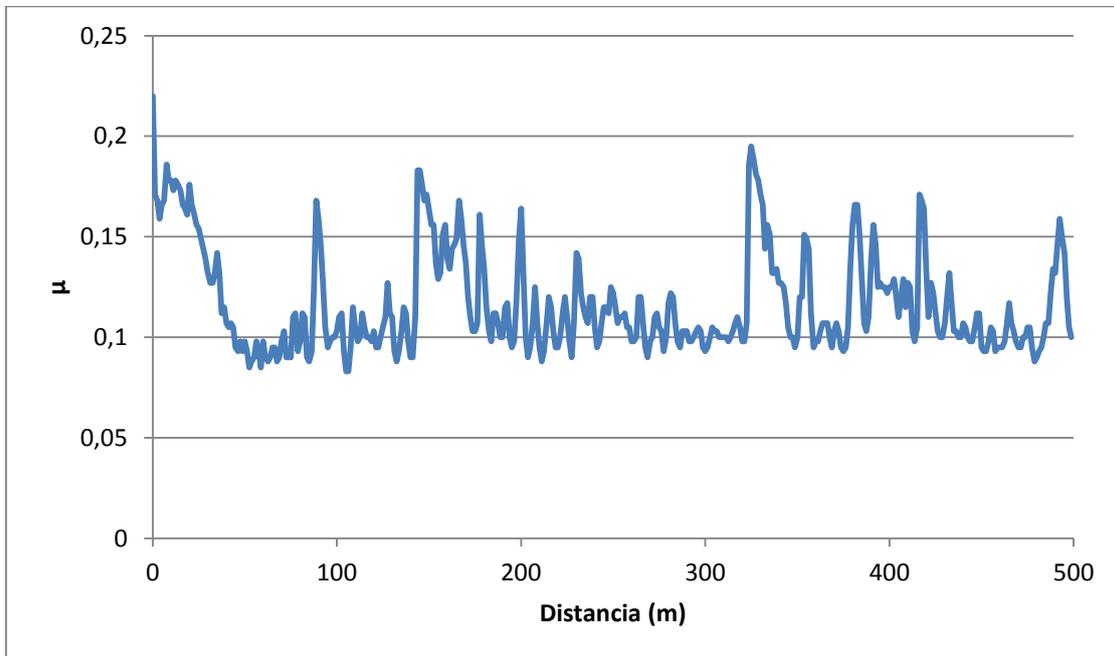
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
316_642_1	22.5	46	0.067	1.128

1.4.1.1. Coeficiente de fricción

Tabla A29. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_1

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.117	0.025

Figura A55. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_1.

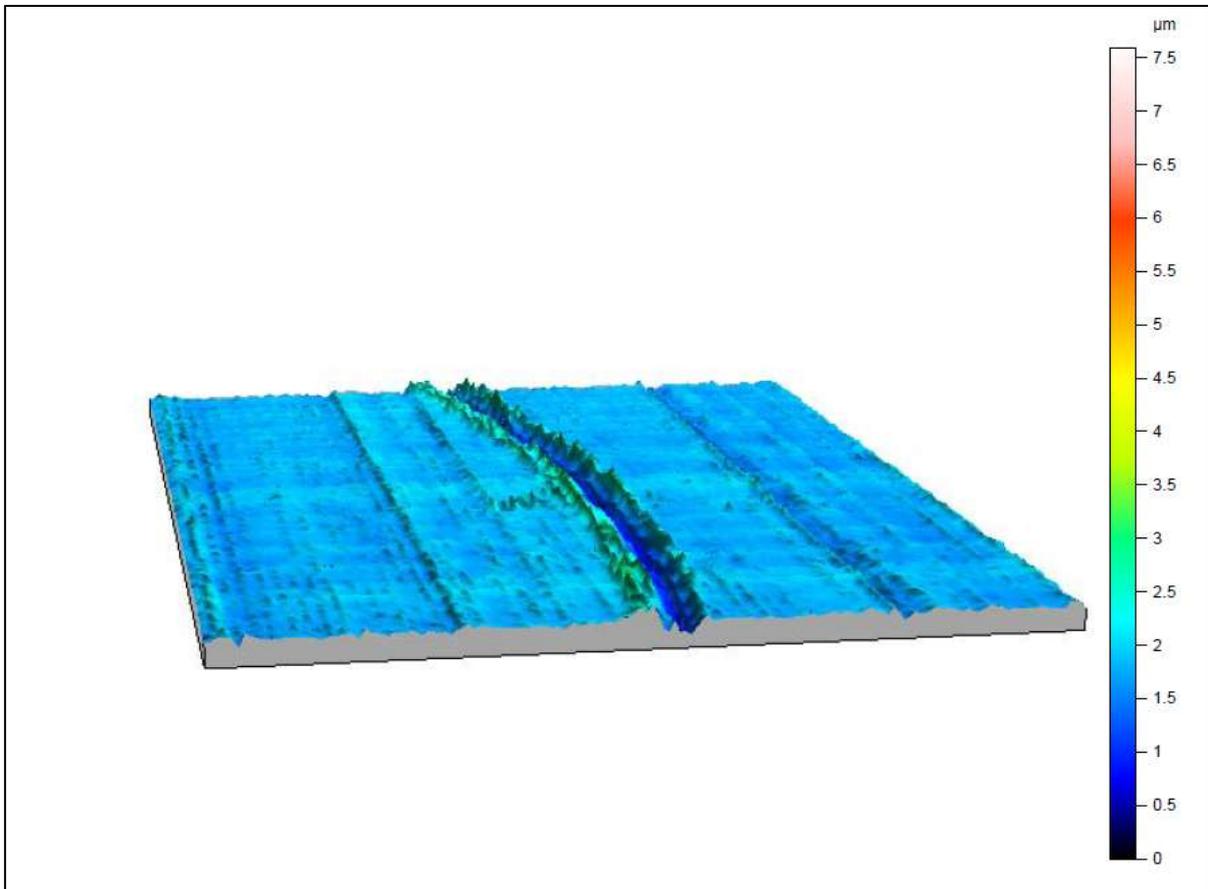


1.4.1.2. Desgaste producido

Tabla A30. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_642_1

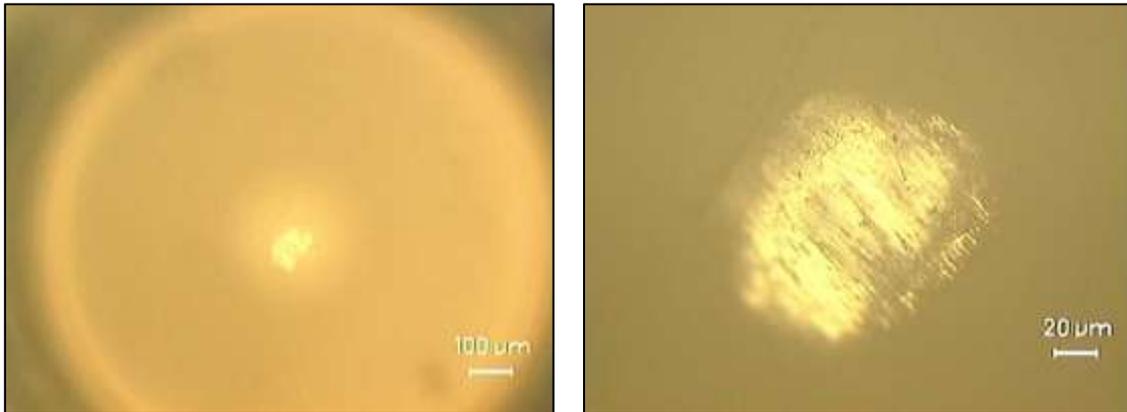
Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
$1.68 \cdot 10^{-3}$	$4.21 \cdot 10^{-4}$	$3.43 \cdot 10^{-6}$	$8.60 \cdot 10^{-7}$	$3.36 \cdot 10^{-6}$	$8.42 \cdot 10^{-7}$

