

Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



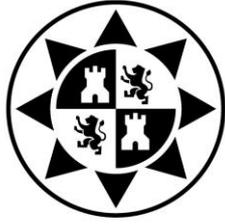
**industriales**

etsii UPCT

# “Contacto Aluminio-Acero: Líquidos lónicos de cadena corta como aditivos de un aceite sintético”

**Titulación:** Ingeniería Industrial  
**Alumno/a:** Juan José Pina Martínez  
**Director/a/s:** M<sup>a</sup> Dolores Bermúdez Olivares  
Ana Eva Jiménez Ballesta

Cartagena, 17 de marzo de 2010



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**industriales**  
etsii UPCT

**“Contacto Aluminio-Acero:  
Líquidos lónicos de cadena corta  
como aditivos de un aceite sintético”**

**Titulación:** Ingeniería Industrial  
**Alumno/a:** Juan José Pina Martínez  
**Director/a/s:** M<sup>a</sup> Dolores Bermúdez Olivares  
Ana Eva Jiménez Ballesta

Cartagena, 17 de marzo de 2010

# ÍNDICE

---

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

|   |          |
|---|----------|
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>1</b> |
| 1. Tribología .....   | 2        |
| 2. Fricción .....   | 2        |
| 3. Desgaste .....   | 2        |
| 4. Lubricación .....  | 4        |
| 4.1. Principios de lubricación .....  | 5        |
| 5. Aceites lubricantes .....  | 7        |
| 5.1. Aceites sintéticos .....   | 7        |
| 5.2. Aditivos .....   | 9        |
| 6. Lubricación de contactos aluminio-acero .....                                      | 10       |
| 7. Líquidos iónicos.....  | 11       |
| 7.1. Introducción.....  | 11       |
| 7.2. Propiedades fisicoquímicas .....   | 12       |
| 7.3. Organización estructural de los LI .....   | 13       |
| 7.3.1. Estructura de los LI en disolución .....                                       | 13       |
| 7.3.2. Influencia de la presencia de agua .....                                       | 14       |
| 7.4. Aplicaciones de los LI en Ingeniería.....  | 15       |
| 7.4.1. Aplicaciones en operaciones a alta presión .....                               | 15       |
| 7.4.2. Aplicaciones para la propulsión aeroespacial .....                             | 15       |
| 7.4.3. Aplicación como materiales verdes .....  | 15       |
| 7.5. Propiedades lubricantes de los líquidos iónicos .....                            | 18       |
| 7.5.1. Introducción .....   | 18       |
| 7.5.2. Lubricación mediante los LI como aditivos en un aceite sintético.....          | 20       |
| 7.5.3. Antecedentes del efecto de la longitud de cadena de los LI como aditivos ..... | 21       |
| 8. El Aluminio .....  | 22       |
| 8.1. Evolución histórica .....  | 22       |
| 8.2. Aleaciones de Aluminio .....   | 23       |
| 8.3. Tipos de aleaciones normalizadas.....  | 24       |
| 8.3.1. Aleaciones de Al forjado sin tratamiento térmico .....                         | 24       |
| 8.3.2. Aleaciones de Al forjado con tratamiento térmico .....                         | 24       |
| 8.4. El uso de Aluminio en automóviles .....  | 25       |
| 9. Objetivos.....   | 26       |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>II. MATERIALES, MÁQUINAS Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>1. Materiales utilizados en la experimentación .....</b>  | <b>28</b> |
| <b>1.1. Aleaciones de aluminio .....</b>   | <b>28</b> |
| 1.1.1. Aluminio 2011 T3.....   | 28        |
| 1.1.2. Aluminio 6061 T6.....   | 30        |
| 1.1.3. Aluminio 7075 T6.....   | 32        |
| <b>1.2. Punzón de acero.....</b>   | <b>34</b> |
| <b>1.3. Lubricante sintético PGDO 1429 .....</b>   | <b>35</b> |
| <b>1.4. Líquidos Iónicos .....</b>   | <b>35</b> |
| 1.4.1. L102.....   | 36        |
| 1.4.2. L-Nft102.....   | 36        |
| <b>2. Equipos utilizados en la experimentación .....</b>   | <b>37</b> |
| <b>2.1. Tribómetro .....</b>   | <b>37</b> |
| <b>2.2. Cortadora de precisión.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>2.3. Pulidora metalográfica.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>2.4. Rugosímetro.....</b>   | <b>39</b> |
| <b>2.5. Perfilómetro .....</b>   | <b>39</b> |
| <b>2.6. Microscopia óptica .....</b>   | <b>40</b> |
| <b>2.7. Microscopia electrónica de barrido (SEM).....</b>  | <b>41</b> |
| <b>3. Ensayos de fricción y desgaste .....</b>   | <b>43</b> |
| <b>3.1. Procedimiento experimental.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>3.2. Preparación de las probetas de aluminio .....</b>  | <b>44</b> |
| <b>3.3. Medida de la rugosidad .....</b>   | <b>44</b> |
| <b>3.4. Presión de contacto.....</b>   | <b>44</b> |
| <b>3.5. Medida de los coeficientes de fricción.....</b>  | <b>44</b> |
| <b>3.6. Medida del volumen de desgaste .....</b>   | <b>44</b> |
| <b>3.7. Ensayos de fricción y desgaste en seco.....</b>  | <b>45</b> |
| 3.7.1. Ensayos de fricción en seco.....  | 46        |
| 3.7.2. Ensayos de desgaste en seco.....  | 46        |
| <b>3.8. Ensayos de fricción y desgaste con lubricación por aceite sintético PGDO 1429.....</b>                   | <b>47</b> |
| 3.8.1. Ensayos de fricción con PGDO 1429.....  | 47        |
| 3.8.2. Ensayos de desgaste con PGDO 1429.....  | 47        |
| <b>3.9. Ensayos de fricción y desgaste con lubricación por LI como aditivos en el lubricante PGDO 1429. ....</b> | <b>48</b> |
| 3.9.1. Ensayos de fricción y desgaste con 1%L102 en el aceite PGDO 1429.....                                     | 48        |
| 3.9.1.1. Ensayos de fricción.....  | 48        |
| 3.9.1.2 Ensayos de desgaste.....   | 48        |
| 3.9.2. Ensayos de fricción y desgaste con 1%L-Nft102 en el aceite PGDO 1429.....                                 | 49        |
| 3.9.2.1. Ensayos de fricción.....  | 49        |
| 3.9.2.2 Ensayos de desgaste.....   | 49        |

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....   | <b>50</b> |
| <b>1. Introducción</b> .....  | <b>51</b> |
| <b>2. Ensayos de fricción y desgaste en seco.</b> .....                           | <b>52</b> |
| <b>2.1. Resultados de fricción y desgaste en seco para Al 2011</b> .....          | <b>52</b> |
| 2.1.1. Huellas de desgaste en seco .....  | 52        |
| 2.1.2. Huellas de desgaste en seco del punzón de acero .....                      | 54        |
| 2.1.3. Partículas de desgaste en seco .....                                       | 56        |
| <b>2.2. Resultados de fricción y desgaste en seco para Al 6061</b> .....          | <b>57</b> |
| 2.2.1. Huellas de desgaste en seco .....  | 57        |
| 2.2.2. Huellas de desgaste en seco del punzón de acero .....                      | 59        |
| 2.2.3. Partículas de desgaste en seco .....                                       | 61        |
| <b>2.3. Resultados de fricción y desgaste en seco para Al 7075</b> .....          | <b>62</b> |
| 2.3.1. Huellas de desgaste en seco .....  | 62        |
| 2.3.2. Huellas de desgaste en seco del punzón de acero .....                      | 64        |
| 2.3.3. Partículas de desgaste en seco .....                                       | 66        |
| <b>3. Ensayos de fricción y desgaste para Al 2011</b> .....                       | <b>67</b> |
| <b>3.1. Resultados de fricción</b> .....  | <b>67</b> |
| <b>3.2. Resultados de desgaste</b> .....  | <b>68</b> |
| <b>3.3. Huellas de desgaste</b> .....   | <b>69</b> |
| 3.3.1. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio óptico .....      | 69        |
| 3.3.2. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el perfilómetro .....            | 70        |
| 3.3.3. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio electrónico ..... | 71        |
| <b>3.4. Huellas de desgaste de la bola de acero</b> .....                         | <b>74</b> |
| <b>3.5. Partículas de desgaste en ensayos lubricados</b> .....                    | <b>76</b> |
| <b>4. Ensayos de fricción y desgaste para Al 6061</b> .....                       | <b>77</b> |
| <b>4.1. Resultados de fricción</b> .....  | <b>77</b> |
| <b>4.2. Resultados de desgaste</b> .....  | <b>78</b> |
| <b>4.3. Huellas de desgaste</b> .....   | <b>79</b> |
| 4.3.1. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio óptico .....      | 79        |
| 4.3.2. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el perfilómetro .....            | 80        |
| 4.3.3. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio electrónico ..... | 81        |
| <b>4.4. Huellas de desgaste de la bola de acero</b> .....                         | <b>84</b> |
| <b>5. Ensayos de fricción y desgaste para Al 7075</b> .....                       | <b>86</b> |
| <b>5.1. Resultados de fricción</b> .....  | <b>86</b> |
| <b>5.2. Resultados de desgaste</b> .....  | <b>87</b> |
| <b>5.3. Huellas de desgaste</b> .....   | <b>88</b> |
| 5.3.1. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio óptico .....      | 88        |
| 5.3.2. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el perfilómetro .....            | 89        |
| 5.3.3. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio electrónico ..... | 90        |
| <b>5.4. Huellas de desgaste de la bola de acero</b> .....                         | <b>93</b> |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>6. Comparación de resultados de fricción y desgaste para cada aleación de Al...</b> | <b>95</b>  |
| 6.1. Ensayos de fricción y desgaste en seco.....                                       | 95         |
| 6.2. Ensayos de fricción y desgaste con PGDO 1429 .....                                | 96         |
| 6.3. Ensayos de fricción y desgaste con PGDO 1429+1%L102.....                          | 97         |
| 6.4. Ensayos de fricción y desgaste con PGDO 1429+1%L-Ntf102 .....                     | 98         |
| <br>   |            |
| <b>IV. CONCLUSIONES .....</b>  | <b>100</b> |
| <br>   |            |
| <b>V. BIBLIOGRAFÍA .....</b>   | <b>102</b> |

---

# ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS

---

|                  |   |
|------------------|---|
| BL .....         | Lubricación límite  |
| EHL .....        | Lubricación elastohidrodinámica                                   |
| HDL .....        | Lubricación hidrodinámica   |
| K .....          | Tasa de desgaste  |
| L-102.....       | Tetrafluoroborato de 1-etil, 3-metilimidazolio                    |
| L-Ntf102 .....   | Bis(trifluorometanosulfonil)imida de 1-etil-<br>3-metilimidazolio |
| LI .....         | Líquido iónico  |
| PGDO .....       | Propilenglicol dioleato   |
| $R_{max}$ .....  | Rugosidad máxima  |
| $R_a$ .....      | Rugosidad media   |
| SEM .....        | Microscopía electrónica de barrido                                |
| $v$ .....        | Velocidad de deslizamiento  |
| $\eta$ .....     | Viscosidad dinámica   |
| $\mu$ .....      | Coefficiente de fricción  |
| $\nu$ .....      | Viscosidad cinemática   |
| $\epsilon$ ..... | Constante dieléctrica   |

---

# **CAPÍTULO I**

---

# **INTRODUCCIÓN**

## 1. Tribología

La palabra tribología proviene del griego “τριβος” (tribos), que significa “frotamiento”, pero hasta 1966, con la publicación del informe Jost [1,2], no se estableció el concepto actual de esta palabra. Este informe se centraba en los enormes beneficios que para el PIB de las naciones supondría la aplicación de los actuales conocimientos en tribología.

La tribología es la ciencia y tecnología de los fenómenos que tienen lugar en la interfase de contacto entre dos sistemas, teniendo por objeto el estudio de materias tales como la lubricación, la fricción y el desgaste de materiales.

## 2. Fricción

Se define fricción como “la resistencia que un cuerpo encuentra cuando se mueve sobre otro cuerpo en función de la transmisión del movimiento”. Normalmente se expresa mediante el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) que se obtiene de la ecuación:

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \quad (\text{Ec. I.1})$$

donde:

$F_f$  = Fuerza de fricción

$F_N$  = Fuerza o carga normal

Este coeficiente expresa la pérdida gradual de energía cinética, donde parte de esta energía se disipa en forma de calor y otra parte interviene en los procesos de deformación, dando lugar al desgaste de las superficies en contacto. La fricción de un contacto está influida por gran cantidad de parámetros, incluyendo la geometría de las superficies en contacto, sus propiedades, las condiciones y el lubricante utilizado.

## 3. Desgaste

La norma ASTM G40-05 [3] define el desgaste como: “daño que se produce en una superficie sólida, generalmente con pérdida progresiva de material, debido al movimiento relativo entre la superficie y otra sustancia o sustancias en contacto con ella”.

El desgaste tiene un tremendo efecto en la industria, habiéndose estimado el coste de los problemas producidos por el desgaste en EE.UU. en 8 millones de dólares anuales [4]. Esto es debido a que el desgaste determina la vida útil de numerosos

equipos [5] como motores de automóvil, articulaciones artificiales y frenos de aeronaves.

Los mecanismos de desgaste se clasifican en dos categorías principales [6]:

- **Desgaste mecánico.** Dentro de este grupo podemos encontrar diferentes procesos que producen desgaste:
  - **Abrasión.** Es uno de los principales problemas de desgaste en la industria. Se suele diferenciar entre “abrasión de dos cuerpos”, la que se produce cuando el material es eliminado de la superficie más blanda a causa de las asperezas de la superficie más dura, y “abrasión de tres cuerpos”, que tiene lugar cuando el daño es producido por alguna partícula abrasiva ajena al contacto, a menudo contaminantes.
  - **Erosión.** Suele ser producida por un fluido con partículas con movimiento relativo a la superficie del sólido.
  - **Adhesión.** Este tipo de desgaste puede producirse de forma muy rápida, dando lugar incluso al gripado de piezas móviles en sistemas mecánicos. Cuando dos superficies metálicas son puestas en contacto bajo carga se pueden formar fuertes uniones adhesivas en los puntos en los que las asperezas entran en contacto. Si forzamos a estas superficies a moverse tangencialmente, parte de las uniones se deformarán de manera que se producirá el arranque de fragmentos de la superficie más blanda.
  - **Fatiga superficial.** Si las superficies soportan cargas cíclicas, el material próximo a la superficie generará grietas, que con los sucesivos ciclos de carga se irán propagando y ramificando. Este entramado de grietas dará lugar a partículas libres que se desprenderán fácilmente de la superficie.
- **Desgaste con un elemento químico activo adicional,** usualmente oxidación y/o corrosión. Cuando los efectos del desgaste mecánico se combinan con un desgaste químico se suelen producir efectos sinérgicos, dando lugar a pérdidas de material y a una degradación superficial mucho mayor que si simplemente sumamos los dos mecanismos observados independientemente.

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.

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

En el desgaste se producen partículas que quedan atrapadas entre las superficies que están en contacto, influyendo en la fricción. Además, en las uniones se generan temperaturas muy altas en períodos cortos de tiempo, afectando al proceso de deformación y, por lo tanto, al desgaste.

El calor que se genera durante el proceso, genera altas temperaturas, dependiendo a su vez de las condiciones de funcionamiento, de la carga, velocidad y rapidez con la que se elimine el calor, por lo que dependerá de las propiedades térmicas de las superficies que están en contacto.

El fenómeno de la fricción está relacionado con el contacto superficial, donde es notable la influencia de la naturaleza de las superficies, su composición y microestructura.

Prácticamente se puede decir que son los mismos parámetros y los mismos tipos de fenómenos los que afectan a la fricción y al desgaste.

Por otro lado, observar cómo evoluciona la fricción en un sistema nos puede ayudar a distinguir procesos o cambios en los mecanismos de desgaste, por lo que su observación en conjunto nos da una información valiosa sobre el comportamiento tribológico del material.

Por tanto, la fricción y el desgaste deben considerarse fenómenos relacionados pero no equivalentes, aunque no sean independientes. El desgaste puede dar lugar a modificaciones superficiales que influyan sobre la fricción, tales como formación de películas y cambios de rugosidad. Por su parte, la fricción, mediante un efecto de calentamiento o de esfuerzos de tracción, puede modificar el comportamiento del material y, por tanto, influir en el desgaste. En este caso, la acumulación de partículas de desgaste en la interfase metal-polímero puede dar lugar, como hemos comentado, a un menor arranque de material, a pesar del aumento del coeficiente de fricción.

## **4. Lubricación [7]**

Los lubricantes se han convertido en un elemento esencial de la vida. Los motores de nuestros coches y sus cajas de cambio trabajan silenciosamente gracias a los sofisticados aceites y grasas que utilizan, mientras que los discos duros de nuestros ordenadores confían en delgadas películas orgánicas para hacer que los cabezales de lectura-escritura se muevan con seguridad a elevadas velocidades.

La lubricación es un arte que se ha practicado durante miles de años, desde los primeros días de la civilización humana. Sin embargo, su estudio como ciencia comienza en el siglo XVII, con el desarrollo de los cojinetes y rodamientos. A principios del siglo XX, con la llegada de los automóviles y los motores de vapor, comenzó el desarrollo de los complejos lubricantes modernos consistentes en un aceite base y aditivos químicos.

Se inició entonces la búsqueda de aditivos que solucionaran, o ayudaran a solucionar, una serie de problemas como la corrosión, la no dispersión de partículas, la combustión ácida y el desgaste. Sin embargo, este desarrollo ha sido eminentemente empírico, no llegando a entender detalladamente los mecanismos químicos existentes en la lubricación.

El rápido desarrollo de las técnicas analíticas en las últimas décadas ofrece una oportunidad sin precedentes para analizar la compleja química que rige el fenómeno de la lubricación.

Actualmente, una de las mayores fuerzas conductoras detrás del desarrollo de los lubricantes es el medioambiente, es decir, la disminución del consumo de combustible.

Un hecho que no es muy conocido es que el consumo de combustible puede reducirse significativamente cambiando únicamente el lubricante utilizado. Por ejemplo, es posible disminuir hasta en un 5% el combustible que consumen los automóviles actuales sustituyendo el típico aceite multigrado por uno de “fricción modificada” de menor viscosidad.

#### 4.1. Principios de lubricación

Un sistema lubricante consiste en dos superficies en movimiento bajo una carga con un lubricante entre ellas. La lubricación se consigue gracias a las propiedades físicas y químicas del fluido lubricante. Las propiedades físicas determinan su habilidad para operar bajo condiciones de lubricación hidrodinámica; y las propiedades químicas son cruciales para un buen comportamiento bajo lubricación límite.

La lubricación actual se basa en dos principios [7]:

- Evitar el contacto entre las superficies gracias a la presión hidrostática e hidrodinámica generada por el fluido lubricante, que permite soportar la carga aplicada (*Lubricación hidrodinámica y elastohidrodinámica, HDL y EHL*).
- Bajo cargas altas y/o velocidades bajas, se utilizan finas películas químicas generadas a partir de los aditivos para proteger a las superficies del inevitable contacto entre las asperezas. Estas películas químicas protegen del esfuerzo cortante provocado por la fricción y la abrasión del contacto (*Lubricación límite o BL*).

El régimen de lubricación existente entre dos superficies en contacto deslizante puede cambiar de uno a otro dependiendo de la carga, velocidad, viscosidad del lubricante, geometría del contacto y rugosidad superficial de ambas superficies.

El modelo más aceptado [8] para los contactos deslizantes con lubricación es el formulado por Stribeck en 1902, quién describió la variación de la fricción con respecto al parámetro de Hersey ( $\eta \cdot v / FN$ ), donde “v” es la velocidad de deslizamiento, “ $\eta$ ” la viscosidad dinámica y FN la fuerza normal aplicada (Figura I.1).

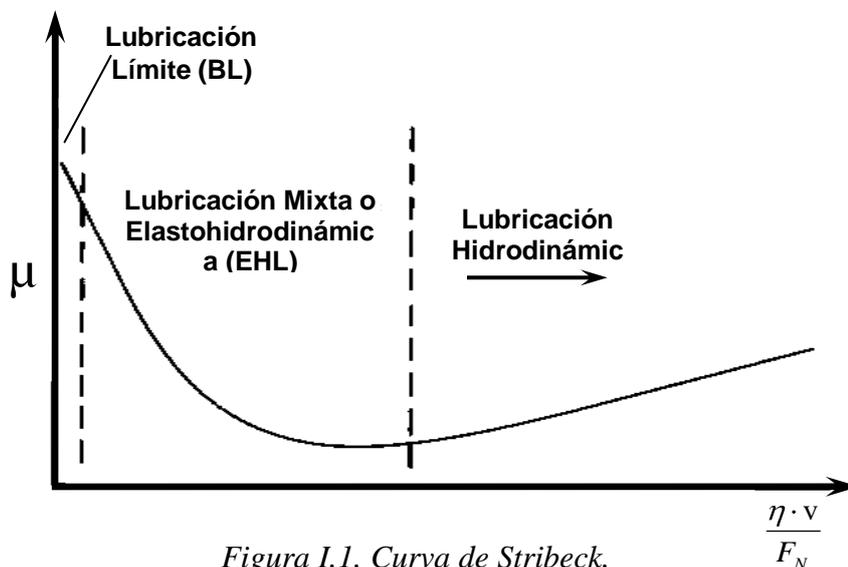


Figura I.1. Curva de Stribeck.

Incluso los contactos en seco muestran un comportamiento similar al descrito por Stribeck, produciéndose una fricción estática mayor que la dinámica o de deslizamiento.

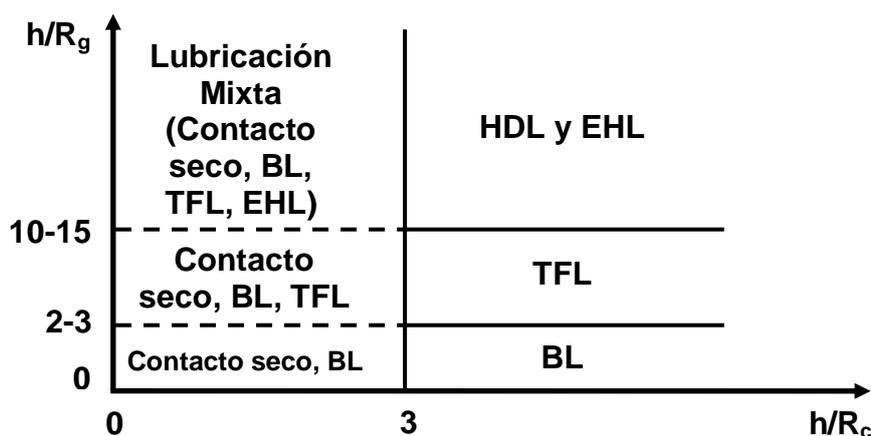
En los contactos deslizantes lubricados, la fricción disminuye al aumentar la velocidad de deslizamiento hasta una situación de película mixta o completa, después de la cual, la fricción del contacto puede mantenerse constante, aumentar o disminuir con la velocidad de deslizamiento, dependiendo de la viscosidad y de los efectos térmicos. Sin embargo, este modelo no es capaz de explicar el valor de fricción obtenido cuando éste depende de la fuerza aplicada y las superficies en contacto se adhieren una a otra.

Más recientemente [9], se ha propuesto un nuevo mapa de lubricación que se puede ver en la Figura I.2. En esta figura se define:

- “h” como el espesor de película.
- “Rg” como el radio efectivo de las moléculas del lubricante.
- “Rc” como la rugosidad combinada de las dos superficies.

Cuando las superficies entran en contacto, muchas asperezas sufren una deformación elástica, dando lugar a un régimen de EHL. Los parámetros críticos de este régimen son la viscosidad y los coeficientes de viscosidad–presión del lubricante. Si seguimos aumentando la presión de contacto más allá de la EHL se produce la deformación plástica de las asperezas y el espesor de película (h) decrece. Cuando h cae por debajo del rango de la rugosidad de las superficies, el contacto entre las asperezas se convierte en el mecanismo dominante para soportar la carga, encontrándonos dentro de la BL.

Existe una región de transición entre la EHL y la BL, tanto por el valor de “h” como por el comportamiento tribológico. Esta zona de transición se denomina régimen de lubricación de película fina o TFL, donde el valor de “h” puede llegar a ser del orden de nanómetros. A pesar de estos valores, para superficies muy pulidas, incluso con un espesor de película menor que la rugosidad combinada de las superficies en contacto, se puede llegar a obtener una buena lubricación [9].



*Figura I.2. Mapa de los regímenes de lubricación.*

El recientemente definido régimen TFL tiene mecanismos de trabajo claramente diferenciados del resto, ya que la adsorción superficial del lubricante da lugar a modificaciones en la alineación de las moléculas del líquido en varias de las capas

cercanas a la superficie sólida, produciéndose una ordenación molecular en el lubricante hasta cierto grado.

A diferencia de la BL, en la TFL el lubricante es móvil debido a que la película es relativamente gruesa, y la viscosidad tiene una influencia importante.

Por otro lado, la BL está caracterizada por la formación de películas adsorbidas, tanto de forma física como química. Bajo las condiciones de este régimen, 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.

## 5. Aceites lubricantes

Las funciones que tienen los lubricantes van desde controlar la fricción y el desgaste, hasta eliminar el calor para reducir las tensiones térmicas de los elementos mecánicos, pasando por la protección de los elementos frente a la corrosión.

Los lubricantes del futuro tienen que ser más respetuosos con el medio ambiente, tener un mayor nivel de operación y un menor coste total de su ciclo de vida que los usados hoy día. Para la mayoría de las aplicaciones, la elección convencional es un lubricante basado en aceites minerales, cuyas propiedades son bien conocidas y queda caracterizado normalmente por la viscosidad y el índice de viscosidad (IV).

La viscosidad determinada de forma experimental suele darse como viscosidad absoluta o dinámica ( $\eta$ ) o bien como viscosidad cinemática ( $\nu$ ). La viscosidad cinemática se obtiene normalizando la viscosidad absoluta con la densidad del fluido. La relación entre la viscosidad absoluta, la densidad ( $\rho$ ), y la viscosidad cinemática viene dada por:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{Ec. I.2})$$

La unidad de la viscosidad absoluta es el Poise (P;  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  o  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ), mientras que la unidad de la viscosidad cinemática es el Stoke (St o  $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ). A causa de su elevado valor, la viscosidad absoluta se da usualmente en cP y la viscosidad cinemática en cSt. El índice de viscosidad (IV) de un lubricante, indica el cambio en el valor de viscosidad del aceite dentro de un rango de temperaturas dado.

Sin embargo, si se decide la elección de un lubricante sintético, como son los basados en ésteres sintéticos, para una determinada aplicación además de la viscosidad se tienen que evaluar otras propiedades adicionales, como la conductividad térmica y la polaridad [10].

### 5.1. Aceites sintéticos

Un aceite lubricante típico está compuesto entre un 75 y un 95% por un componente principal, llamado “aceite base” o “material base” y el resto por otros compuestos químicos llamados “aditivos”. Esencialmente el aceite base determina las

propiedades físicas del aceite y es razonablemente inerte; mientras que los aditivos mejoran sus propiedades químicas.

La introducción a escala industrial en 1931 de los lubricantes sintéticos y sus aditivos, particularizados para miles de aplicaciones y ambientes, ha facilitado el problema de encontrar el lubricante adecuado a cada uso. Aproximadamente, el 10% de la producción global de aceites lubricantes son productos totalmente sintéticos [11].

En general, los lubricantes sintéticos tienen buenos índices de viscosidad, baja volatilidad, buena fluidez a baja temperatura, alta estabilidad térmica y baja toxicidad. Otra consideración es su miscibilidad con los hidrocarburos y su compatibilidad. Si, como hemos señalado más arriba, los lubricantes sintéticos tienen que sustituir a los minerales, deben ser capaces de poder usarse en los motores “antiguos”, que anteriormente contenían lubricantes basados en aceites minerales.

La clasificación de los principales aceites sintéticos se puede ver en la Figura I.3. Los más usados son las polialfaolefinas (PAO) y los distintos tipos de ésteres sintéticos. Sin embargo, el mayor inconveniente de este tipo de lubricantes es su coste, pudiendo ser de 3 a 500 veces mayor que el de un lubricante mineral.

Las PAO se usan actualmente como fluidos base en multitud de aplicaciones de altas prestaciones, pero presentan inconvenientes como la oxidación y la posibilidad de producir la degradación de los sistemas de sellado. Además, no se consideran biodegradables.

Los ésteres sintéticos consisten, en su forma más simple, en un alcohol y un ácido graso, por lo que abarcan un amplio rango de fluidos base con propiedades que varían enormemente dependiendo de su estructura. Por este motivo pueden formularse “a medida” para una determinada aplicación, siendo la opción más atractiva para sustituir a los aceites base tradicionales, además de por su no toxicidad y excelente biodegradabilidad. La Figura I.4 nos muestra la estructura molecular de cuatro ésteres distintos usados como fluidos base.

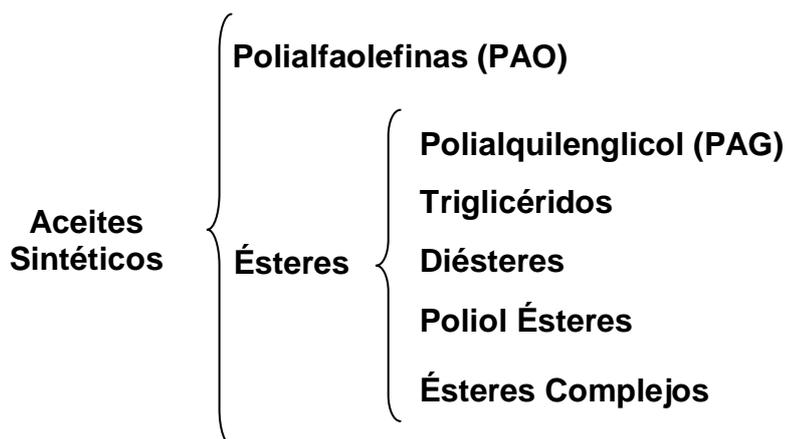


Figura I.3. Esquema de los aceites sintéticos más usados en lubricación.

Durante décadas, los ésteres han sido utilizados en la industria como el principal aditivo de los lubricantes de hidrocarburo procedentes del petróleo [11]. En comparación con los hidrocarburos, los ésteres tienen momentos dipolares muy altos, lo que mejora su capacidad lubricante gracias a la fuerte interacción que se produce con las superficies metálicas.

El aceite base usado en el presente proyecto pertenece al grupo de los ésteres sintéticos y es el denominado propilenglicol dioleato o PGDO.

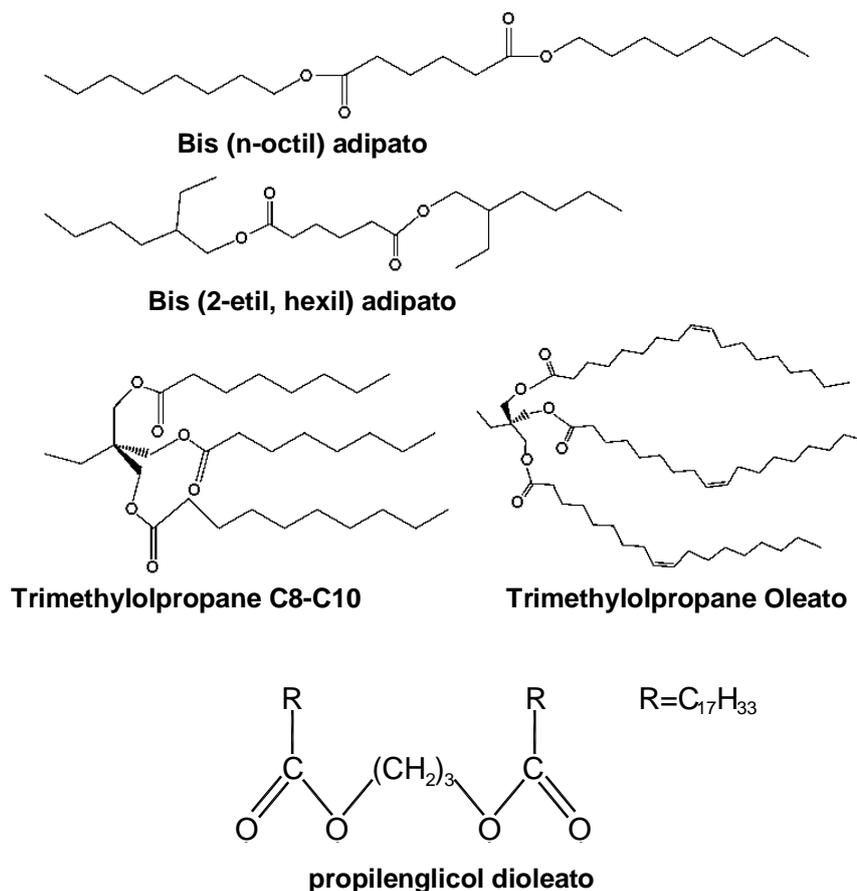


Figura I.4. Representaciones esquemáticas de cinco tipos distintos de ésteres sintéticos.

## 5.2. Aditivos

La ciencia y el uso de los aditivos nacieron de la demanda de mejoras y del aumento del uso de maquinaria, resultado de la revolución industrial. La adición de sustancias químicas inorgánicas al agua y el uso de grasas animales, aceites vegetales y aceites animales son estrategias muy comunes en la industria.

La mayor parte de las mejoras en el comportamiento de los lubricantes industriales desde finales de la década de 1930 ha sido fruto de los aditivos.

Mayores velocidades de operación en los motores, más potencia por unidad de peso, aumento de las temperaturas de operación, sistemas hidráulicos más complejos, y mayores presiones, requerían una mejor estabilidad ante la temperatura y la oxidación, mejores características ante la fricción y el desgaste, y mejores propiedades reológicas.

En general, los aditivos están formados por un grupo funcional unido a una cadena hidrocarbonada que le proporciona solubilidad en el aceite base [7]. Pueden ser desde inhibidores de corrosión hasta modificadores de fricción o aditivos antidesgaste [12].

Además de la ya mencionada necesidad de la adecuación medioambiental de los lubricantes, existen tres grandes factores que determinan los desarrollos futuros en el campo de los aditivos para lubricación [12].

La necesidad de que el aditivo sea efectivo en un amplio rango de temperaturas. En aplicaciones como la aeronáutica se necesitan lubricantes fiables desde  $-40\text{ °C}$  hasta más de  $300\text{ °C}$  durante más de 4000 horas de funcionamiento, siendo los lubricantes líquidos actuales efectivos únicamente hasta  $150\text{ °C}$ .

El desarrollo de aditivos que se adapten a las formulaciones y características de los nuevos aceites base sintéticos.

El cambio en la química de las superficies puede producir interacciones indeseables entre el lubricante y la superficie sólida, que deben ser evitadas por los aditivos.

## **6. Lubricación de contactos aluminio-acero**

Las aleaciones de aluminio tienen una excelente resistencia a la corrosión, una buena conductividad térmica, un coste moderado y una elevada relación resistencia/densidad, por lo que se han usado ampliamente en la industria de la automoción y la aeronáutica [13,14]. Algunos ejemplos de sus aplicaciones tribológicas los encontramos en los motores de combustión interna, cojinetes, compresores, refrigeradores, etc.

Para conseguir alcanzar las cada vez más exigentes normas medioambientales exigidas a los motores de automóvil, hemos visto cómo los fluidos lubricantes tienen que evolucionar. Por supuesto, para adaptarse a esta normativa, los fabricantes de motores también han tenido que realizar severos cambios en los diseños de sus productos, consiguiendo mejorar el consumo de combustible gracias al uso de materiales cada vez más ligeros.

La sustitución de los bloques de fundición de los motores por otros más ligeros fabricados en aluminio, ha conseguido reducir su peso hasta en un 40-50% [4]. Sin embargo, la baja resistencia al desgaste de las aleaciones de aluminio sigue siendo uno de sus mayores problemas.

El contacto aluminio-acero resulta un sistema extremadamente difícil de lubricar incluso a cargas moderadas, debido a la transferencia del aluminio a la superficie del acero.

Desafortunadamente, ninguno de los lubricantes de motor o aceites sintéticos usados para el contacto aluminio-acero ha sido tan efectivo como los usados en los contactos acero-acero, ya que las aleaciones de aluminio suelen mostrar una alta reactividad con los aditivos convencionales de los lubricantes.