Figura A56. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_642_1



1.4.1.3. Huellas en el punzón

Figura A57. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_638_1



1.4.1.4. Huellas en la probeta

Figura A58. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_638_1

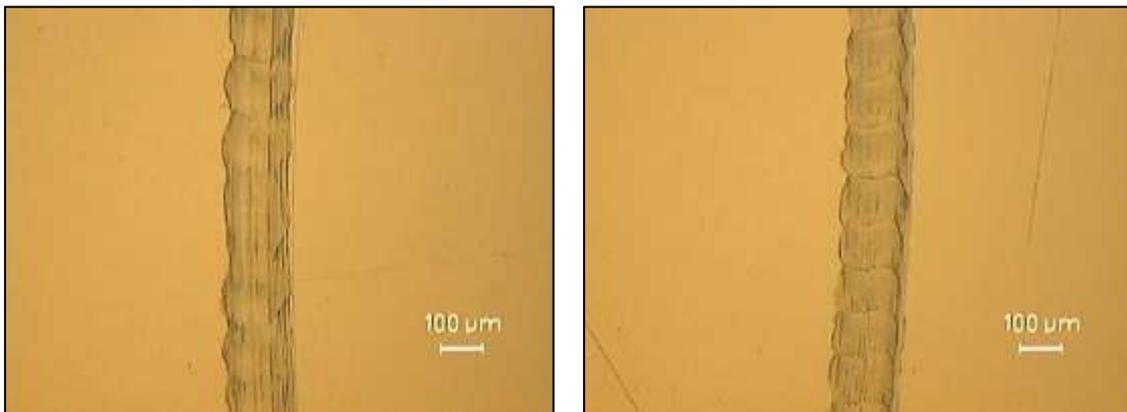


Figura A59. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_638_1

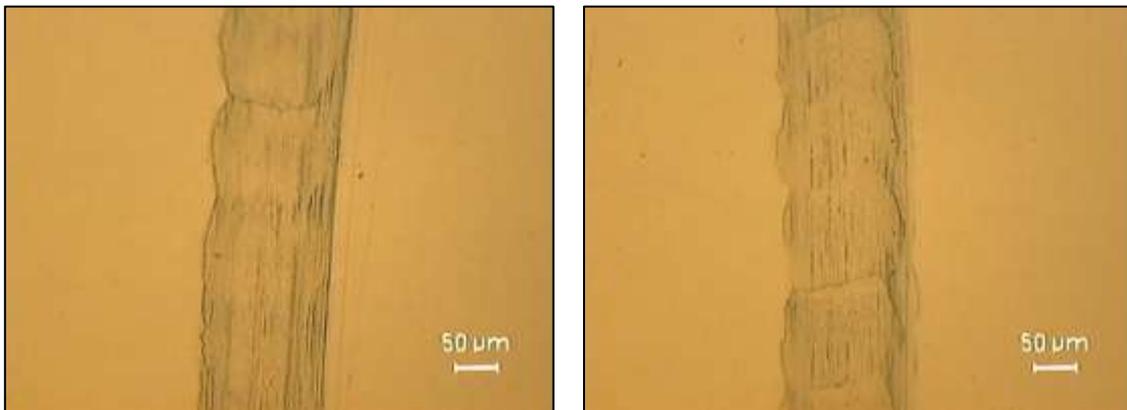
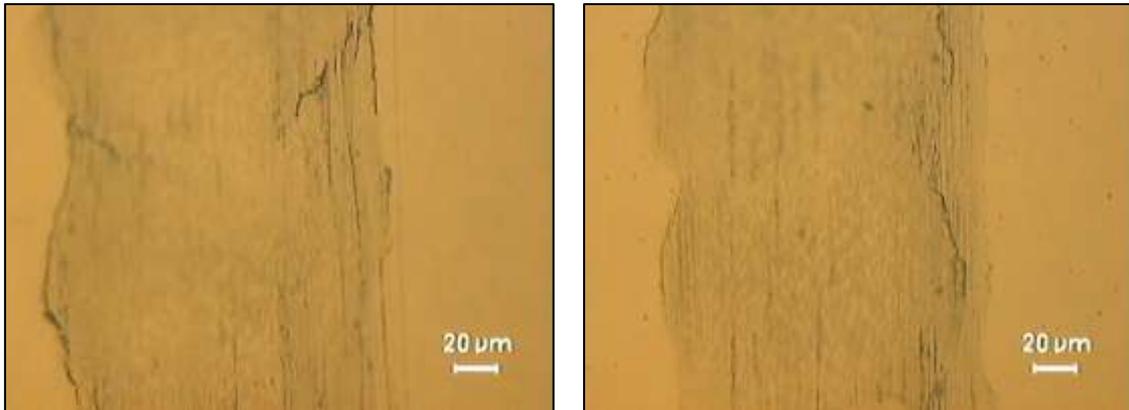


Figura A60. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_638_1



1.4.2. Ensayo 316_642_2

Tabla A31. Condiciones en el ensayo 316_642_2

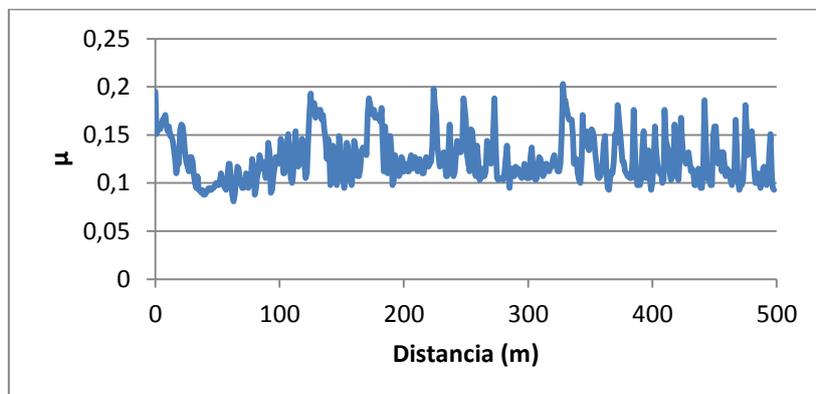
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
316_642_2	22.3	44	0.071	0.739