Como hemos comentado, la formulación de los lubricantes suele contener aditivos con largas cadenas de hidrocarburos que nos ayudan a controlar la fricción y el desgaste, los llamados aditivos de lubricación límite. Suelen ser moléculas con una especie iónica en un extremo que reacciona con la superficie metálica, dejando libre la cadena de hidrocarburos que sobresale de la superficie. Por esta razón, la reacción química del lubricante con las superficies en deslizamiento es especialmente importante en el régimen de lubricación límite.

Sin embargo, los aditivos antidesgaste convencionales no han resultado efectivos a la hora de evitar el fallo de las aleaciones de aluminio [15]. La interacción entre el aluminio y los alcoholes, ésteres y éteres [16], y los aditivos de lubricantes con cloro, fósforo y azufre ha sido ampliamente investigada para el sistema de lubricación aluminio-acero.

Se han realizado diversos estudios para encontrar aditivos adecuados para el contacto aluminio-acero. Se ha demostrado que el aumento del número de grupos hidroxilo y de la longitud de la cadena alquilo de los alcoholes mejora las propiedades antidesgaste y de capacidad de soportar carga en los contactos aluminio-acero.

Sin embargo, no existen aditivos de extrema presión completamente efectivos para los componentes de aluminio de los motores, y no existe un criterio de diseño claro para conseguir grupos funcionales de aditivos que cumplan las condiciones requeridas. De especial importancia es la necesidad de aditivos que formen capas protectoras sobre la superficie del aluminio una vez eliminada la capa de óxido en el proceso de desgaste.

## **7. Líquidos iónicos (LI)**

### **7.1. Introducción**

Los líquidos iónicos pueden ser vistos como un nuevo y destacado tipo de disolventes, o como un tipo de material que tiene una historia larga y útil. Estos materiales, usados formalmente para aplicaciones especializadas en electroquímica, pueden tener aplicación en otros muchos campos.

Podríamos definir a los LI, en contraste con las sales fundidas convencionales, como sales con una temperatura de fusión por debajo del punto de ebullición del agua y que a menudo son estables en agua.

La composición química general de estos materiales es sorprendentemente consistente, incluso aunque la composición específica y las propiedades físicas y químicas varían enormemente. La mayoría tiene una estructura compuesta por un catión orgánico y un anión inorgánico poliatómico. Debido a que existen muchas combinaciones posibles de cationes y aniones, el número potencial de LI es enorme, del orden de  $10^{18}$ . Descubrir un nuevo tipo es relativamente fácil, pero determinar su utilidad requiere una inversión mucho más sustancial en la determinación de sus propiedades físicas y químicas.

Inicialmente, estos materiales fueron desarrollados para su uso como electrolitos, aunque como un nuevo tipo no convencional de disolvente, estos materiales han ido ganando importancia y un particular interés. Esto es debido a las importantes características que poseen: una volatilidad prácticamente nula, con una presión de vapor casi cero ya que están compuestos completamente de iones; inflamabilidad despreciable; un amplio rango de liquidus, es decir, una alta estabilidad térmica y un bajo punto de fusión; y una miscibilidad controlada con los compuestos orgánicos y con agua.

## 7.2. Propiedades fisicoquímicas [17]

Las propiedades físicas y químicas de los LI, tales como el punto de fusión, la hidrofobicidad, la polaridad y la miscibilidad, pueden ajustarse variando las estructuras de los cationes y aniones y sus combinaciones [18], siendo esta versatilidad una de las principales características de estos materiales.

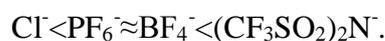
- **Punto de fusión**

Los líquidos iónicos con aniones altamente fluorados ( $\text{BF}_4^-$ ,  $\text{PF}_6^-$ ,  $(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}^-$ ,  $\text{CF}_3\text{COO}^-$ , etc.) son generalmente líquidos a bajas temperaturas, formando estructuras cristalinas al solidificar, produciéndose una cristalización lenta. Empíricamente se ha observado que el punto de fusión decrece según el siguiente orden:



- **Temperatura de descomposición**

El límite superior del rango de liquidus es usualmente fronterizo con la temperatura de descomposición térmica en los LI, ya que la mayoría de líquidos iónicos no son volátiles. La presencia de cationes orgánicos restringe la estabilidad, teniendo lugar la pirólisis a temperaturas entre 350 y 450 °C. Así, las temperaturas de descomposición varían con el tipo de anión, cumpliéndose el siguiente orden:



- **Viscosidad**

Las viscosidades de los LI a temperatura ambiente van desde unos 10 cP hasta valores de más de 500 cP, dependiendo su valor fuertemente de la temperatura, la presión y las impurezas. Para LI con el mismo anión, la tendencia es que a cadenas alquilo más largas, se obtengan fluidos más viscosos.

- **Densidad**

Las densidades registradas para los LI varían entre  $1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $2,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Ésta parece ser la propiedad física menos sensible a las variaciones de temperatura, como se ha observado en algunos estudios

- **Miscibilidad**

La miscibilidad de los LI con el agua puede variar de completamente miscible a casi totalmente inmiscible, cambiando el anión de  $\text{Cl}^-$  a  $\text{PF}_6^-$ . Sin embargo, el agua es la impureza más común en los LI, encontrándose incluso en los hidrófobos, que pueden llegar a absorber rápidamente la humedad del ambiente. En lo que se refiere a los disolventes no polares, se ha determinado que los LI tienden a ser inmiscibles con ellos.

- **Polaridad**

En los líquidos moleculares, la constante dieléctrica ( $\epsilon$ ) se considera una medida de la polaridad. Sin embargo, las técnicas convencionales para medir esta propiedad no se han podido utilizar con éxito en los LI, debido a su alto valor de conductividad eléctrica.

Estudios recientes [19] han demostrado que es posible medir el valor de  $\epsilon$  para los LI. Los resultados obtenidos clasifican a estos materiales como disolventes moderadamente polares. Se ha determinado que su constante dieléctrica se encuentra entre 8,8 y 15,2, disminuyendo este valor al aumentar la longitud de la cadena alquílica.

A la hora de determinar la polaridad de los LI debemos tener en cuenta la longitud de la cadena alquílica y la naturaleza del anión. Por lo tanto, para un mismo anión, la polaridad del LI decrece al aumentar la longitud de cadena. Pero también tiene una influencia importante la naturaleza del anión, pudiendo ajustarse el valor de  $\epsilon$  mediante cambios del catión y el anión del LI.

Los resultados experimentales obtenidos [19] presentan valores de  $\epsilon$  marcadamente menores que los esperados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las teorías establecidas para describir las interacciones dipolares en los líquidos moleculares no pueden trasladarse con facilidad a los LI, debido, como veremos en el siguiente apartado, a su particular organización, por lo que conceptos como la polaridad de los LI requieren un cuidadoso estudio.

### 7.3. Organización estructural de los Líquidos Iónicos.

#### 7.3.1. Estructura de los L.I. en disolución

La incorporación de otras moléculas a los LI puede producir cambios en sus propiedades físico-químicas y en algunos casos provocar la formación de nanoestructuras de regiones polares y no polares (figura I.5).

En fase líquida, los LI de 1-alkil, 3-metilimidazolio podrían estructurarse en este tipo de dominios de distinta polaridad.

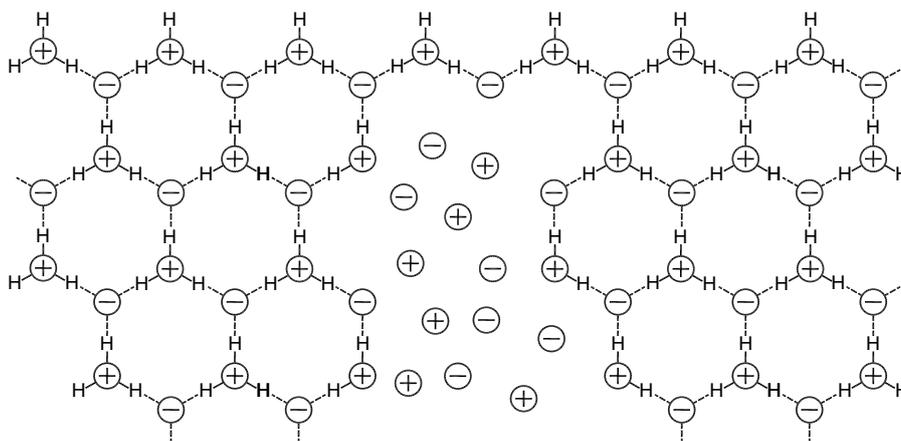


Figura I.5 Ordenamiento de los LI en presencia de otras moléculas.

### 7.3.2. Influencia de la presencia de agua

El primer autor en postular que los LI “húmedos” no debían considerarse como disolventes homogéneos, sino como materiales nanoestructurados en regiones polares y no-polares, fue Compton [20]. Esta hipótesis permitía explicar las enormes diferencias encontradas en las propiedades físicas de los LI secos y húmedos. Estas nanoestructuras permitirían que las moléculas neutras quedaran en las regiones menos polares, mientras que la difusión de las especies iónicas se produciría de forma rápida a través de las regiones polares o húmedas.

Los LI en disolución son también capaces de mantener en gran medida la estructura de enlaces de hidrógeno, incluso con disolventes de baja constante dieléctrica. Los LI diluidos infinitamente en otras moléculas pueden formar pares de iones separados por el disolvente, de forma que un aumento en la concentración [21,22] del LI puede llevar a la formación de agregados de pares de iones. A medida que la concentración del LI aumenta, se pueden formar agregados de tres iones e incluso mayores, que pueden coexistir en equilibrio a diferentes concentraciones.

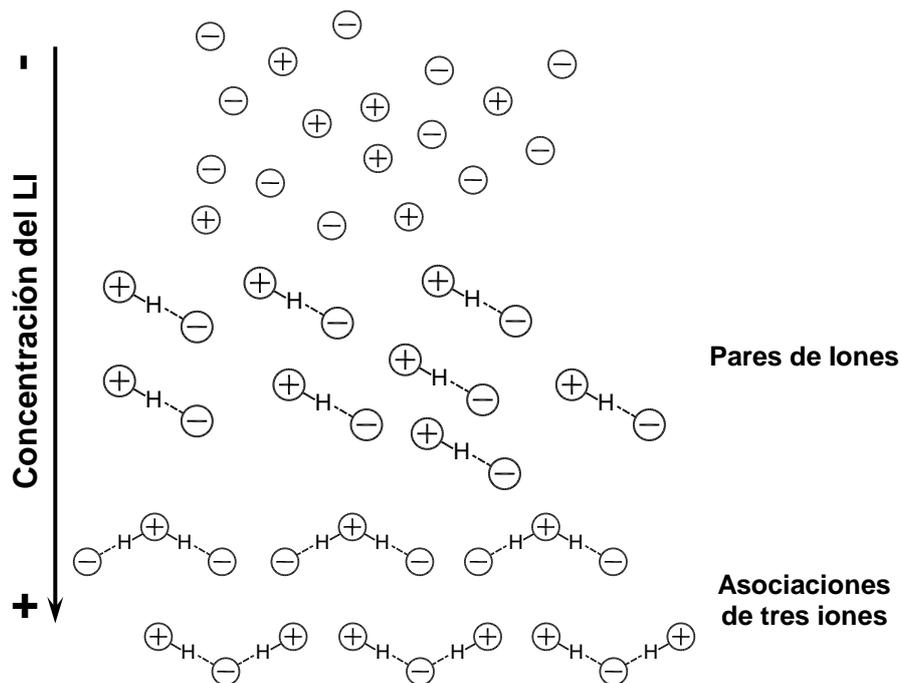


Figura I.6 LI en disolución. Equilibrio iónico a diferentes concentraciones.

Finalmente, resumiendo podríamos decir que mientras que los LI puros, tanto en estado sólido como en estado líquido, se pueden describir como estructuras supramoleculares unidas por enlaces de hidrógeno, cuando se mezclan con otras moléculas se deben considerar como materiales nanoestructurados en regiones polares y no polares.

## 7.4. Aplicaciones de los LI en Ingeniería [23]

### 7.4.1. Aplicación en operaciones a alta presión

Los líquidos iónicos poseen propiedades muy adecuadas para su aplicación en ingeniería, de las cuales se pueden destacar algunas como su bajo efecto negativo sobre la salud humana, su estabilidad térmica y química, bajo poder corrosivo... Es por ello por lo que estos son cada vez más utilizados en aplicaciones de ingeniería química. Para aplicaciones a altas presiones han demostrado también tener baja compresibilidad, buenas propiedades lubricantes y adecuada solubilidad de gases.

A continuación vamos a analizar las características de los líquidos iónicos y aspectos de ellos que las condicionan:

- **Bajo poder corrosivo:** la estructura química del cation y el tipo de anion tienen un gran efecto en el poder corrosivo de los LI.
- **Baja compresibilidad:** esta característica es muy importante en las aplicaciones hidráulicas, pues una baja compresibilidad nos asegura un alto rendimiento de la maquina hidráulica.
- **Alta estabilidad térmica:** la mayoría de los LI analizados tienen una alta estabilidad térmica a altas temperaturas (200-350 °C). La larga duración de los tests ha demostrado que dicha estabilidad es independiente de la presión. Además los LI tienen baja tendencia a inflamarse.
- **Buenas propiedades lubricantes:** la abrasión en motores utilizando como lubricantes líquidos iónicos y aceites lubricantes convencionales hacen que el desgaste producido es menor en presencia de los primeros.

Finalmente, después de analizar los LI podemos decir que sus propiedades físicas y químicas hacen que sean muy adecuados para ser usados en aplicaciones a alta presión y en procesos mecánicos.

### 7.4.2. Aplicación para la propulsión aeroespacial

Es importante la aplicación de los líquidos iónicos en la propulsión aeroespacial, y es que las propiedades de estos hacen que sean candidatos ideales para dichas aplicaciones.

La despreciable presión de vapor de los líquidos iónicos y la importante conductividad hacen que sean ideales para propulsión micro-eléctrica, en la cual se consigue una fuerte fuerza de empuje generada por micro-gotas y que permiten crear un sistema de propulsión con un bajo gasto de liquido y por tanto con una baja contaminación en el despegue

### 7.4.3. Aplicación como materiales verdes

Debido a su extremadamente baja volatilidad, los LI son llamados a menudo “disolventes verdes”, en contraste con los tradicionales compuestos orgánicos volátiles. Debido a sus propiedades únicas, han sido extensamente usados como disolventes o

como catalizadores [24] en una gran variedad de reacciones. También se ha explorado su habilidad como disolventes en procesos de extracción y separación, gracias a su hidrofobicidad regulable [25] y a su capacidad de disolución.

En el campo de la ingeniería, existen diversas áreas en las que los LI se están aplicando como nuevos materiales “verdes” [26]

- **Sistemas de energía solar.**

La conversión de la energía solar en calor necesita fluidos térmicos con propiedades físicas y térmicas únicas, que no siempre pueden alcanzarse con los materiales comerciales. Los LI tienen una estabilidad térmica y unas capacidades caloríficas superiores a los fluidos térmicos convencionales, siendo capaces de almacenar cantidades considerables de calor.

Se han investigado las características térmicas y de corrosión de varios LI que pueden utilizarse en este tipo de aplicaciones. También se ha propuesto su uso como electrolitos en las células solares, debido a sus buenas propiedades eléctricas y su compatibilidad con las resinas epoxi utilizadas en la construcción de estas células.

- **Industria electroquímica.**

La amplia ventana de potencial electroquímico y la buena conductividad eléctrica (hasta 4 V y  $10 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  respectivamente) de los LI, así como el amplio rango de líquido y la habilidad para la solvatación de compuestos han provocado su uso como electrolitos de baterías, células de combustible, etc. Se ha demostrado [27] que los LI miscibles con agua pueden tener una aplicación importante en campos como la electrocatálisis y la síntesis bioelectroquímica, así como para fabricar electrolitos compuestos de LI/polímero.

- **Cristales líquidos.**

Aunque se han identificado numerosas moléculas termotrópicas, sólo se han estudiado un número limitado de estructuras cristalinas de los LI.

- **Membranas líquidas soportadas (SLM).**

Las SLM son un tipo único de membranas de sólidos porosos impregnadas con líquido. Sin embargo, tienen problemas de pérdidas del líquido por vaporización o disolución que quedan eliminados al usar los LI.

- **Química analítica.**

Los LI han sido utilizados en cromatografía de gases, cromatografía líquida (HPLC) y electroforesis.

- **Plastificantes.**

La necesidad de plastificantes con propiedades térmicas y de volatilidad mejoradas, que puedan ser usados a baja temperatura ha motivado la investigación de los LI en este campo, encontrándose buenos resultados para el PMMA (polimetilmetacrilato).

- **Dispersantes y tensoactivos.**

En general, se han utilizado LI “no-convencionales” como aditivos en la formulación de sistemas de recubrimientos.

- **Biosensores.**

Se ha demostrado recientemente [28] que diversos LI de imidazolio, usados ampliamente en otras aplicaciones, tienen un gran potencial como disolventes

biosensores para sustancias poco solubles en agua como los pesticidas, fungicidas y drogas ilícitas.

- **Combustible para reactores de uso espacial.**

La naturaleza de los LI está siendo investigada [29] para desarrollar nuevos materiales con alta densidad de energía que puedan ser usados como monopropulsores líquidos para cohetes.

- **Mineralogía.**

La síntesis de LI con índices de refracción mayores de 1,4 permite su uso como fluidos de inmersión para el examen de las inclusiones en gemas y minerales.

- **Lubricantes.**

Los LI tienen todas las propiedades que un buen lubricante necesita: baja volatilidad, alta estabilidad térmica, y baja temperatura de fluidez. En el siguiente apartado se hará una revisión de los resultados obtenidos en lubricación con estos materiales.

- **Otras.**

Otras aplicaciones más puntuales de los LI han sido el desarrollo de un termómetro óptico y de una tinta libre de disolventes orgánicos.

Desde 1990, y de forma gradual, las compañías han ido incorporando los LI a sus procesos industriales: en el proceso de cloración y de extracción de ácido de BASF [30]; en procesos de fase líquida de Eastman Chemical; en un proyecto de baterías de Degussa. Sin embargo, la implementación de los LI en la industria tiene aún ciertos *retos*:

- La falta de datos sistemáticos de sus propiedades físicas. Se están realizando esfuerzos para recopilar datos de las distintas familias de LI, así como para desarrollar bases de datos que puedan ser consultadas a la hora de decidir qué LI utilizar para una reacción o aplicación particular.
- Sintetizar LI libres de impurezas como el agua, haluros, plata y otros iones metálicos. Como se ha comentado anteriormente, estas impurezas tienen un gran impacto en sus propiedades físicas.
- Determinar si los LI son de verdad “verdes”: si se degradan con el tiempo, si son potencialmente dañinos a largo plazo, cómo manejar sus residuos, etc. Existen grupos de investigación [31] conjuntos con la industria para determinar los peligros eco-toxicológicos de los LI y proponer una estrategia que considere el ciclo total de vida de estos nuevos materiales. Diversos grupos [26,32,33] trabajan en el reciclaje y tratado de los residuos producidos por los LI.

## **7.5. Propiedades lubricantes de los líquidos iónicos**

### **7.5.1. Introducción**

Los líquidos iónicos poseen características singulares, como su presión de vapor casi inexistente, su bajo punto de fusión, su alta estabilidad térmica, su inflamabilidad y su miscibilidad con los compuestos orgánicos, los hacen un material ideal para su aplicación como lubricantes en campos como la aeronáutica, la electrónica, sistemas de refrigeración y las computadoras.

La estructura dipolar única de los LI podría permitir su fácil adsorción por parte de las superficies en deslizamiento, de modo que se forme una capa límite efectiva. Esta adsorción físico/química de los LI se podría ver reforzada por la existencia de enlaces de hidrógeno con la superficie, de forma que sus propiedades tribológicas se vean mejoradas, sobre todo como lubricantes de TFL y lubricación límite.

Anteriormente se comentó, que existe un régimen de transición entre la lubricación elastohidrodinámica y la lubricación límite que se denomina de película fina o TFL. Uno de los modelos propuestos para explicar este tipo de lubricación es el denominado “Modelo de películas formadas por líquidos ordenados”, modelo que, según lo expuesto más arriba, se puede aplicar a la lubricación por LI.

En este modelo se considera que la capa lubricante se encuentra confinada dentro de un delgado espesor entre dos superficies en movimiento, produciendo que las moléculas del lubricante tiendan a ordenarse durante el proceso de fricción. En estudios realizados sobre LI confinados entre dos paredes paralelas [34], se ha observado como los cationes de la interfase se orientan respecto de la superficie con un cierto ángulo produciéndose una distribución perpendicular de cargas, independientemente del tipo de paredes utilizadas.

Sin embargo, el comportamiento ante la fricción y el desgaste de los LI depende de los materiales utilizados en el contacto tribológico y de las condiciones de deslizamiento.

Entre los LI más estudiados se encuentran las sales de 1-alkil, 3-metilimidazolio. Al comienzo de este trabajo se habían realizado muy escasos estudios en los que se mostraba a estos LI como un prometedor y versátil nuevo tipo de lubricante base.

Los LI han demostrado unos resultados tribológicos excelentes para diversos contactos como el acero/acero, acero/cobre, acero/SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>, acero/sialón.

Al igual que en el resto de propiedades de los LI, es de esperar que tanto la naturaleza del anión como la longitud de la cadena alquilo tengan un efecto significativo en el comportamiento tribológico de los LI. La estructura en redes tridimensionales que se producen en los LI puros y su ordenamiento nanoestructurado cuando se encuentran en disolución, son propiedades que pueden resultar muy útiles en lubricación.

En las siguientes tablas se muestran un resumen de los resultados de los estudios tribológicos que se habían llevado a cabo con anterioridad al comienzo

del presente trabajo usando los LI como lubricantes en estado puro, también se muestra un resumen de las características estructurales de los líquidos iónicos usados y que son derivados del imidazolio.

*Tabla I.1 Designación de los líquidos iónicos derivados de imidazolio*

| X  | R <sub>1</sub>                 | R <sub>2</sub>                 | Nomenclatura                   |         |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|
| BF <sub>4</sub> <sup>-</sup>   | CH <sub>3</sub>                | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>  | L102                           |         |
|  |                                | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> | L106                           |         |
|  |                                | C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> | L108                           |         |
|  | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>  | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> | L206                           |         |
|  |                                | C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> | L208                           |         |
| PF <sub>6</sub> <sup>-</sup>   | CH <sub>3</sub>                | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>  | L-P104                         |         |
|  |                                | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> | L-P106                         |         |
|  |                                | C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> | L-P108                         |         |
|  | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>  | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> | L-P206                         |         |
|  | C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> | L-P208                         |                                |         |
|  | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>  | C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> | L-P308                         |         |
| (CF <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> N <sup>+</sup>               | CH <sub>3</sub>                | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>  | L-Ntf 102                      |         |
|  |                                | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>  | L-Ntf 104                      |         |
| C <sub>10</sub> H <sub>21</sub>  |                                | L-Ntf 110                      |                                |         |
|  | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>  | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> | L-Ntf 206                      |         |
| Br <sup>-</sup>  | CH <sub>3</sub>                | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>  | L-Br104                        |         |
|  |                                | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> | L-Br106                        |         |
| Tosilato   |                                | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>  |                                | L-To102 |
| EtOSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  |                                |                                |                                | L-Es102 |
| Cl <sup>-</sup>  |                                | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>  |                                | L-Cl104 |
| OctilOSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   |                                |                                |                                | L-Os104 |
| (C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> SO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> N <sup>+</sup> |                                |                                | C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> | L-BT108 |
| Me <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>                                 |                                | CH <sub>3</sub>                |                                | L-Dm101 |

Los valores obtenidos en estos estudios [35,36] demuestran que el comportamiento tribológico de los LI supera al de otros lubricantes

El uso de líquidos iónicos [37] muestra un alto rendimiento que los hace muy útiles en multitud de aplicaciones comerciales y tecnológicas. Los líquidos iónicos deben ser adecuados para su uso en entornos de alto vacío, temperaturas extremas, cargas y velocidades elevadas.

Los LI deben ensayarse en condiciones variables. Hay que estudiarlos y garantizar la protección contra la corrosión. Las estrategias seguidas hasta ahora para evitar la corrosión incluyen la utilización de LI reactivos como aditivos, además de aditivos inhibidores de corrosión.

El efecto sinérgico y la estabilización de estas mezclas hacen necesario continuar con las líneas de investigación. Quedan muchas preguntas por responder, pero esto será objeto del esfuerzo de un número creciente de investigadores.

### **7.5.2. Lubricación mediante los LI como aditivos en un aceite sintético**

Para obtener una lubricación efectiva de los aditivos LI en el aceite sintético debe producirse un equilibrio entre la solubilidad del aditivo y su capacidad para ser adsorbido por la superficie en deslizamiento. Es evidente que se necesita un cierto grado de solubilidad entre el aceite base y el aditivo, pero si la disolución de las moléculas de aditivo se produce de forma preferente a su adsorción sobre la superficie metálica, puede producirse una escasez de moléculas capaces de formar capas adsorbidas, no llegándose a conseguir una protección efectiva frente al desgaste.

Se estima que, de la producción total de lubricantes, un 10% son productos sintéticos, y este porcentaje va en aumento. Especialmente interesantes resultan los ésteres derivados de los ácidos dicarboxílicos, por su cualidad de ser respetuosos con el medio ambiente.

Algunos de estos ésteres han dado buenos resultados como lubricantes efectivos en el contacto aluminio-acero en procesos de laminación.

Los átomos de aluminio de la superficie expuesta a la humedad ambiental, se combinan con el oxígeno para formar una capa de óxido. Los lubricantes sintéticos como los alcoholes, ácidos carboxílicos y ésteres, se enlazan fuertemente con los sustratos hidrofílicos a través de enlaces de hidrógeno.

El aceite base sintético propilenglicol dioleato (PGDO) es capaz de ser adsorbido sobre las superficies metálicas a través de sus grupos funcionales.

Se ha comprobado que los grupos alquilo de los lubricantes sintéticos previenen el desgaste al proteger a la superficie de la fricción. Esto puede reducir el valor de fricción pero, si muchas de estas moléculas entran en contacto con la superficie del aluminio, reaccionan formando compuestos que son menos protectores que la capa de óxido.

En este sentido, los aceites sintéticos pueden dar valores de desgaste mayores que los aceites minerales.

Los ésteres son moléculas inherentemente polares. Además, los aditivos polares son los más efectivos en los aceites polares. Se ha demostrado que algunas sales orgánicas son capaces de reducir el desgaste al ser añadidas a ésteres polares, pero provocan reacciones de corrosión, y su estabilidad térmica es demasiado baja para su aplicación práctica.

Sin embargo, el uso de aditivos altamente polares en fluidos base que también poseen una alta polaridad puede llevar a una competencia entre el aceite base y los aditivos por el acceso a las superficies en deslizamiento. Por lo tanto, se hace necesario un estudio preciso de la estructura molecular y de su relación con las propiedades tribológicas al desarrollar nuevos aceites base o aditivos.

### 7.5.3. Antecedentes del efecto de la longitud de cadena de los LI como aditivos

En el presente proyecto se van a realizar ensayos empleando el contacto entre una bola de acero AISI 52100 y tres aleaciones de aluminio 2011, 6061, 7075 en un aceite lubricante PGDO 1429, y utilizando los líquidos iónicos de cadena corta L102 y L-T102 como aditivos al 1% de este lubricante para determinar el comportamiento tribológico de los líquidos iónicos en forma de aditivos en dicho aceite sintético.

Estudios anteriores [38,39] a la realización del proyecto para contactos Al 2011/6061/7075-AISI 52100 bajo la configuración de punzón sobre disco, afirman que los líquidos iónicos de cadena corta como aditivos en aceites sintéticos son mejores que los de cadena larga. En dichos estudios se realizaron las mezclas del aceite sintético PGDO 1429 con cuatro aditivos LI distintos: L102, L106, L-T102 y L-P106.

Como vimos en el “Apartado 7.2”, la polaridad de los LI depende de la longitud de la cadena alquilo y de la naturaleza del anión. Por lo tanto, para un mismo anión, la polaridad del LI decrece al aumentar la longitud de cadena.

Teniendo en cuenta la longitud de cadena, se puede concluir que para los cuatro aditivos el orden de la polaridad molecular sería: L-T102 > L102 > L106 ≈ L-P106

Los resultados experimentales demostraron que la capacidad de los aditivos para reducir el desgaste aumenta al aumentar la polaridad molecular del LI. Así, diremos que las propiedades antidesgaste son mejores para los aditivos con la mayor polaridad, L102 y L-T102., mientras que para los aditivos L106 y L-P106, menos polares, aumentan el desgaste del aluminio con respecto al aceite base sintético puro, debido también a su baja miscibilidad con el éster sintético. Sin embargo, los dos aditivos más polares, el L102 y el L-T102, mejoran la capacidad antidesgaste del aceite base sintético, aunque es preciso tener en cuenta que los aditivos no son totalmente miscibles con el aceite sintético.

Por tanto, los ensayos anteriores [38,39] a este proyecto realizados a temperatura ambiente con el aceite sintético PGDO 1429 afirmaron que los dos aditivos de cadena alquímica corta, L102 y L-T102, son los que dan el menor valor de **desgaste**, tal como se observa en la gráfica:

:

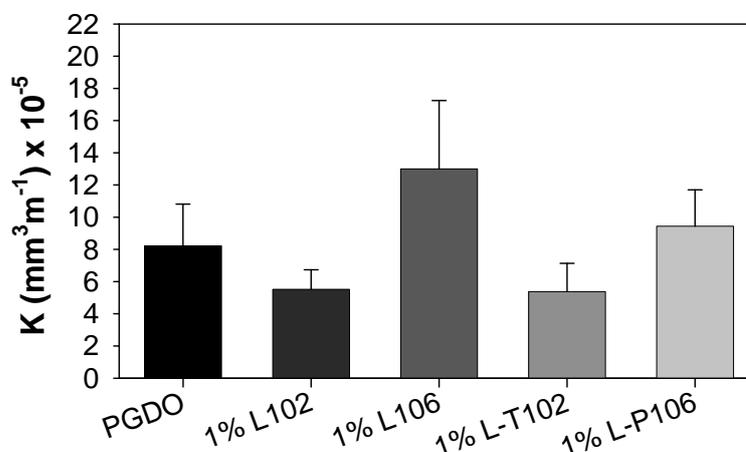


Figura I.7. Coeficientes de desgaste para los LI como aditivos al 1% en aceite sintético

Para el presente trabajo se han seleccionado los aditivos de cadena corta L102 y L- Ntf 102 porque los LIs con el anión  $\text{Tf}_2\text{N}^-$ :  $[(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}^-]$  muestran las mejores características para su uso en lubricación elastohidrodinámica (EHL), a pesar de que su viscosidad es menor. [40]

## 8. El Aluminio [41]

### 8.1. Evolución histórica

Tanto en Grecia como en la Antigua Roma se empleaba el alumbre (del latín *alūmen*, -ñis, alumbre), una sal doble de aluminio y potasio como mordiente en tintorería y astringente en medicina, uso aún en vigor.

El químico danés Hans Christian Oersted aisló el aluminio por primera vez en 1825, por medio de un proceso químico que utilizaba una amalgama de potasio y cloruro de aluminio.

Entre 1827 y 1845, el químico alemán Friedrich Wöhler mejoró el proceso de Oersted utilizando potasio metálico y cloruro de aluminio. Wöhler fue el primero en medir la densidad del aluminio y demostrar su ligereza.

En 1854, Henri Sainte-Claire Deville obtuvo el metal en Francia reduciendo cloruro de aluminio con sodio.

Cuando fue descubierto se encontró que era extremadamente difícil su separación de las rocas de las que formaba parte, por lo que durante un tiempo fue considerado un metal precioso, más caro que el oro.

A mitad del siglo XIX, se obtuvieron en Francia pequeñas cantidades de aluminio por reducción de cloruro aluminico-sódico con sodio, procedimiento desarrollado por Saint-Claire Deville basándose en los trabajos de Oersted y Wöhler. Se exhibieron barras de aluminio junto con las joyas de la corona de Francia en la Exposición Universal de 1855 y se dijo que Napoleón III había encargado un juego de platos de aluminio para sus más ilustres invitados.

En 1882 el aluminio era considerado un metal de asombrosa rareza del que se producían en todo el mundo menos de 2 toneladas anuales. En 1884 se seleccionó el aluminio como material para realizar el vértice del Monumento a Washington, en una época en que la onza (30 gramos) costaba el equivalente al sueldo diario de los obreros que intervenían en el proyecto; tenía el mismo valor que la plata.

Sin embargo, con las mejoras de los procesos los precios bajaron continuamente hasta colapsarse en 1889 tras descubrirse un método sencillo de extracción del metal aluminio. La invención de la dinamo por Siemens en 1866 proporcionó la técnica adecuada para producir la electrólisis del aluminio.

La invención del proceso Hall-Héroult en 1886 (patentado independientemente por Héroult en Francia y Hall en EE.UU.) abarató el proceso de extracción del aluminio a partir del mineral, lo que permitió, junto con el proceso Bayer (inventado al año siguiente, y que permite la obtención de óxido de aluminio puro a partir de la bauxita), que se extendiera su uso hasta hacerse común en multitud de aplicaciones.

Sus aplicaciones industriales son relativamente recientes, produciéndose a escala industrial desde finales del siglo XIX. Ello permitió que el aluminio pasara a ser un metal común y familiar.

Para 1895 su uso como material de construcción estaba tan extendido que había llegado a Sídney, Australia, donde se utilizó en la cúpula del Edificio de la Secretaría.

La producción mundial alcanzó las 6.700 toneladas hacia 1900, 700.000 en 1939 y en 1943 llegó a los dos millones debido al impulso de la II Guerra Mundial.

Desde entonces la producción se ha disparado hasta superar la de todos los demás metales no féreos.

Actualmente el proceso ordinario de obtención del metal consta de dos etapas, la obtención de alúmina por el proceso Bayer a partir de la bauxita, y posterior electrólisis del óxido para obtener el aluminio.

La recuperación del metal a partir de la chatarra, material viejo o deshecho (reciclado) era una práctica conocida desde principios del siglo XX. Sin embargo, es a partir de los años 1960 cuando se generaliza, más por razones medioambientales que estrictamente económicas, ya que el reciclaje consume el 5% de lo que consume la producción metalúrgica a partir del mineral.

## 8.2. Aleaciones de Aluminio

La evolución técnica continúa experimentando y aplicando nuevas aleaciones de aluminio, entre ellas las más corrientes son las que tienen como componentes principales el cobre y el silicio, cada una de las cuales le incluyen características particulares. Aleado con el cobre, éste le disminuye el inicio del punto de fusión, produciéndose a partir de los 530°C, pero aumenta la resistencia a la rotura y su límite elástico, tiene el inconveniente de reducir su resistencia a los agentes atmosféricos aumentando su fragilidad.

Los principales elementos aleantes del Aluminio son los siguientes y se enumeran las ventajas que proporcionan:

- *Cromo (Cr)*: Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos Cu, Mn, Mg.
- *Cobre (Cu)*: Incrementa las propiedades mecánicas pero reduce la resistencia a la corrosión.
- *Hierro (Fe)*: Incrementa la resistencia mecánica.
- *Magnesio (Mg)*: Tiene alta resistencia tras el conformado en frío.
- *Silicio (Si)*: Combinado con magnesio (Mg), tiene mayor resistencia mecánica.
- *Manganeso (Mn)*: Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.
- *Titanio (Ti)*: Aumenta la resistencia mecánica.
- *Zinc (Zn)*: Reduce la resistencia a la corrosión.

### 8.3. Tipos de aleaciones normalizadas

Las aleaciones de aluminio forjado se dividen en dos grandes grupos, las que no reciben tratamiento térmico y las que reciben tratamiento térmico.

#### 8.3.1. Aleaciones de Aluminio forjado sin tratamiento térmico

Las aleaciones que no reciben tratamiento térmico solamente pueden ser trabajadas en frío para aumentar su resistencia. Hay tres grupos principales de estas aleaciones según la norma AISI-SAE que son los siguientes:

- **Aleaciones 1XXX.** Son aleaciones de aluminio técnicamente puro, al 99,9% siendo sus principales impurezas el hierro y el silicio como elemento aleante. Se les aporta un 0.12% de cobre para aumentar su resistencia. Tienen una resistencia aproximada de 90 MPa. Se utilizan principalmente par trabajos de laminados en frío.
- **Aleaciones 3XXX** El elemento aleante principal de este grupo de aleaciones es el manganeso (Mn) que está presente en un 1,2% y tiene como objetivo reforzar al aluminio. Tienen una resistencia aproximada de 16 kpsi (110 MPa) en condiciones de recocido. Se utilizan en componentes que exijan buena mecanibilidad.
- **Aleaciones 5XXX.** En este grupo de aleaciones el magnesio es el principal componente aleante su aporte varía del 2 al 5%. Esta aleación se utiliza para conseguir reforzamiento en solución sólida. Tiene una resistencia aproximada de 28 kpsi (193 MPa) en condiciones de recocido.