1.4.2.1. Coeficiente de fricción

Tabla A32. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_2

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.125	0.025

Figura A61. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_2

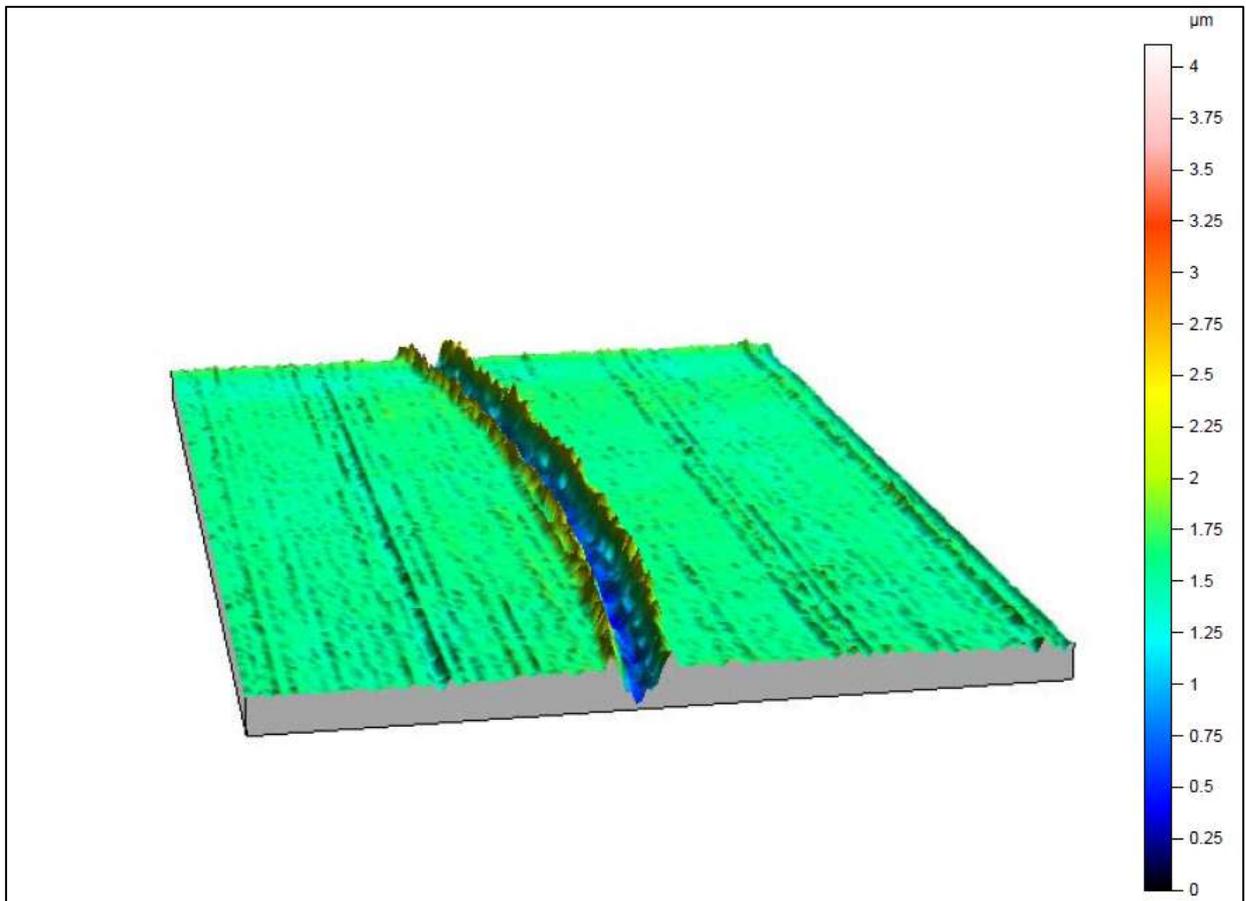


1.4.2.2. Desgaste producido

Tabla A33. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_642_2

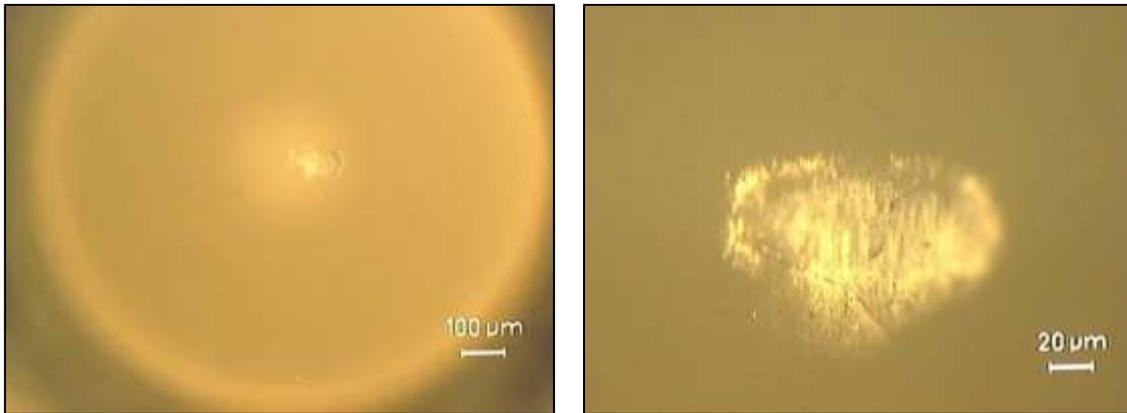
Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
$1.89 \cdot 10^{-3}$	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$3.86 \cdot 10^{-6}$	$2.15 \cdot 10^{-6}$	$3.79 \cdot 10^{-6}$	$2.11 \cdot 10^{-6}$