#### 8.3.2 Aleaciones de Aluminio forjado con tratamiento térmico

Algunas aleaciones pueden reforzarse mediante tratamiento térmico en un proceso de precipitación. El nivel de tratamiento térmico de una aleación se representa mediante la letra T seguida de un número por ejemplo T5. Hay tres grupos principales de este tipo de aleaciones.

- **Aleaciones 2XXX:** El principal aleante de este grupo de aleaciones es el cobre (Cu), aunque también contienen magnesio Mg. Estas aleaciones con un tratamiento T6 tiene una resistencia a la tracción aproximada de 64 kpsi (442 MPa) y se utiliza en la fabricación de estructuras de aviones. Algunas de estas aleaciones se denominan duraluminio.

En este proyecto hemos usado probetas de Al 2011

Las aleaciones de Al2011 son de fácil mecanización, se puede trabajar con altas velocidades en todo tipo de piezas de coletaje como racores de conexión rápida, manguitos, bridas, arandelas, tornillos, poleas, pistones, cilindros, neumáticos, tapones, etc.

- **Aleaciones 6XXX.** Los principales elementos aleantes de este grupo son magnesio y silicio. Con unas condiciones de tratamiento térmico T6

alcanza una resistencia a la tracción de 42 kpsi (290 MPa) y es utilizada para perfiles y estructuras en general.

En este proyecto hemos usado probetas de Al 6061, que se aplican mucho en moldes para industrias del calzado, en moldes de botellas de plástico por soplado, moldes termo conformados, moldes en la industria del caucho; además de su importante uso en la construcción de maquinaria industrial, armamento, blindaje y en los sectores de automoción.

- **Aleaciones 7XXX.** Los principales aleantes de este grupo de aleaciones son cinc, magnesio y cobre. Con un tratamiento T6 tiene una resistencia a la tracción aproximada de 73 kpsi (504 MPa) y se utiliza para fabricar estructuras de aviones

En este proyecto hemos usado probetas de Al 7075, que se trata de la aleación de características más elevadas dentro de los aluminios. El desarrollo de esta aleación ha hecho posible su utilización en campos hasta ahora reservados a los aceros, aplicándose en armamento, industria del automóvil, tornillería, bastones de esquí, cañas de pesca, flechas, etc...

#### 8.4. El uso de Aluminio en automóviles

El aumento del uso de aluminio en los nuevos automóviles europeos reduce el peso, el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>

Se ha demostrado [42] que la cantidad de aluminio utilizado en los nuevos automóviles europeos ha aumentado, pasando de la media de 50 kilos utilizados en 1990 a los 132 kilos utilizados en 2005, y está previsto que esta cifra crezca en otros 25 kilos en el año 2010. En 2005 se instalaron dos millones de toneladas de componentes de aluminio en las carreteras europeas, gracias a su utilización en nuevos vehículos destinados al transporte de pasajeros. El ahorro de peso conseguido servirá para conseguir un ahorro anual cifrado en 1.000 millones de litros de combustible, consiguiendo también una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> por valor de 40 millones de toneladas durante la vida útil de los vehículos.

En la carrocería del automóvil, la mayor cantidad de componentes realizados en aluminio son los sistemas de aire acondicionado, capó, travesaños de los parachoques y columnas de la dirección. Las partes de aluminio de la sección del chasis y la suspensión de los automóviles son principalmente las llantas, brazos de la suspensión y componentes de la dirección. La culata de cilindros, los bloques de cilindros, las tapas de los motores, bombas y radiadores representan la mayoría de los componentes de aluminio del sistema mecánico de los nuevos automóviles.

En la actualidad, la cada vez mayor cantidad de aluminio se ha utilizado sobre todo en los cierres, estructura de la carrocería y aplicaciones en el chasis, mejorando a su vez la seguridad y rendimiento.

Cada 100 kilos de aluminio empleado en un automóvil sirve para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> por kilómetro en unos 9 gramos, incluso en 10 gramos si se tiene en

cuenta la producción de combustible, por lo que el aluminio se ha convertido en un material para reducir el peso de los vehículos que cuenta con una destacada ventaja.

Gracias a la introducción continuada de las nuevas tecnologías, que proporcionan ventajas superiores en lo que respecta al diseño y procesos de fabricación, la tendencia a aumentar la integración del aluminio en los automóviles continuará. El aluminio desarrollará un papel importante en las generaciones futuras de vehículos sostenibles

## **9. Objetivos**

El presente proyecto muestra los resultados obtenidos en ensayos en seco y utilizando por una parte el aceite sintético puro PGDO 1429, y por otra parte, éste mismo con los aditivos líquidos iónicos L102, L-Ntf102 en contacto con diversas aleaciones de aluminio (Al 2011, Al 6061, Al 7075), continuando así una de las líneas de investigación del Departamento de Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Los objetivos que se pretenden alcanzar en el desarrollo de este proyecto son los siguientes:

- Selección y desarrollo de aditivos basados en líquidos iónicos para lubricantes sintéticos
- Estudiar la fricción y el desgaste del contacto Aluminio-Acero para diversas aleaciones de aluminio
- Estudiar el comportamiento tribológico de los líquidos iónicos de cadena corta como aditivos
- Determinar los mecanismos de desgaste y los procesos triboquímicos en los contactos en deslizamiento lineal alternativo.

# **CAPÍTULO II**

---

**MATERIALES,**

**MÁQUINAS**

**Y**

**PROCEDIMIENTO**

**EXPERIMENTAL**

## 1. Materiales utilizados en la experimentación

### 1.1. Aleaciones de aluminio

En este proyecto se han realizado *ensayos de fricción y desgaste* en seco y lubricados, con el fin de determinar el comportamiento de los líquidos iónicos en el aceite sintético PGDO 1429.

Para ello se ha empleado el contacto entre una bola de acero AISI 52100 y probetas de tres aleaciones de aluminio (2011 T3, 6061 T6 y 7075 T6) en un aceite lubricante PGDO 1429, y utilizando los líquidos iónicos L102 y L-Ntf102 como aditivos al 1% de este lubricante sintético. De esta forma se pretende determinar el comportamiento tribológico de los líquidos iónicos en forma de aditivos en dicho aceite sintético.

A continuación se describen los materiales utilizados en estos ensayos de fricción y desgaste.

Se han utilizado tres aleaciones de aluminio, todas ellas suministradas por la empresa Alu-Stock.

#### 1.1.1. Aluminio 2011 T3

Se parte de una barra redonda trefilada de 40 mm de diámetro de aleación de aluminio 2011.

- **Composición Química**

La composición química del aluminio, que puede obtenerse mediante espectrometría de emisión de chispa con el analizador SPECTRO MAXx, da lugar a:

Tabla II.1. Composición química del Aluminio 2011

| Análisis Químico | Elementos (%) |      |      |      |      |      |      |      |       |
|------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                  | Si            | Fe   | Cu   | Mn   | Zn   | Pb   | Mg   | Bi   | Al    |
| Fabricante       | 0,14          | 0,60 | 5,74 | 0,04 | 0,03 | 0,31 | 0,01 | 0,53 | Resto |
| SPECTRO MAXx     | 0,15          | 0,43 | 5,60 | 0,04 | 0,08 | 0,52 | 0,01 | 0,44 | Resto |

*Estado T3:* Temple, deformación en frío y maduración natural.

*Estructura:* Partículas de  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$  y  $\text{CuAl}_2$  insertas en la matriz de Al (ver Figura II.1).

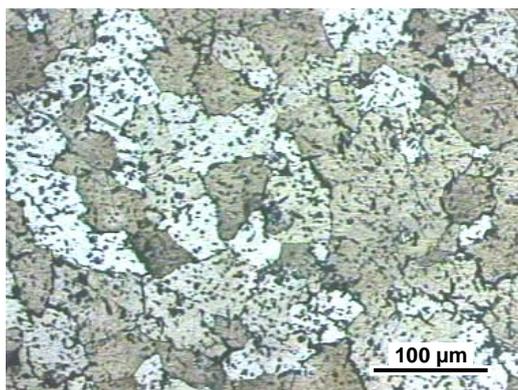


Figura II.1. Microestructura del Al 2011 T3.

- **Propiedades Mecánicas**

Las propiedades a tracción, así como la dureza de la aleación Al 2011 a temperatura ambiente, vienen reflejadas en la tabla mostrada a continuación.

Tabla II.2. Propiedades mecánicas del Al 2011

| Tratamiento | Resistencia a Tracción (MPa) | Límite Elástico (MPa) | Elongación (%) | Dureza HV |
|-------------|------------------------------|-----------------------|----------------|-----------|
| T3          | 373,3                        | 305,9                 | 18,3           | 115       |

*Coefficiente de Poisson:* 0,33 a 20 °C.

*Módulo Elástico:* A tracción, 70 GPa; A cortadura, 26 GPa.

*Resistencia a fatiga:* 124 MPa (para 5·10<sup>8</sup> ciclos).

- **Propiedades físicas**

*Densidad a 20 °C:* 2,82 g/cm<sup>3</sup>.

- **Propiedades térmicas**

*Temperatura de “liquidus”:* 638 °C.

*Temperatura de “solidus”:* 541 °C.

*Temperatura de fusión incipiente:* 535 °C.

*Coefficiente de expansión térmica lineal:* 23,1 µm/mK a 20 °C.

*Coefficiente de expansión térmica volumétrico:* 67·10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>K.

*Calor específico:* 864 J/KgK a 20 °C.

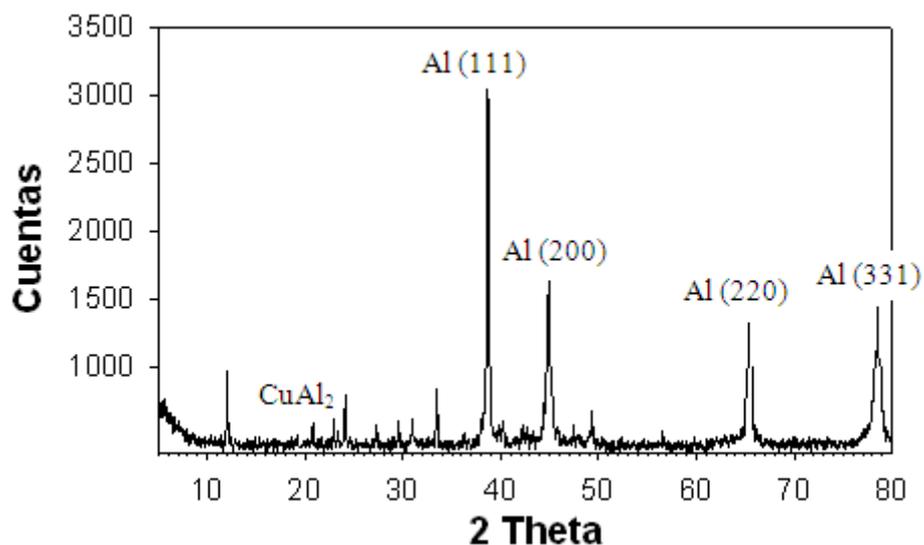
*Conductividad térmica:* 173 W/mK a 20 °C.

- **Propiedades eléctricas**

*Conductividad eléctrica a 20 °C: 39% IACS.*

*Resistividad eléctrica a 20 °C: 44 nΩm.*

- **Difracción de rayos X**



*Figura II.2. Difractograma del Al 2011 T3.*

### 1.1.2. Aluminio 6061 T6

Se parte de una chapa laminada cuadrada de 400 x 400 mm y 20 mm de espesor de aleación 6061.

- **Composición Química**

*Tabla II.3. Composición química del Aluminio 6061*

| Análisis Químico | Elementos (%) |      |      |      |      |      |      |      |       |
|------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                  | Si            | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Zn   | Ti   | Cr   | Al    |
| Fabricante       | 0,69          | 0,40 | 0,28 | 0,11 | 0,90 | 0,18 | 0,04 | 0,06 | Resto |
| SPECTRO MAXx     | 0,81          | 0,39 | 0,29 | 0,11 | 0,84 | 0,16 | 0,04 | 0,07 | Resto |

*Estado T6:* Temple, deformación en frío y maduración artificial.

*Estructura:* Partículas de Mg<sub>2</sub>Si en la matriz de Al (ver Figura II.3).

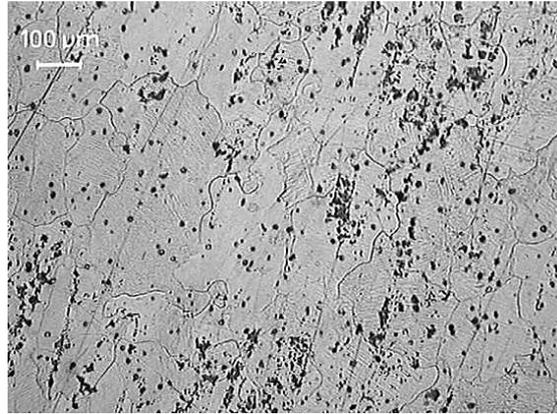


Figura II.3. Microestructura del Al 6061 T6.

- **Propiedades Mecánicas**

Las propiedades a tracción y la dureza para la aleación de Al 6061 T6 a temperatura ambiente, son reflejadas en la Tabla II.4.

Tabla II.4. Propiedades mecánicas del Al 6061 T6

| Tratamiento | Resistencia a Tracción (MPa) | Límite Elástico (MPa) | Elongación (%) | Dureza HV |
|-------------|------------------------------|-----------------------|----------------|-----------|
| T6          | 319                          | 293                   | 11,8           | 110       |

*Coefficiente de Poisson:* 0,33 a 20 °C.

*Módulo Elástico:* A tracción, 70 GPa; A cortadura, 26 GPa.

*Resistencia a fatiga:* 120 MPa (para 107 ciclos).

- **Propiedades físicas**

*Densidad a 20 °C:* 2,70 g/cm<sup>3</sup>.

- **Propiedades térmicas**

*Temperatura de “liquidus”:* 650 °C.

*Temperatura de “solidus”:* 580 °C.

*Temperatura de fusión incipiente:* 580 °C.

*Coefficiente de expansión térmica lineal:* 23,3 µm/mK a 20 °C.

*Calor específico a 20 °C:* 896 J/KgK.

*Conductividad térmica a 20 °C:* 167 W/mK.

- **Propiedades eléctricas**

Conductividad eléctrica a 20 °C: 43% IACS.

Resistividad eléctrica a 20 °C: 40 nΩm.

- **Difracción de rayos X**

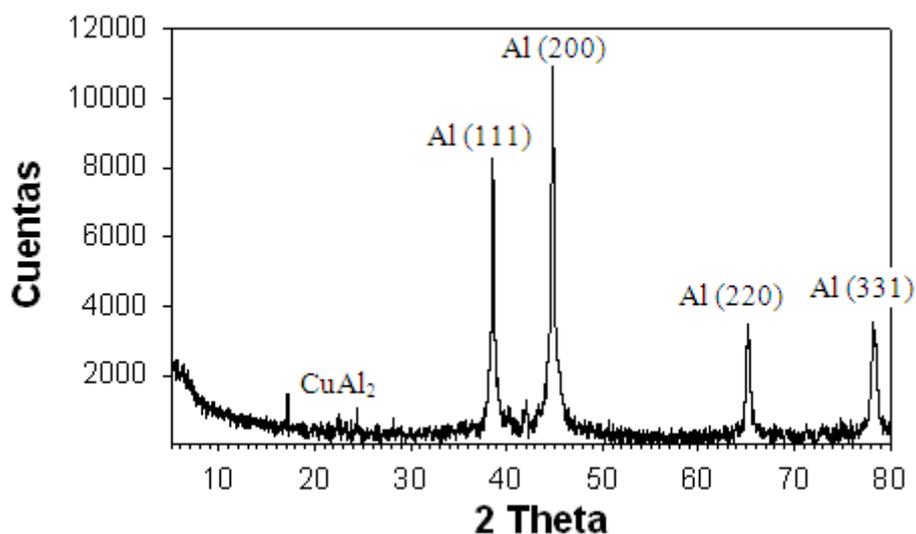


Figura II.4. Difractograma del Al 6061 T6.

### 1.1.3. Aluminio 7075 T6

Se parte de una barra redonda trefilada de 40 mm de diámetro de aleación de aluminio 7075.

- **Composición Química**

Tabla II.5. Composición química del Aluminio 7075

| Análisis Químico | Elementos (%) |      |      |      |      |      |      |      |       |
|------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                  | Si            | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Zn   | Ti   | Cr   | Al    |
| Fabricante       | 0,21          | 0,40 | 1,38 | 0,17 | 2,29 | 5,67 | 0,06 | 0,18 | Resto |
| SPECTRO MAXx     | 0,27          | 0,46 | 1,49 | 0,19 | 2,25 | 5,51 | 0,06 | 0,19 | Resto |

*Estado T6:* Temple, deformación en frío y maduración artificial.

*Estructura:* Partículas de Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe, Mg<sub>2</sub>Si y CuAl<sub>2</sub> en la matriz de Al (ver Figura II.5).

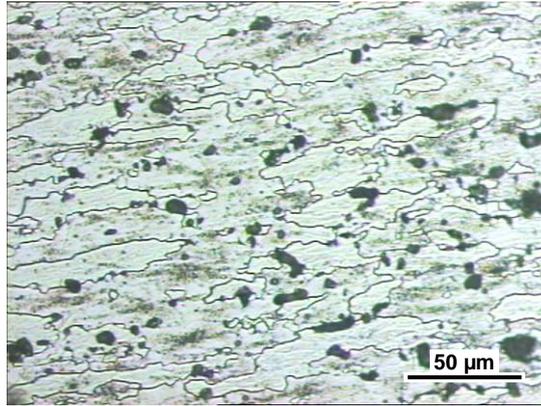


Figura II.5. Microestructura del Al 7075 T6.

- **Propiedades Mecánicas**

Las propiedades a tracción y la dureza para la aleación de Al 7075 T6 a temperatura ambiente, son reflejadas en la siguiente tabla.

Tabla II.6. Propiedades mecánicas del Al 7075 T6

| Tratamiento | Resistencia a Tracción (MPa) | Límite Elástico (MPa) | Elongación (%) | Dureza HV |
|-------------|------------------------------|-----------------------|----------------|-----------|
| T6          | 618,2                        | 576,3                 | 7,16           | 160       |

Coefficiente de Poisson a 20 °C: 0,33.

Módulo Elástico: A tracción, 70 GPa; A cortadura, 26 GPa.

Resistencia a fatiga: 160 MPa (para 107 ciclos).

- **Propiedades físicas**

Densidad a 20 °C: 2,70 g/cm<sup>3</sup>.

- **Propiedades térmicas**

Temperatura de “liquidus”: 635 °C.

Temperatura de “solidus”: 475 °C.

Temperatura de fusión incipiente: 475 °C.

Coefficiente de expansión térmica lineal a 20 °C: 23,5 µm/mK.

Calor específico a 20 °C: 946 J/KgK.

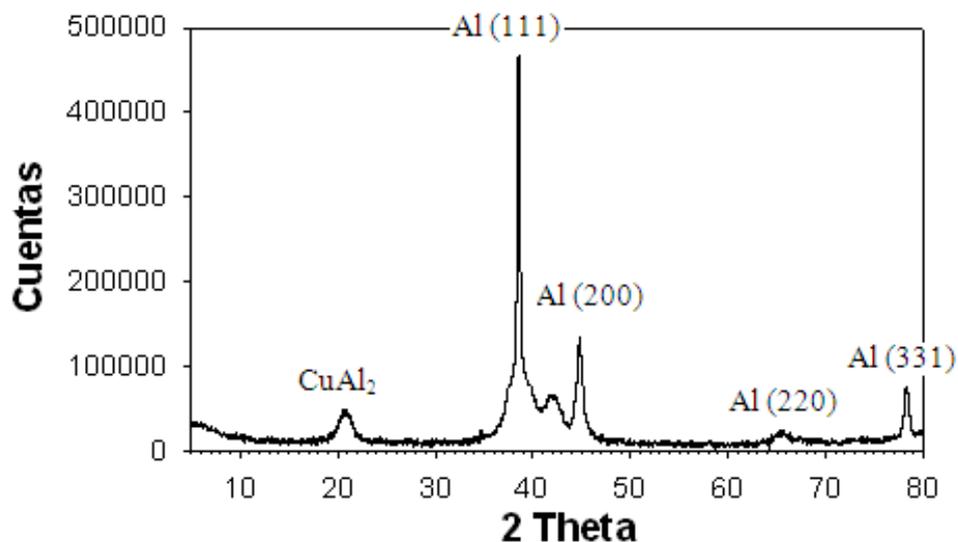
Conductividad térmica a 20 °C: 134 W/mK.

- **Propiedades eléctricas**

Conductividad eléctrica a 20 °C: 33% IACS.

Resistividad eléctrica a 20 °C: 52 nΩm.

- **Difracción de rayos X**



*Figura II.6. Difractograma del Al 7075 T6.*

Los valores más pequeños de desgaste se dan para el Al 7075, que es la aleación más dura ya que presenta el mayor valor de resistencia a la tracción.

## **1.2. Punzón de acero**

En el punzón de los ensayos punzón sobre disco (Figura II.7) se colocaron bolas de acero AISI 52100 templado, con un diámetro de 8 mm.

Las bolas de acero son suministradas por la empresa Tecmicro.



*Figura II.7. Punzón con bola de acero.*

### 1.3. Lubricante sintético PGDO 1429

El lubricante base sintético utilizado es el Priolube 1429, cedido por la empresa Uniqema Chemicals Limited para la realización de los ensayos. Es un lubricante de la familia de los polioliéster, concretamente el propilenglicol dioleato (PGDO).

Sus características y propiedades principales se muestran en la siguiente Tabla II.7.

Tabla II.7. Características del lubricante sintético

| Características                                | Valores |
|--|---------|
| Valor ácido (mgKOH/g)                          | 1,5     |
| Valor de Yoduros (g/100g)                      | 79      |
| Valor de saponificación (mgKOH/g)              | 188     |
| Valor de Hidróxidos (mgKOH/g)                  | 8       |
| Punto de derrame (°C)                          | -6      |
| Color Lovibond 1" amarillo                     | 1,4     |
| Color Lovibond 1" rojo                         | 0,3     |
| Punto de ebullición (°C)                       | >200    |
| Punto Flash, COC (°C)                          | 270     |
| Presión de vapor a 20 °C (hPa)                 | <1      |
| Densidad a 20 °C (Kg/m <sup>3</sup> )          | 900     |
| Coefficiente de partición (log Pow)            | >3      |
| Viscosidad a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)        | 22      |
| Viscosidad a 100 °C (mm <sup>2</sup> /s)       | 9       |
| Índice de viscosidad                           | 163     |
| LC <sub>50</sub> con pescado (mg/l)            | >100    |
| EC <sub>50</sub> con Pseudomonas putida (mg/l) | >100    |
| Biodegradabilidad, CEC L-33-A-93 (%)           | 99      |

### 1.4. Líquidos Iónicos

Se han utilizado dos LI derivados de imidazolio, todos ellos suministrados por Solvionic.

Los datos reflejados como "propiedades físicas" corresponden a los suministrados por el fabricante de los LI, que en algunos casos han sido completados con los recogidos en la bibliografía.

### 1.4.1. L102

Como L102 se denomina al líquido iónico tetrafluoroborato de 1-etil, 3-metilimidazolio, cuya estructura química se muestra en la Figura 2.12. Es un líquido iónico de cadena corta, con flúor y boro en el anión.

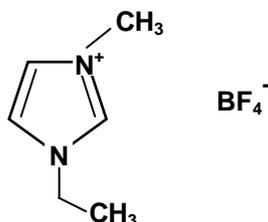


Figura II.8. Estructura molecular del L102.

- **Propiedades físicas**

*Pureza:* 99%.

*Punto de fusión:* 15 °C.

*Temperatura de descomposición:* 460 °C.

*Densidad (20 °C):* 1,294 g/cm<sup>3</sup>.

*Viscosidad (20 °C):* 113,20 mm<sup>2</sup>/s.

Al igual que para el resto de LI utilizados, la calidad del L102 puro suministrado por Solvionic es de una pureza  $\geq 99\%$ .

### 1.4.2. L-Ntf102

Denominamos L-Ntf102 al Bis (trifluorometanosulfonyl) imida de 1-etil-3-metilimidazolio (ver Figura II.9).

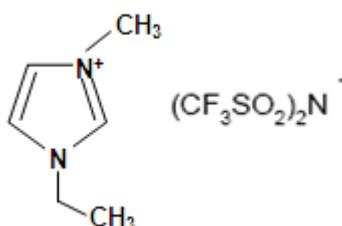


Figura II.9. Estructura molecular del L-Ntf102.

- **Propiedades físicas**

*Pureza:* 99,5%.

*Punto de fusión:* -16 °C.

*Temperatura de descomposición:* 455 °C.

*Densidad (20 °C):* 1,52 g/cm<sup>3</sup>.

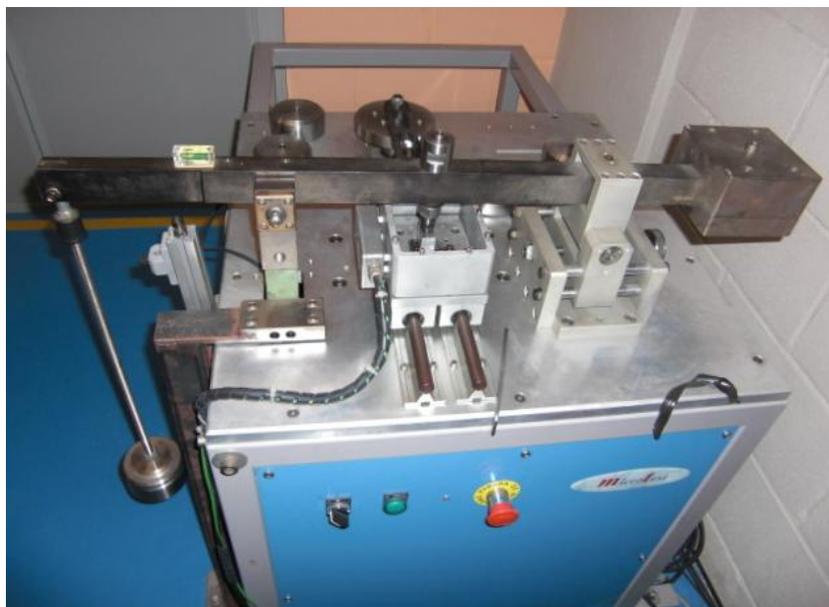
*Viscosidad (20 °C):* 139,3 mm<sup>2</sup>/s.

## 2. Equipos utilizados en la experimentación

### 2.1. Tribómetro

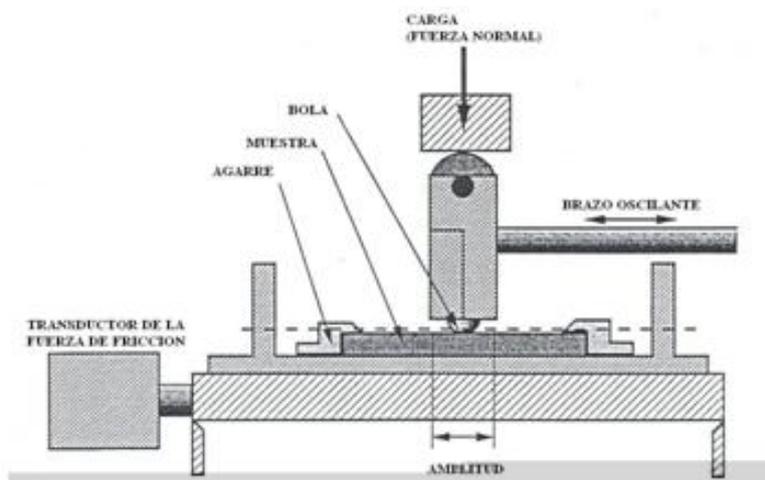
Los estudios tribológicos se han realizado en el tribómetro modelo MT/30/SCM/T (Figura II.10), fabricado por Microtest, de acuerdo con la norma ASTM G133-05.

Los datos de los ensayos de fricción y desgaste se registran en tiempo real mediante el programa informático MT4001 acoplado al tribómetro. Este programa permite exportar los resultados a ficheros Excel y ASCII.



*Figura II.10. Tribómetro Microtest*

El tribómetro realiza un movimiento lineal alternativo, como se muestra:



*Figura II.11. Esquema tipo bola sobre plano con deslizamiento oscilatorio.*

## **2.2. Cortadora de precisión**

El corte de las probetas de aluminio se ha llevado a cabo con una cortadora de la casa BUEHLER (ver Figura II.12).



*Figura II.12. Cortadora de precisión.*

## **2.3. Pulidora metalográfica**

Para el pulido de las probetas se ha utilizado una pulidora de la casa Buehler, modelo Phoenix Beta como la que se muestra en la Figura II.13.



*Figura II.13. Pulidora metalográfica.*

## **2.4. Rugosímetro**

Sus características principales son:

- Sistema de medida inductivo diferencial.
- Posibilidad de colocar el palpador a 90°.
- Ajuste fino de recorrido vertical: 100 mm.
- Normas DIN, ISO y CNOMO.
- Cut off: 0,08; 0,25; 0,8; 1,25; 2,5 mm.
- Recorridos: Máx. 100 mm, Mín. 1 mm.
- Rango vertical, sin patín: 1 mm.
- Resolución: 0,001  $\mu\text{m}$ .



*Figura II.14. Rugosímetro.*

## **2.5. Perfilómetro**

Para la medición de los perfiles de las huellas de desgaste de las probetas de Al se ha usado el perfilómetro TALYSURF CLI 500.

La técnica utilizada por el perfilómetro confocal (CLA) se deduce a través de la altura de la superficie mediante el uso de una técnica que se centra en la aberración de la luz blanca en los elementos a diferentes alturas.

Un haz de luz blanca se concentra en una superficie blanca a través de una lente con una aberración de la medida de la longitud cromática. Debido a esta aberración, el punto de enfoque está en una posición diferente para distintas longitudes de onda. La luz reflejada es enviada a un espectrómetro, que proporciona una curva que depende de las longitudes de onda.

Las características del equipo se detallan a continuación:

- Longitud de recorrido: 100 mm x 50 mm x 50 mm
- Peso máximo de la muestra: 10 kg.
- Dimensiones máximas de la muestra: 50/100/200 mm x 50 mm x 50 mm.

- Alcance del foco: 1000  $\mu\text{m}$
- Dimensiones máximas de la muestra: 50/100/200 mm x 50 mm x 50 mm.
- Distancia de trabajo: 10 mm.
- Nivel de ruido: 18 nm.
- Diámetro del punto: 14  $\mu\text{m}$
- Límite de la pendiente en superficies reflectantes:  $\pm 30^\circ$



*Figura II.15. Perfilómetro.*

## **2.6. Microscopía óptica**

Para el estudio morfológico y metalográfico de los materiales sometidos a fricción y desgaste se ha utilizado el microscopio óptico Leica DMR (ver Figura II.16). Este microscopio lleva acoplado un analizador de imagen que utiliza el software Óptimas.



*Figura II.16. Microscopio óptico Leica DMR.*

## **2.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La microscopía electrónica de barrido es una técnica instrumental que encuentra gran cantidad de aplicaciones en diversos campos de la ciencia y la tecnología.

El equipo utilizado ha sido el microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3500N (ver Figura II.17)

El equipo está configurado para obtener imágenes tanto en alto vacío como en presión variable. Así mismo, está capacitado para obtener buenos resultados a bajo voltaje, lo que permite en algunos casos (ciertas muestras biológicas, polímeros, aleaciones ligeras,...) evitar el pretratamiento de las muestras. Dispone de un sistema criogénico para la preparación y acondicionamiento de muestras, especialmente las biológicas, lo que constituye una alternativa a los métodos de preparación tradicionales.

La instalación cuenta con diversa instrumentación para llevar a cabo las sucesivas etapas para la preparación, observación y evaluación final de las muestras. Consta de los siguientes elementos:

- Cañón de electrones con un voltaje acelerador de 0,5 a 30 kV, ajustable por pasos.
- Fuente de electrones con filamento de W, polarización automática y alineamiento electrónico del cañón.
- Sistema de lentes con supresión de histéresis. Corriente de sonda con ajuste manual o automático, ajustable de 1 pA a 1 mA. Corrección de astigmatismo manual y electrónica.
- Movimientos motorizados en los ejes X e Y.
- Resolución de imagen de electrones secundarios de al menos 3,0 nm, en modo de alto vacío.
- Resolución de imagen de electrones retrodispersados de al menos 5,0 nm, en modo de presión variable. Este detector trabaja en modo composicional o topográfico.
- Rango de magnificación desde 18x hasta 300.000x, en más de 60 etapas.
- Cámara infrarroja
- Sistema de vacío con control de evacuación, provisto de una bomba difusora y dos bombas rotatorias.
- Enfoque manual y automático con ajuste grueso y fino. Rastreo automático del foco.
- Detectores:
  - Secundarios.
  - Retrodispersados en modo composición y topográfico.



*Figura II.17. Microscopio electrónico de barrido.*

El equipo lleva acoplados un microanalizador por dispersión de energía de rayos X (EDS), como el detector de rayos X Xflash.

Este analizador nos permite la realización de mapas elementales, perfiles de distribución y cálculo semicuantitativo de la composición elemental en un punto, en un área o en toda la imagen. La profundidad de este análisis realizados mediante EDS varía entre 1 y 2  $\mu\text{m}$ , aumentando al disminuir el número atómico de la muestra.

### 3. Ensayos de fricción y desgaste

#### 3.1. Procedimiento experimental

El proceso experimental seguido se resume en el diagrama de flujo de la Figura II.18.

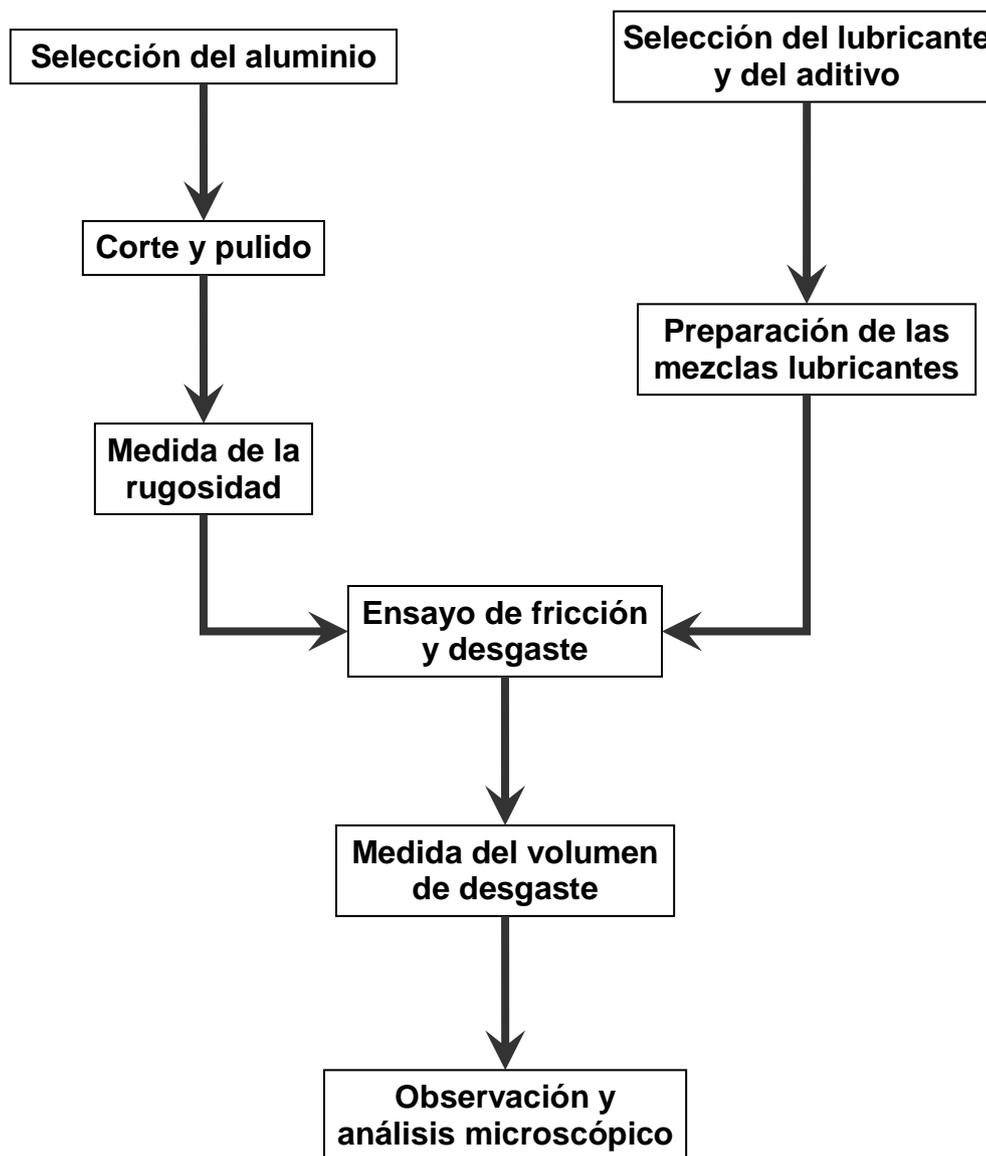


Figura II.18. Procedimiento experimental seguido en los ensayos.