Figura A62. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_642_2



1.4.2.3. Huellas en el punzón

Figura A63. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_642_2



1.4.2.4. Huellas en la probeta

Figura A64. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_642_2

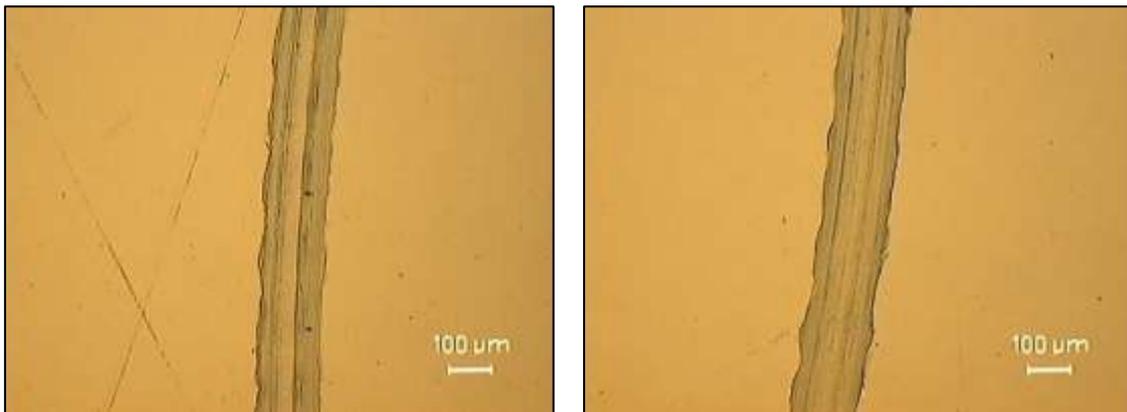


Figura A65. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_642_2

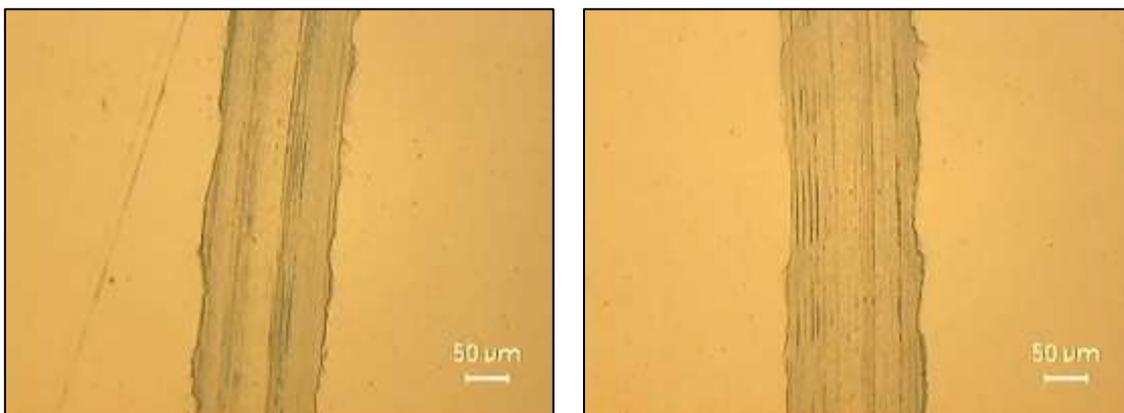
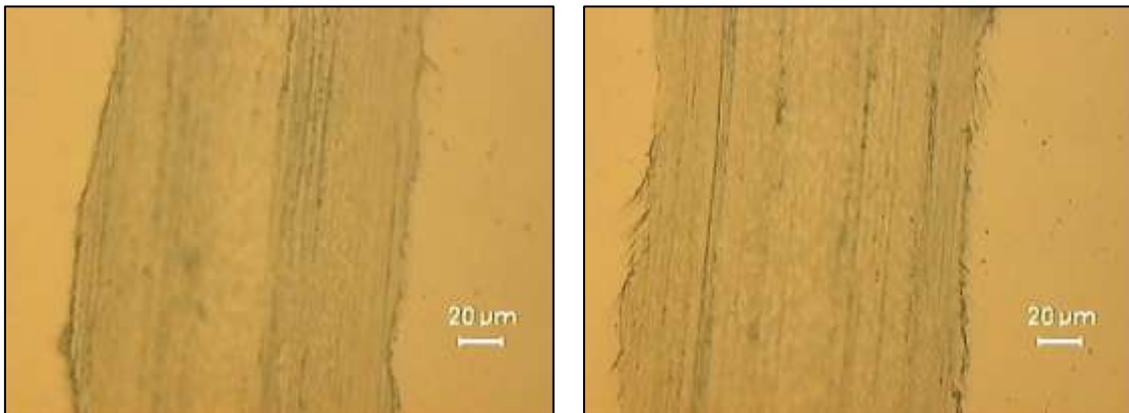


Figura A66. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_642_2



1.4.3. Ensayo 316_642_3

Tabla A34. Condiciones en el ensayo 316_642_3

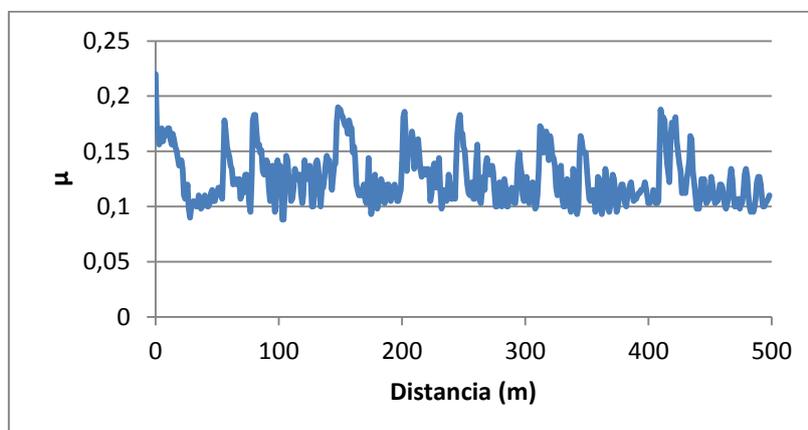
Ensayo	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	\overline{R}_a (μm)	\overline{R}_t (μm)
316_642_3	23.5	42	0.061	0.994

1.4.3.1. Coeficiente de fricción

Tabla A35. Coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_3

Coeficiente de fricción (μ)	
Valor medio	Desviación típica
0.126	0.024

Figura A67. Evolución del coeficiente de fricción en el ensayo 316_642_3.

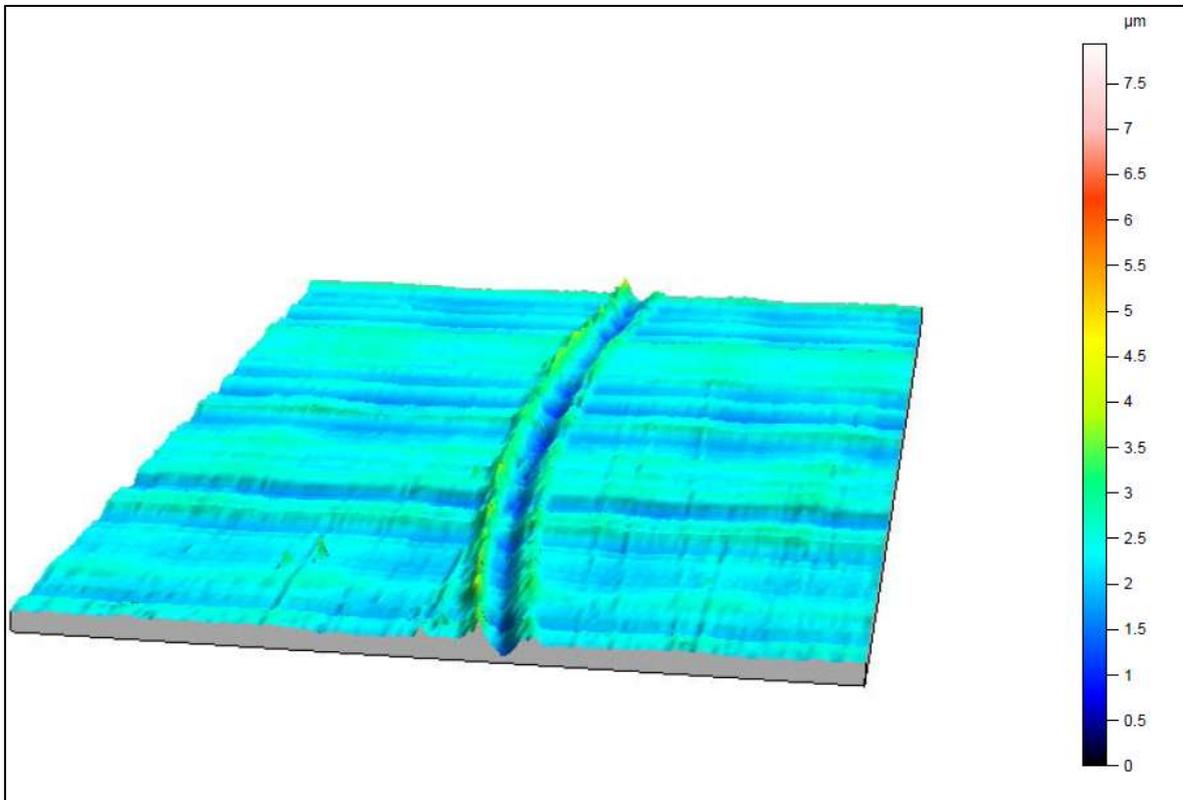


1.4.3.2. Desgaste producido

Tabla A36. Volumen y tasa de desgaste en el ensayo 316_642_3

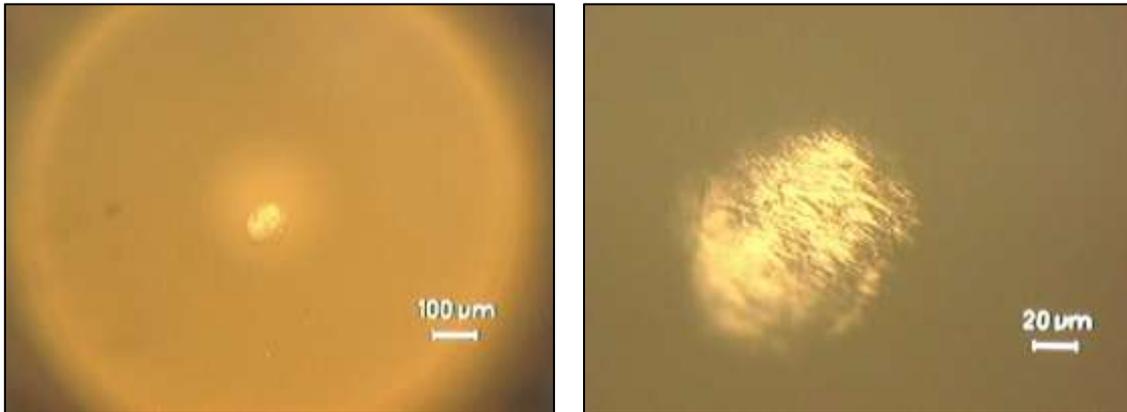
Volumen desgastado (mm^3)		Tasa de desgaste ($mm^3/N \cdot m$)		Tasa de desgaste (mm^3/m)	
Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica	Valor medio	Desviación típica
$1.51 \cdot 10^{-3}$	$5.30 \cdot 10^{-4}$	$3.08 \cdot 10^{-6}$	$1.08 \cdot 10^{-6}$	$3.02 \cdot 10^{-6}$	$1.06 \cdot 10^{-6}$

Figura A68. Perfil topográfico de la huella en el ensayo 316_642_3



1.4.3.3. Huellas en el punzón

Figura A69. Imagen de la punta de la bola de zafiro a 10x (izq.) y a 50x (der.) para 316_642_3



1.4.3.4. Huellas en la probeta

Figura A70. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 10x para 316_642_3

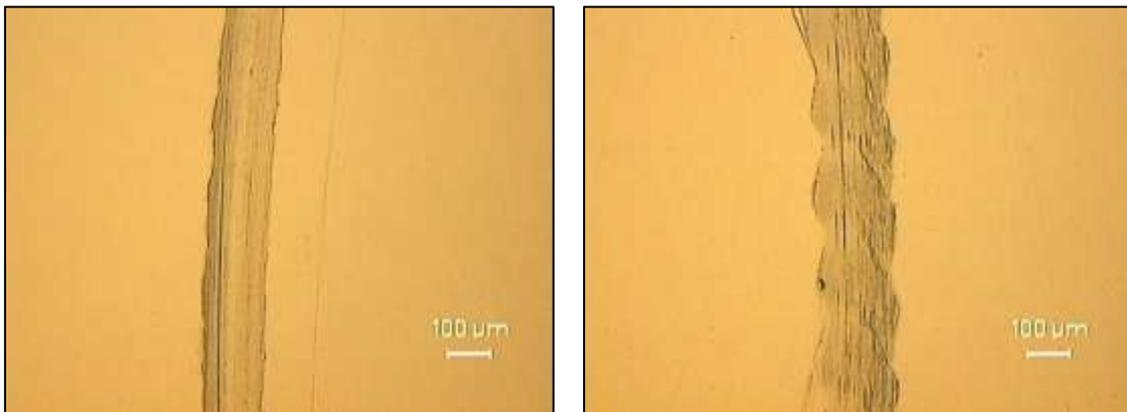


Figura A71. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 20x para 316_642_3

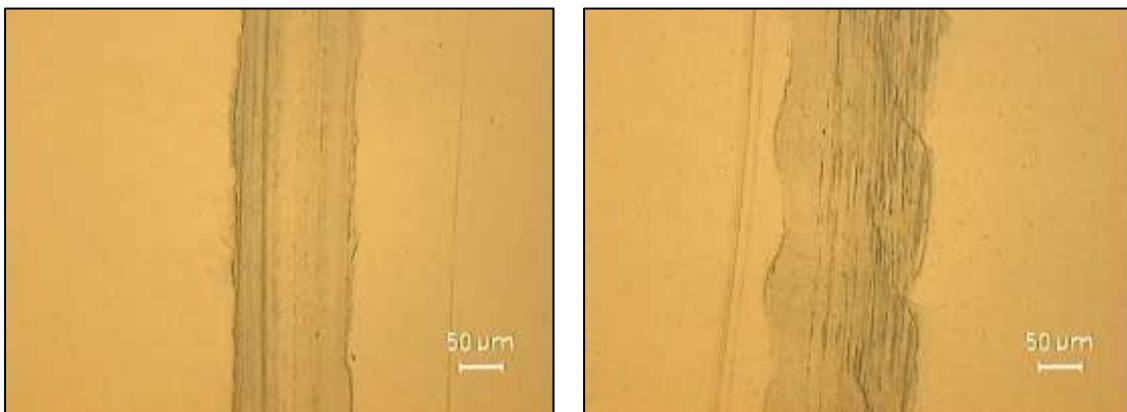
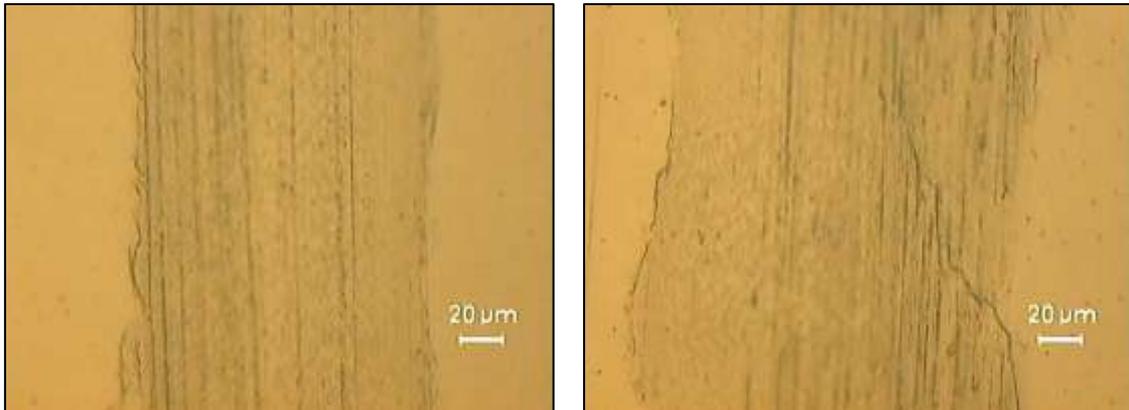


Figura A72. Imágenes de la huella en distintas posiciones a 50x para 316_642_3



***ANEXO 2. ENSAYOS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE
BARRIDO (SEM)***

2.1. Ensayos AISI 52100 / EM-638

Figura A73. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638 a 100x.

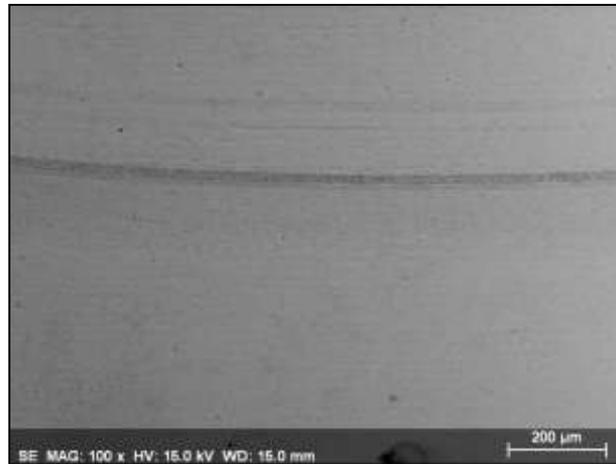


Figura A74. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-638 a 200x.