### **3.2. Preparación de las probetas de aluminio.**

Partimos de barras de aluminio ASTM 2011, 6061, 7075 que se cortan hasta obtener la forma de un prisma rectangular (Figura II.19).



*Figura II.19. Dimensiones de las probetas de aluminio*

### **3.3. Medida de la rugosidad**

Se pule la superficie de las probetas hasta conseguir una rugosidad media Ra menor de  $0,2 \mu\text{m}$ . Para conseguir esta rugosidad se han utilizado discos de carburo de silicio de granulometrías: 280, 400, 600, 1200 y 4000. El tiempo empleado con cada disco es de 3 minutos con una fuerza de 30 N.

Una vez preparadas las probetas de aluminio, se tomaron los valores de rugosidad media (Ra) y máxima (Rmax). De acuerdo con la norma DIN 4768 se han realizado medidas en tres direcciones distintas.

### **3.4. Presión de contacto**

Teniendo en cuenta la configuración del contacto de punzón sobre disco, la presión de contacto se puede calcular aplicando la expresión de Hertz para el caso de una esfera sobre una superficie plana. Para una bola de acero de diámetro igual a 8 mm., se obtiene para la carga normal que le aplicamos de 80 N una presión de contacto de 1 GPa.

### **3.5. Medida de los coeficientes de fricción**

Los datos de fricción se registran en tiempo real mediante el programa informático que acompaña al tribómetro, proporcionando las gráficas de fricción-distancia y fricción-tiempo para cada uno de los ensayos realizados.

### 3.6. Medida del volumen de desgaste

El volumen de desgaste se ha obtenido directamente con el perfilómetro óptico.

El perfilómetro calcula la cantidad de materia que se elimina de la probeta al deslizarse el punzón de acero en la probeta de aluminio, que se conoce como valor “hueco”.

También calcula la cantidad de materia que se acumula en los bordes de la huella, que se conoce como valor “pico”.

Finalmente, el desgaste obtenido es la diferencia entre estos dos valores, es decir, el valor hueco menos el valor pico.

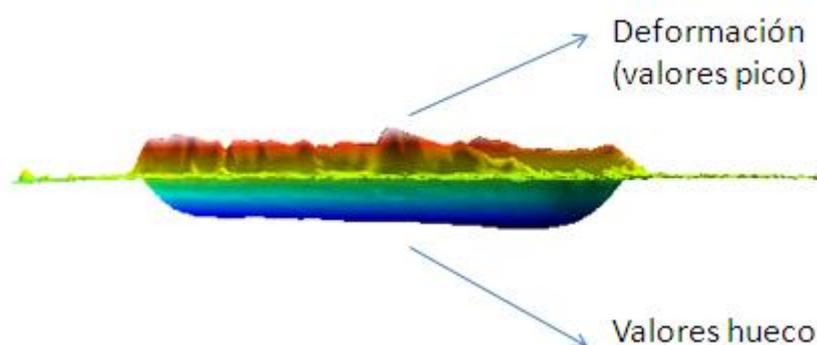


Figura II.20. Desgaste tridimensional de una huella típica

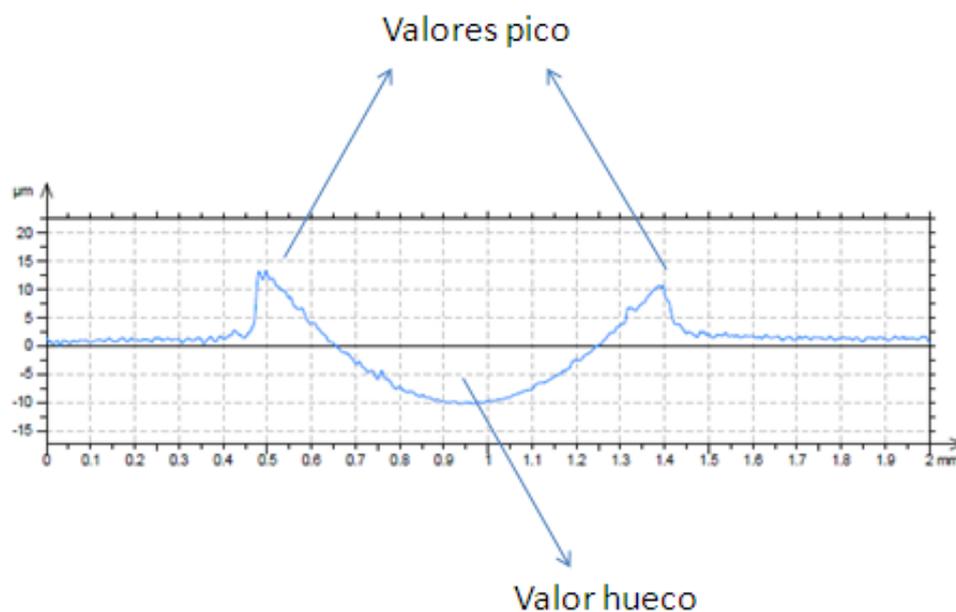


Figura II.21. Perfil típico de una huella de desgaste

### 3.7. Ensayos de fricción y desgaste en seco

Para la realización de los ensayos de fricción y desgaste se sitúa la probeta en el tribómetro previamente calibrado y se da comienzo al ensayo.

Los ensayos de fricción y desgaste los realizamos a temperatura ambiente con carga y velocidad constantes

Los ensayos se llevaron a cabo con los siguientes parámetros:

- Punzón de acero: AISI 52100 de 8 mm de diámetro.
- Distancia del brazo: 370 mm.
- Desplazamiento lineal: 5 mm.
- Distancia recorrida: La distancia recorrida en los ensayos es de 25 m.
- Atmósfera de laboratorio.
- Humedad: aproximadamente un 35 %
- Carga aplicada: Para todos los ensayos se utilizó una carga fija de 80 N. (presión de contacto de 1 GPa).
- Temperatura ambiente.

Para cada conjunto de condiciones se realizaron al menos 3 ensayos, tomando la media de los resultados:

#### 3.7.1. Ensayos de fricción en seco

Tabla II.8. Coeficientes de fricción medios

|                | Al 2011 | Al 6061 | Al 7075 |
|----------------|---------|---------|---------|
| Fricción Media | 0,66    | 0,78    | 0,56    |
| Desv. típica   | 0,08778 | 0,076   | 0,054   |

#### 3.7.2. Ensayos de desgaste en seco

Tabla II.9. Desgaste medio en mm<sup>3</sup>

|                | Al 2011 | Al 6061 | Al 7075 |
|----------------|---------|---------|---------|
| Desgaste Medio | 3,23    | 0,95    | 1,57    |
| Desv. típica   | 0,925   | 0,0325  | 0,31    |

*Tabla II.10. Tasas de desgaste en ( $mm^3/m$ ) y ( $mm^3/mN$ )*

|  | Al 2011               | Al 6061              | Al 7075              |
|--|-----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Desgaste (<math>mm^3/m</math>)</b>  | 0,1292                | 0,038                | 0,0628               |
| <b>Desgaste (<math>mm^3/mN</math>)</b> | $1,615 \cdot 10^{-3}$ | $4,75 \cdot 10^{-4}$ | $7,85 \cdot 10^{-4}$ |

### **3.8. Ensayos de fricción y desgaste con lubricación por aceite sintético PGDO1429**

Para la realización de los ensayos de fricción y desgaste se sitúa la probeta en el tribómetro previamente calibrado. A continuación, se extienden 1,5 ml del aceite PGDO 1429 que va a ser usado como lubricante en la superficie del disco de aluminio, y se da comienzo al ensayo.

Los ensayos de fricción y desgaste los realizamos a temperatura ambiente con carga y velocidad constantes

Los ensayos se realizaron con los mismos parámetros que se llevaron a cabo en los ensayos en seco.

#### **3.8.1. Ensayos de fricción con PGDO 1429**

*Tabla II.11. Coeficientes de fricción medios*

|                       | Al 2011 | Al 6061 | Al 7075 |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| <b>Fricción Media</b> | 0,12    | 0,15    | 0,17    |
| <b>Desv. típica</b>   | 0,00716 | 0,00321 | 0,0168  |

#### **3.8.2. Ensayos de desgaste con PGDO 1429**

*Tabla II.12. Desgaste medio en  $mm^3$*

|                       | Al 2011              | Al 6061              | Al 7075              |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Desgaste Medio</b> | $1,53 \cdot 10^{-2}$ | $2,06 \cdot 10^{-2}$ | $1,82 \cdot 10^{-2}$ |
| <b>Desv. típica</b>   | $8,03 \cdot 10^{-4}$ | $2,47 \cdot 10^{-4}$ | $6,95 \cdot 10^{-3}$ |

*Tabla II.13. Tasas de desgaste en ( $mm^3/m$ ) y ( $mm^3/mN$ )*

|  | Al 2011              | Al 6061              | Al 7075              |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Desgaste<br/>(<math>mm^3/m</math>)</b>  | $6,12 \cdot 10^{-4}$ | $8,24 \cdot 10^{-4}$ | $7,28 \cdot 10^{-4}$ |
| <b>Desgaste<br/>(<math>mm^3/mN</math>)</b> | $7,65 \cdot 10^{-6}$ | $1,03 \cdot 10^{-5}$ | $9,1 \cdot 10^{-6}$  |

### **3.9. Ensayos de fricción y desgaste con lubricación por líquidos iónicos como aditivos en el lubricante PGDO 1429**

Al igual que en el anterior caso, la probeta de aluminio se sitúa en el tribómetro previamente calibrado. Se agita la mezcla lubricante al 1% durante 30 minutos a 300 rpm y, a continuación, se vierten 1,5 ml de la mezcla en la superficie del disco de aluminio, dándose comienzo al ensayo.

Los valores de fricción y temperatura se registran con el programa informático conectado al tribómetro.

Los ensayos de fricción y desgaste con el lubricante sintético al 1% también los realizamos con carga y velocidad constante.

Los ensayos se llevaron a cabo con los mismos parámetros que con el aceite puro.

#### **3.9.1. Ensayos de fricción y desgaste con 1% L102 en el aceite PGDO 1429**

##### **3.9.1.1. Ensayos de fricción**

*Tabla II.14. Coeficientes de fricción medios*

|                       | Al 2011  | Al 6061  | Al 7075 |
|-----------------------|----------|----------|---------|
| <b>Fricción Media</b> | 0,15     | 0,13     | 0,16    |
| <b>Desv. típica</b>   | 0,001443 | 0,009951 | 0,01013 |

##### **3.9.1.2. Ensayos de desgaste**

*Tabla II.15. Desgaste medio en  $mm^3$*

|                       | Al 2011              | Al 6061              | Al 7075              |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Desgaste Medio</b> | $1,86 \cdot 10^{-2}$ | $3,59 \cdot 10^{-2}$ | $1,34 \cdot 10^{-2}$ |
| <b>Desv. típica</b>   | $1,43 \cdot 10^{-3}$ | $4,34 \cdot 10^{-3}$ | $5,86 \cdot 10^{-4}$ |

*Tabla II.16. Tasas de desgaste en ( $mm^3/m$ ) y ( $mm^3/mN$ )*

|  | Al 2011              | Al 6061               | Al 7075              |
|--|----------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>Desgaste (<math>mm^3/m</math>)</b>  | $7,44 \cdot 10^{-4}$ | $1,436 \cdot 10^{-3}$ | $5,36 \cdot 10^{-4}$ |
| <b>Desgaste (<math>mm^3/mN</math>)</b> | $9,3 \cdot 10^{-6}$  | $1,795 \cdot 10^{-5}$ | $6,7 \cdot 10^{-6}$  |

### 3.9.2. Ensayos de fricción y desgaste con 1% L-Nft 102 en el aceite PGDO 1429

#### 3.9.2.1. Ensayos de fricción

*Tabla II.17. Coeficientes de fricción medios*

|                       | Al 2011 | Al 6061  | Al 7075  |
|-----------------------|---------|----------|----------|
| <b>Fricción Media</b> | 0,16    | 0,14     | 0,16     |
| <b>Desv. típica</b>   | 0,01971 | 0,003157 | 0,006122 |

#### 3.9.2.2. Ensayos de desgaste

*Tabla II.18. Desgaste medio en  $mm^3$*

|                       | Al 2011              | Al 6061              | Al 7075              |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Desgaste Medio</b> | $1,90 \cdot 10^{-2}$ | $3,03 \cdot 10^{-2}$ | $1,30 \cdot 10^{-2}$ |
| <b>Desv. típica</b>   | $2,7 \cdot 10^{-4}$  | $4,66 \cdot 10^{-3}$ | $7,70 \cdot 10^{-4}$ |

*Tabla II.19. Tasas de desgaste en ( $mm^3/m$ ) y ( $mm^3/mN$ )*

|  | Al 2011             | Al 6061               | Al 7075             |
|--|---------------------|-----------------------|---------------------|
| <b>Desgaste (<math>mm^3/m</math>)</b>  | $7,6 \cdot 10^{-4}$ | $1,212 \cdot 10^{-3}$ | $5,2 \cdot 10^{-4}$ |
| <b>Desgaste (<math>mm^3/mN</math>)</b> | $9,5 \cdot 10^{-6}$ | $1,515 \cdot 10^{-5}$ | $6,5 \cdot 10^{-6}$ |

# **CAPÍTULO III**

---

## **DISCUSIÓN**

### **DE**

## **RESULTADOS**

## 1. Introducción

En la figura III.1 se puede ver el esquema de los ensayos realizados en el presente trabajo.

En primer lugar, se discutirá el comportamiento frente a la fricción y al desgaste de cada tipo de aleación de aluminio en deslizamiento contra punzones de acero AISI 52100 en seco.

Posteriormente se estudiará el aceite sintético PGDO 1429 como lubricación del contacto aluminio-acero.

Para estudiar la influencia de los aditivos líquidos iónicos disueltos en el aceite puro, se han realizado ensayos, todos ellos a velocidad y carga constante, analizando los procesos triboquímicos y su influencia en él.

En este trabajo se han utilizado las aleaciones de aluminio y los LI como aditivos al 1% del aceite sintético descritos en el Capítulo II



Figura III.1. Esquema de los ensayos realizados

Para cada tipo de Aluminio se han realizado al menos tres ensayos para cada tipo de lubricante, cuyos resultados se muestran en los siguientes apartados.

## 2. Ensayos de fricción y desgaste en seco

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos para los ensayos de fricción y desgaste en seco para cada una de las aleaciones tratadas.

### 2.1. Resultados de fricción y desgaste en seco para el Al 2011

Los coeficientes de fricción y el desgaste medios obtenidos a partir de todos los ensayos llevados a cabo se muestran con su correspondiente desviación típica:

Tabla III.1. Coeficientes de fricción y de desgaste en seco para Al 2011

|                     | Media | Desviación típica |
|---------------------|-------|-------------------|
| Fricción            | 0,66  | 0,08778           |
| Desgaste ( $mm^3$ ) | 3,23  | 0,925             |

La evolución de la fricción en el Al 2011 en función de la distancia recorrida:

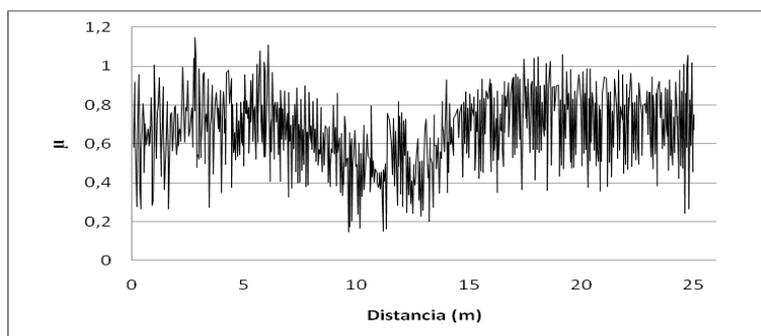


Figura III.2. Curva fricción-distancia para Al 2011 en seco

#### 2.1.1. Huellas de desgaste en seco para Al 2011

Las microfotografías ópticas de las huellas obtenidas cuando realizamos el ensayo en seco presentan una forma ancha y redondeada, así como cierta deformación plástica en el borde de la huella.