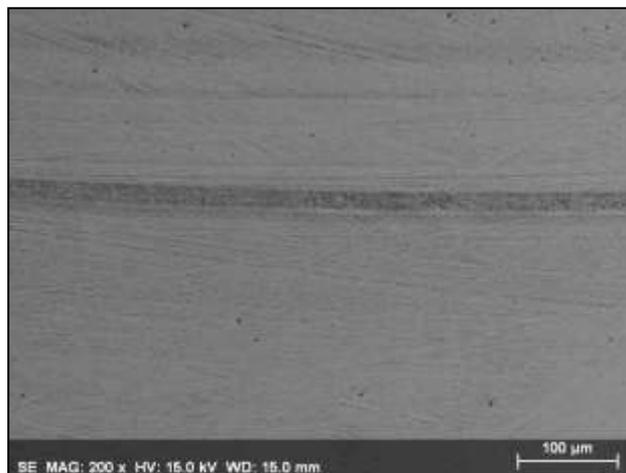
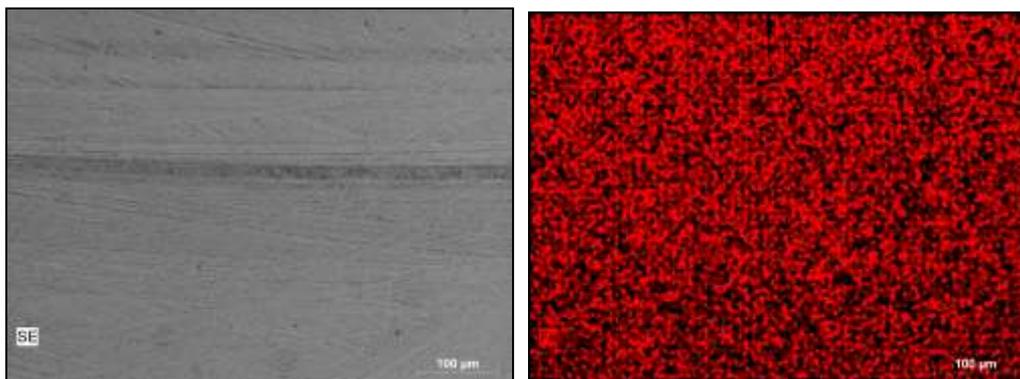


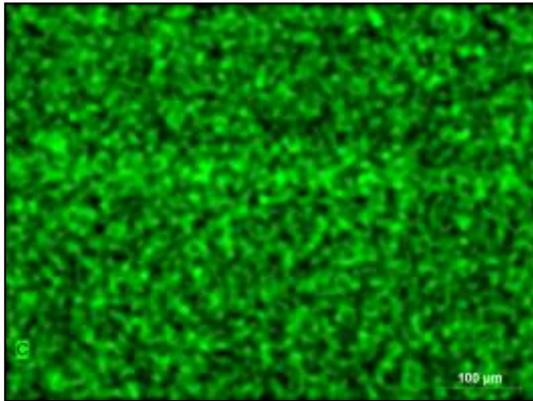
Figura A75. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-638.

Imagen Original

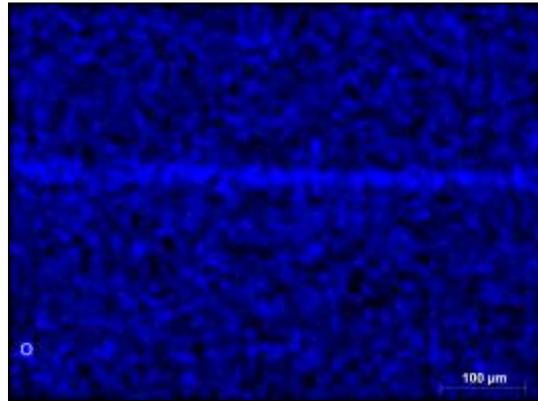
Hierro



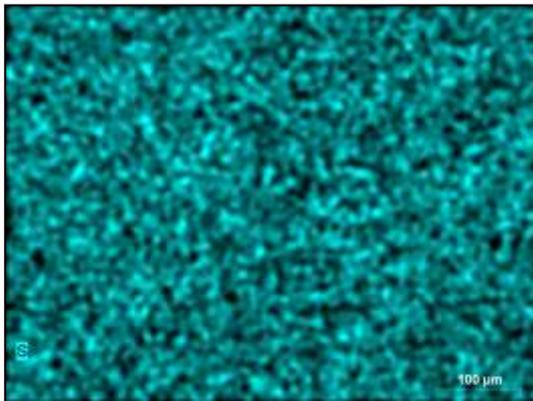
Carbono



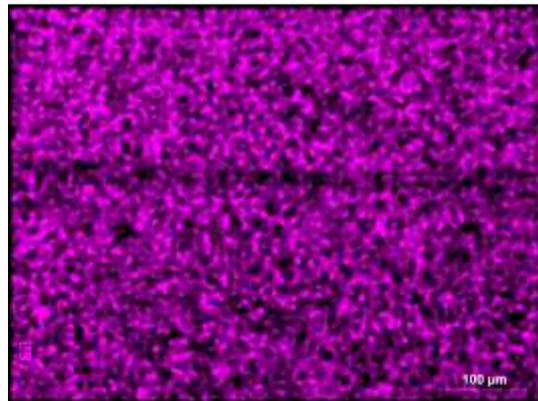
Oxígeno



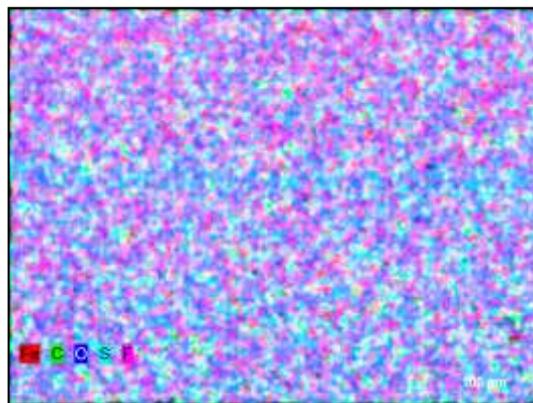
Azufre



Flúor



Todos



2.2. Ensayos AISI 52100 / EM-642

Figura A76. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642 a 100x.

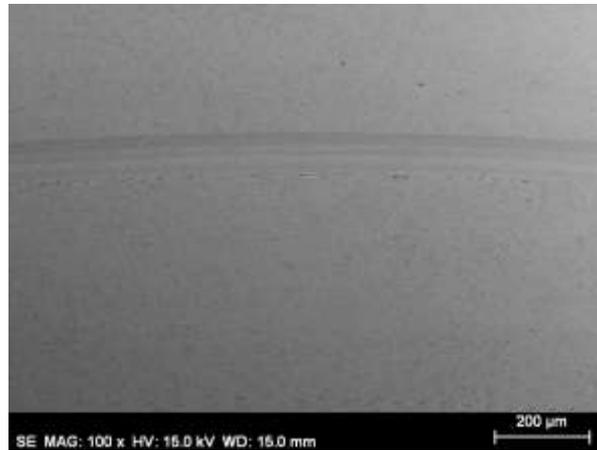


Figura A77. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642 a 200x.

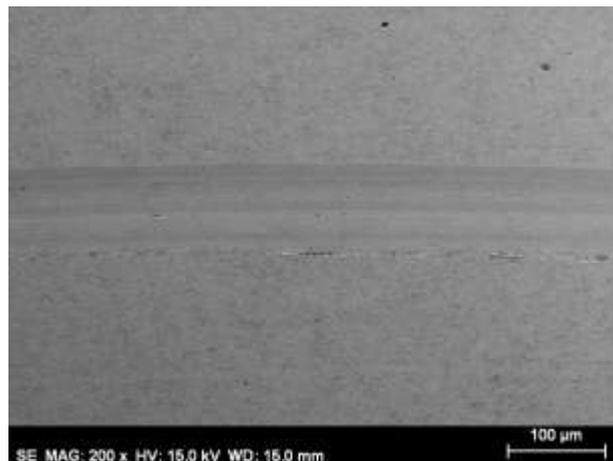


Figura A78. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 52100 / EM-642 a 400x.

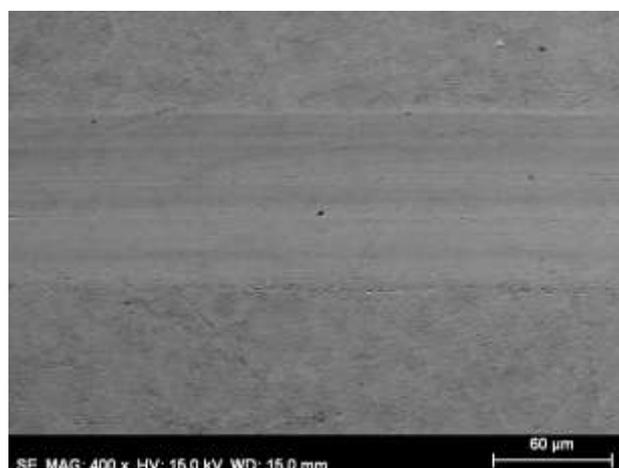
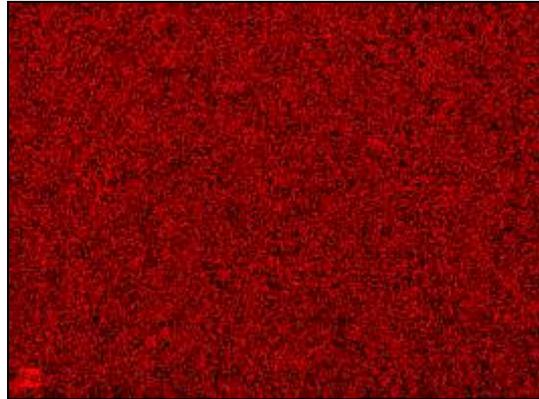


Figura A79. Mapa elemental del ensayo AISI 52100 / EM-642.

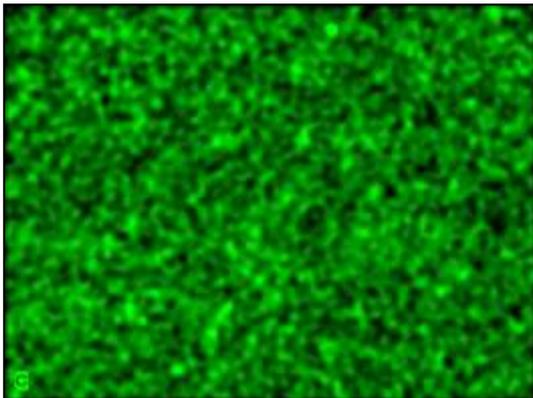
Imagen Original



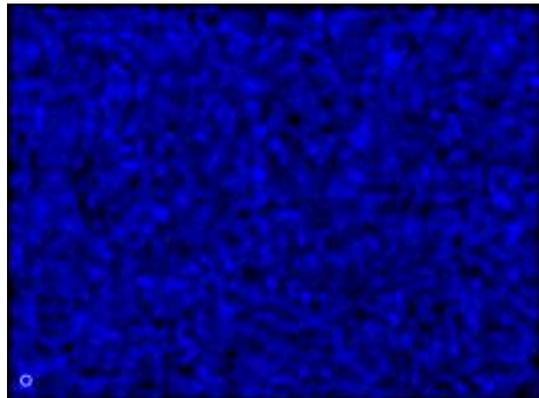
Hierro



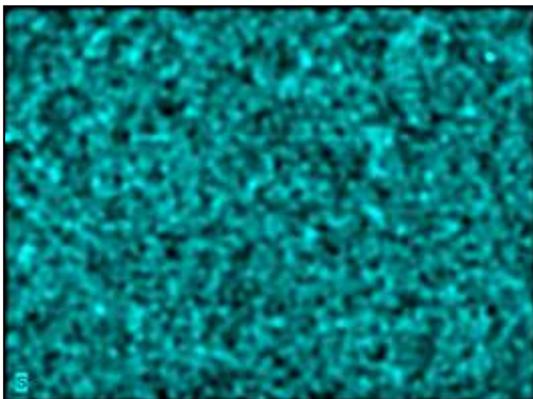
Carbono



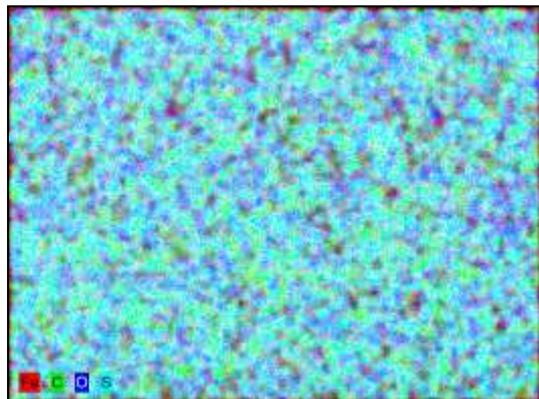
Oxígeno



Azufre



Todos



2.3. Ensayos AISI 316L / EM-638

Figura A80. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638 a 100x.

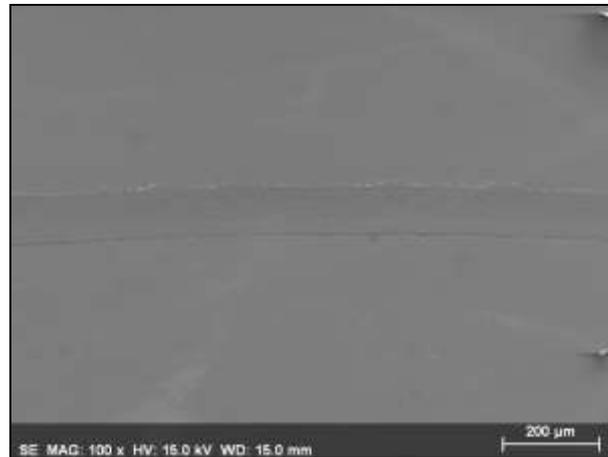


Figura A81. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638 a 200x.

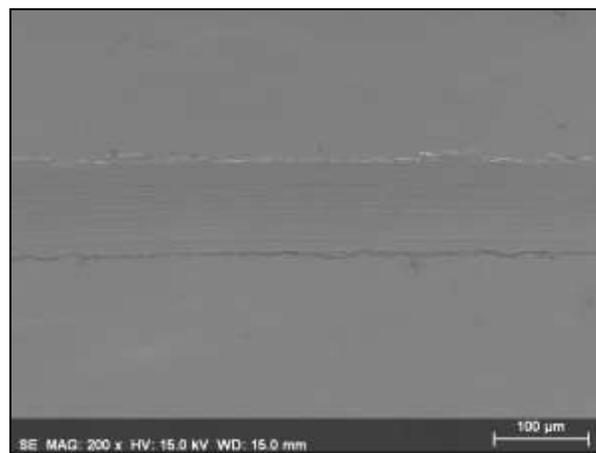


Figura A82. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-638 a 400x.

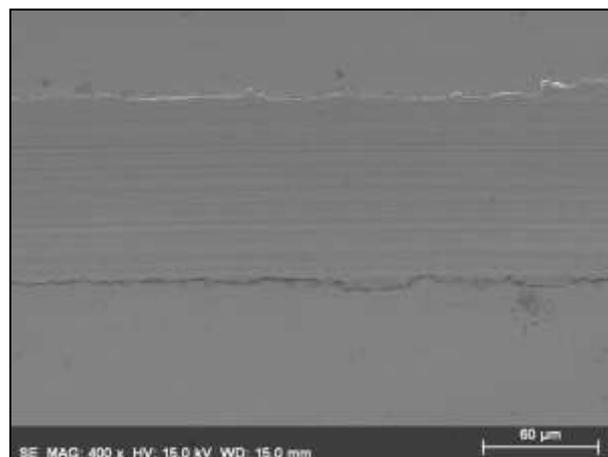
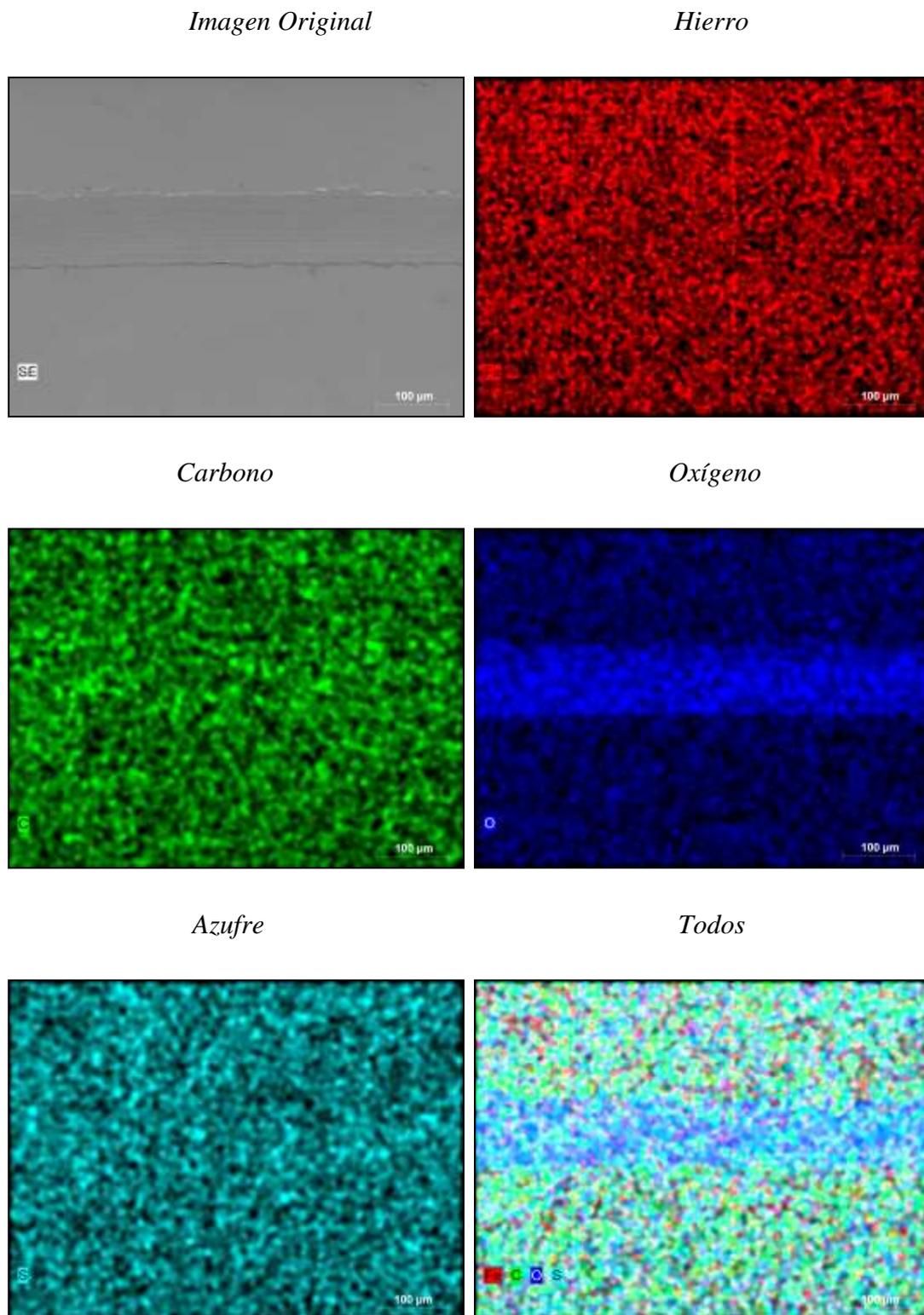


Figura A83. Mapa elemental del ensayo AISI 316L / EM-638.



2.4. Ensayos AISI 316L / EM-642

Figura A84. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642 a 100x.

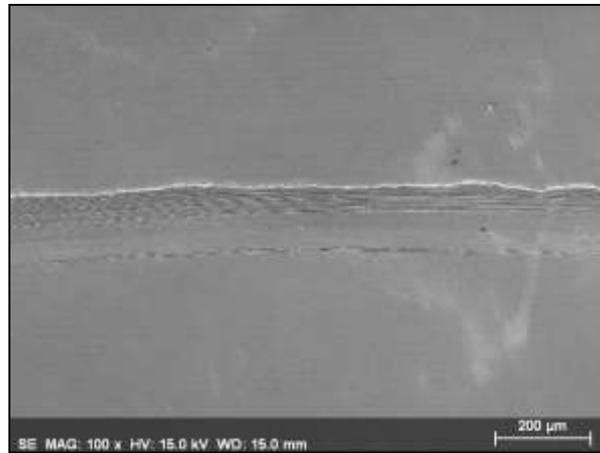


Figura A85. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642 a 200x.

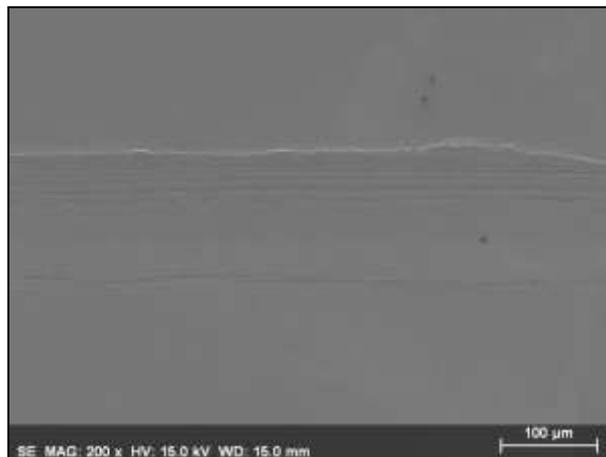


Figura A86. Micrografía electrónica de la huella en el ensayo AISI 316L / EM-642 a 400x.

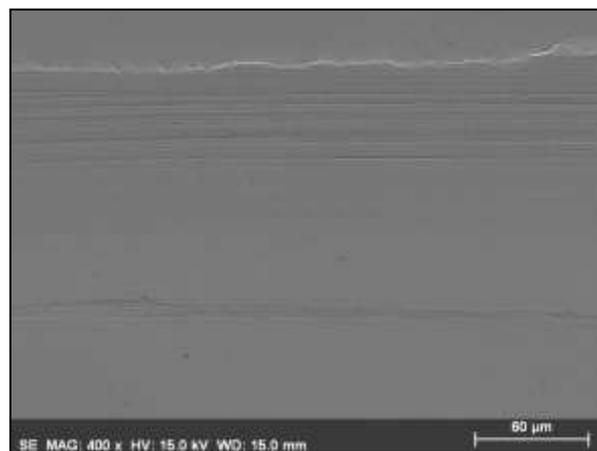


Figura A87. Mapa elemental del ensayo AISI 316L / EM-642.