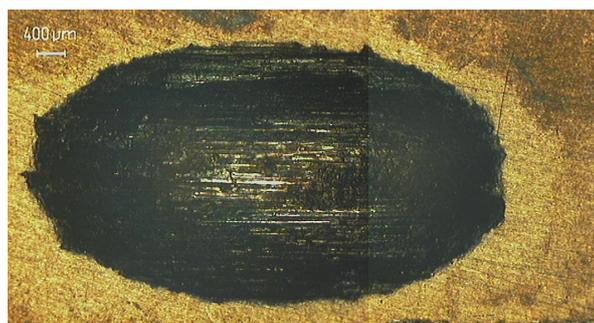


Figura III.3. Huella representativa para Al 2011 en seco

En la figura III.4 se muestra la imagen tridimensional obtenida con el perfilómetro óptico debida al contacto entre la bola de acero y el Al 2011 en seco, observándose la máxima profundidad en el centro de la huella

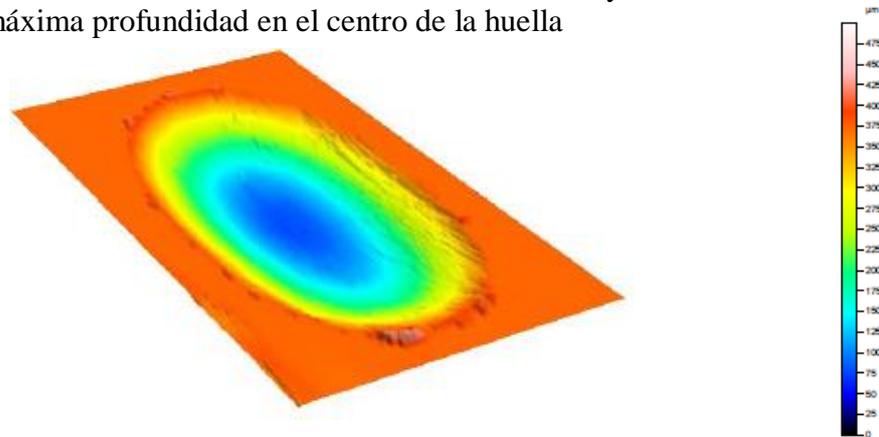
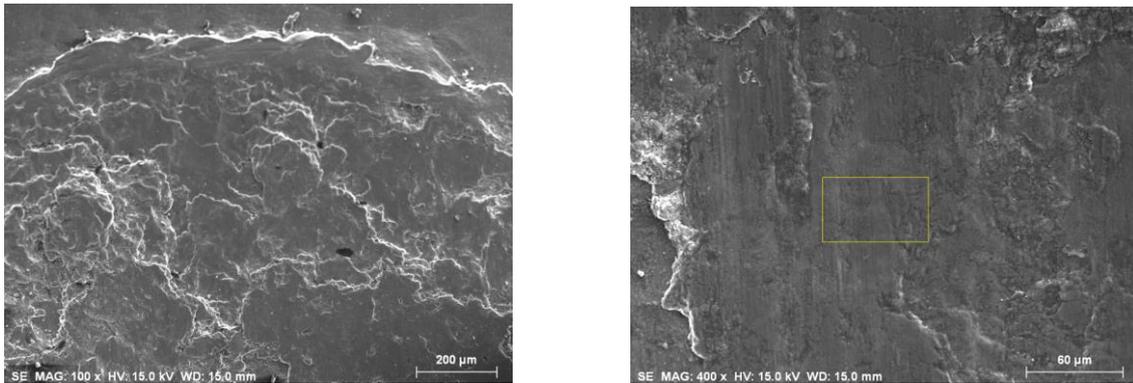


Figura III.4. Huella de desgaste para Al 2011 en seco

Las huellas que se muestran a continuación han sido tomadas con el microscopio electrónico, que se explicó en el apartado 2.7 del Capítulo II



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella con región analizada

Figura III.5. Micrografía SEM en el disco de Al 2011

Se analizó la superficie de la huella tras el ensayo, obteniendo el espectro EDS que nos da idea de los elementos que la compone.

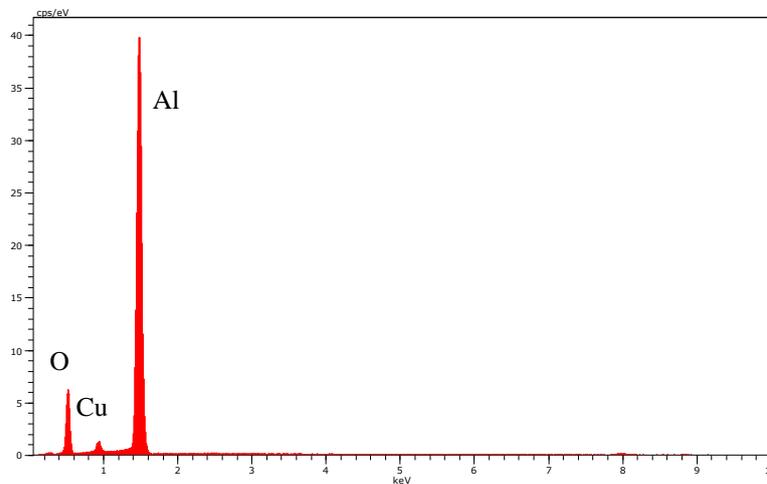
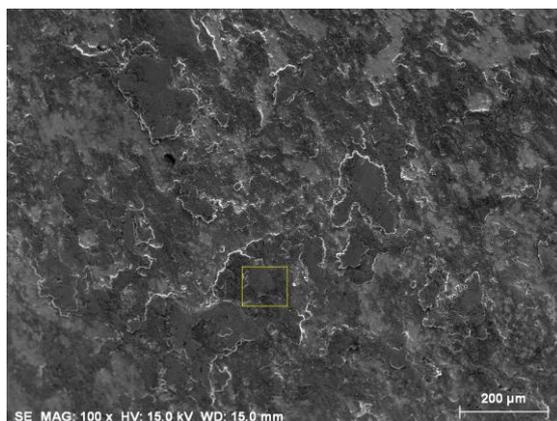


Figura III.6 .Espectro EDS de la huella Al 2011 en seco

Se observa la presencia de Aluminio, junto con Cobre, que es un elemento de la aleación del Al 2011. También se observa una oxidación en la superficie.

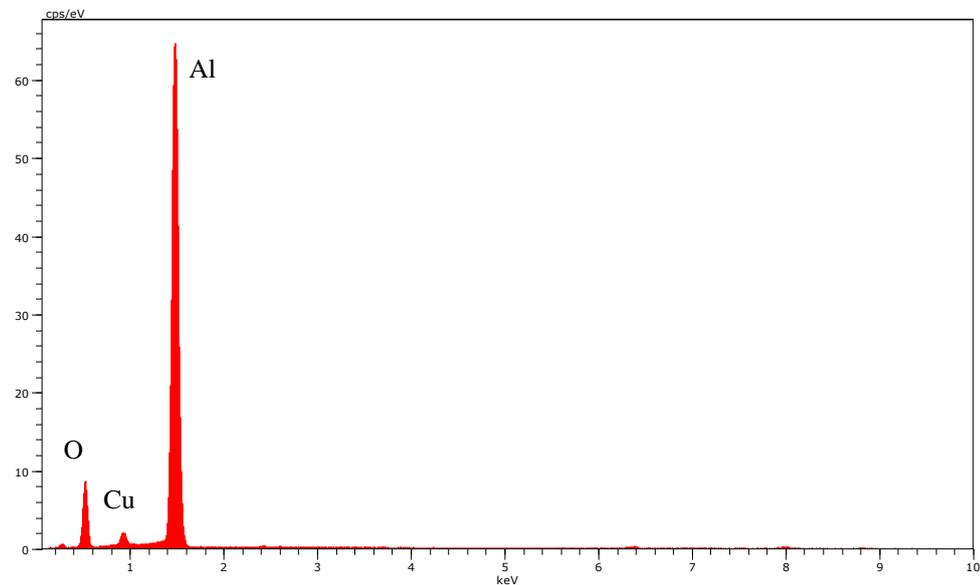
### **2.1.2. Huellas de desgaste en seco del punzón de acero para Al 2011**

Se va a analizar la región marcada en la huella de la bola de acero para el ensayo en seco del Al 2011 en contacto el acero:



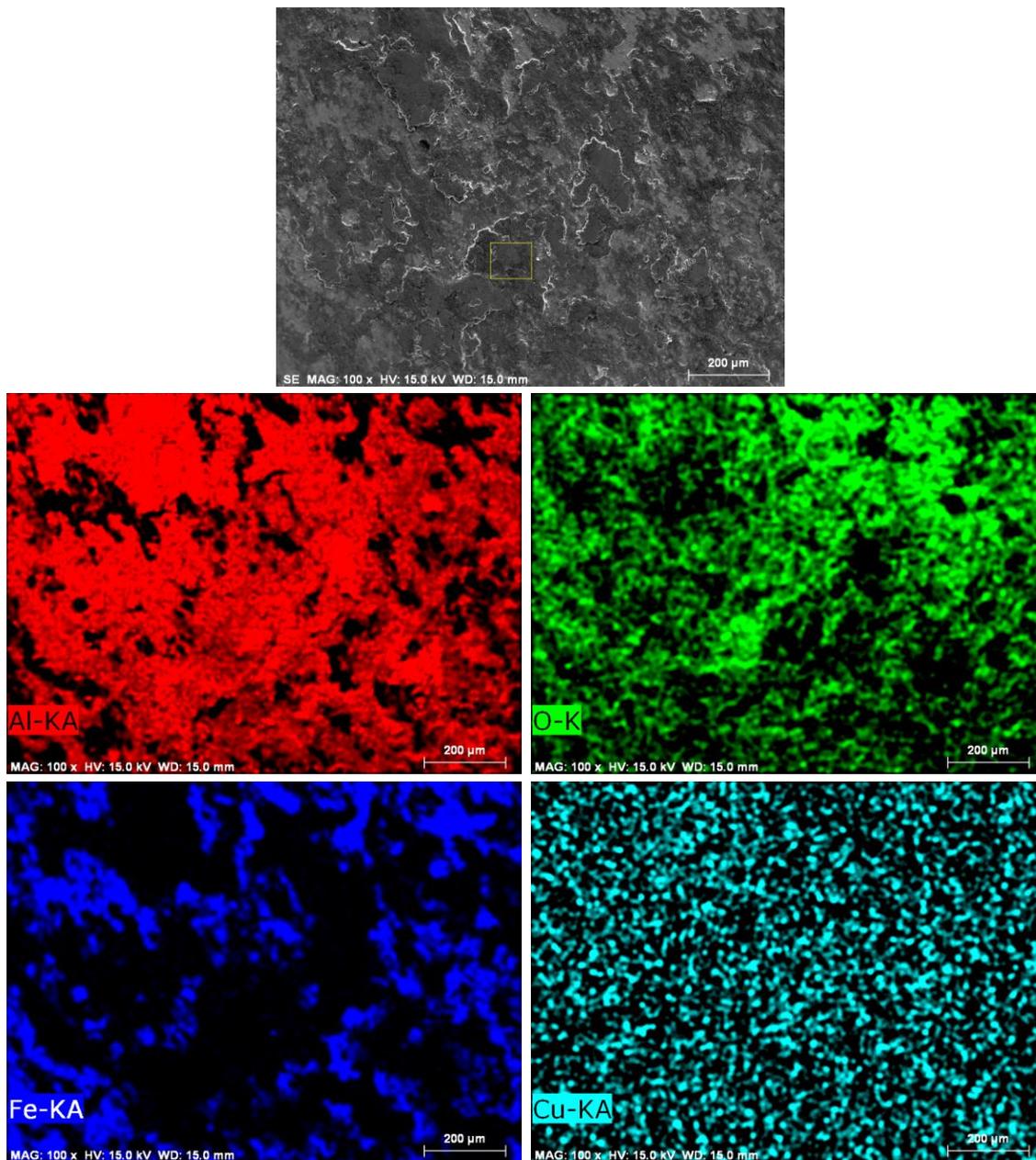
*Figura III.7. Micrografía SEM bola de acero en contacto con Al 2011 en seco*

Los elementos que forman la región señalada se muestran en la Figura III.8, y son el oxígeno, el cobre y mayoritariamente aluminio, que pertenecen a la composición de la aleación Al 2011.



*Figura III.8 .Espectro EDS de la bola de acero en contacto con Al 2011 en seco*

La distribución del Al, O, Fe y Cu de la superficie de la bola de acero se ha tomado con el microscopio electrónico:



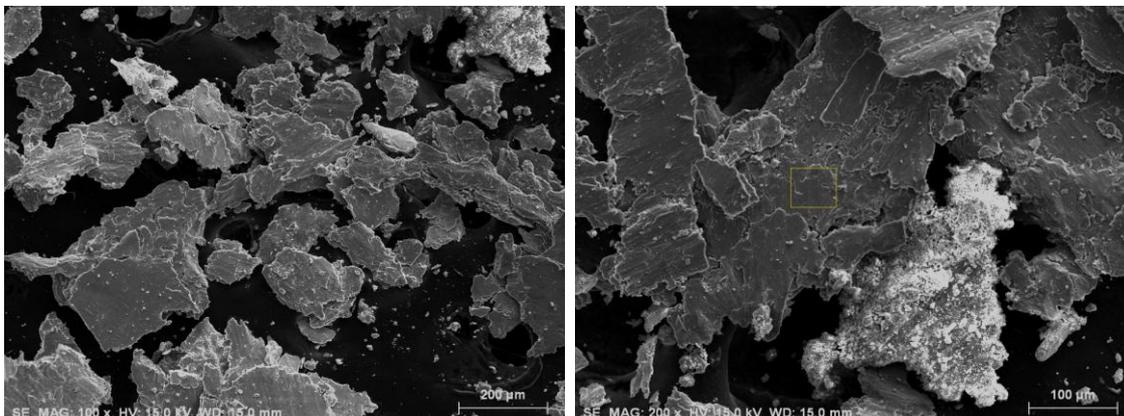
*Figura III.9. Mapa elemental de la tribocapa sobre la bola de acero*

Como se puede observar, el Al se adhiere a la bola de acero, de manera que no se produce desgaste en el punzón de acero.

El hierro se aprecia aún estando las partículas de aluminio adheridas a la bola de acero.

### 2.1.3. Partículas de desgaste en seco para Al 2011

Se han obtenido multitud de partículas de desgaste en los ensayos en seco. Estas partículas presentan la siguiente morfología y distribución:



a) Partículas de desgaste      b) Análisis micrográfico de la región señalada

Figura III.10. Partículas de desgaste en seco para Al 2011

En el análisis del espectro EDS de estas partículas de desgaste se observa mayoritariamente Al, además del Cu que forma parte de la aleación y de una ligera oxidación de las partículas

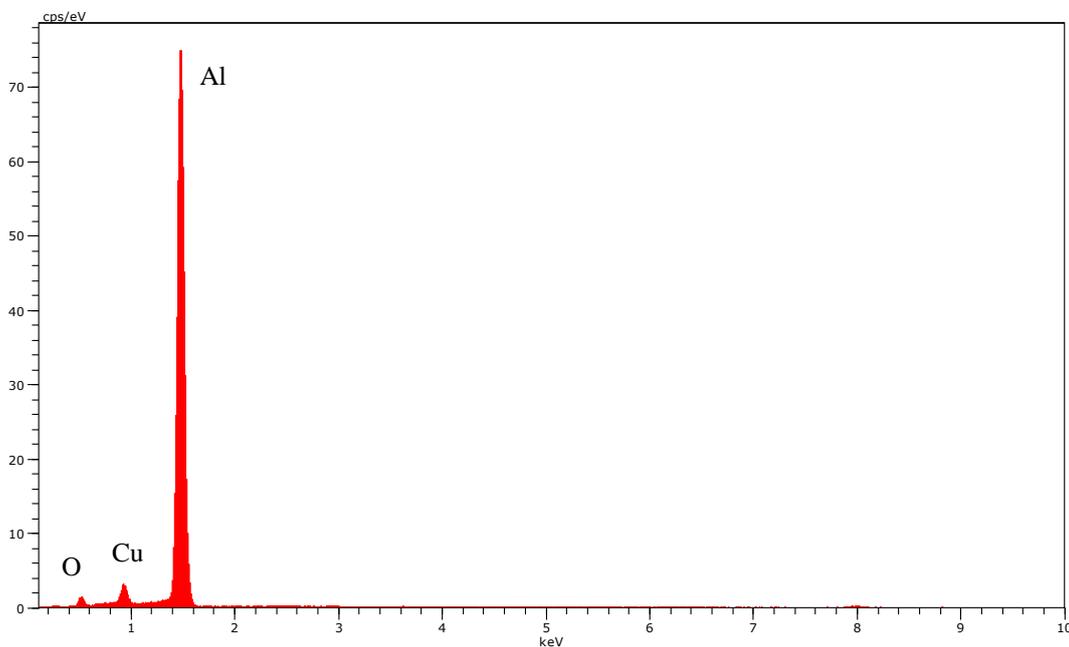


Figura III.11 .Espectro EDS de las partículas de desgaste en seco del Al 2011

## 2.2. Resultados de fricción y desgaste en seco para el Al 6061

Los resultados obtenidos para el Al 6061 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla III.2. Coeficientes de fricción y de desgaste en seco para Al 6061

|                     | Media | Desviación típica |
|---------------------|-------|-------------------|
| Fricción            | 0,78  | 0,076             |
| Desgaste ( $mm^3$ ) | 0,95  | 0,0325            |

La evolución de la fricción a lo largo del ensayo:

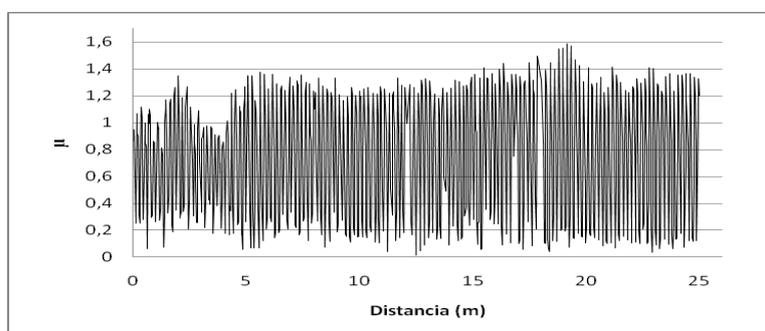


Figura III.12. Curva fricción-distancia para Al 6061 en seco

### 2.2.1. Huellas de desgaste en seco para Al 6061

La huella que se obtiene en este ensayo con la aleación Al 6061:

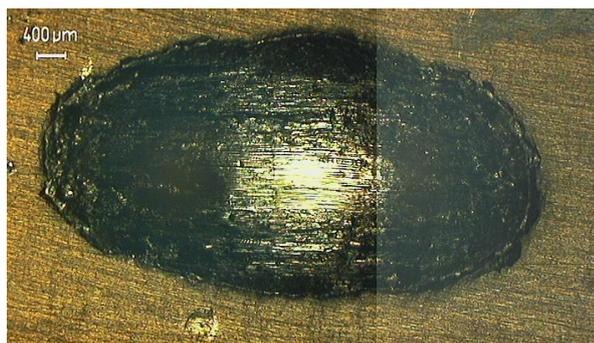


Figura III.13. Huella representativa para Al 6061 en seco

En esta ocasión se puede observar una mayor deformación en los bordes de la huella de la aleación 6061, con respecto a la 2011, probablemente debido a su menor resistencia mecánica.

La huella, igual que en el Al 2011, presenta la mayor profundidad en el centro:

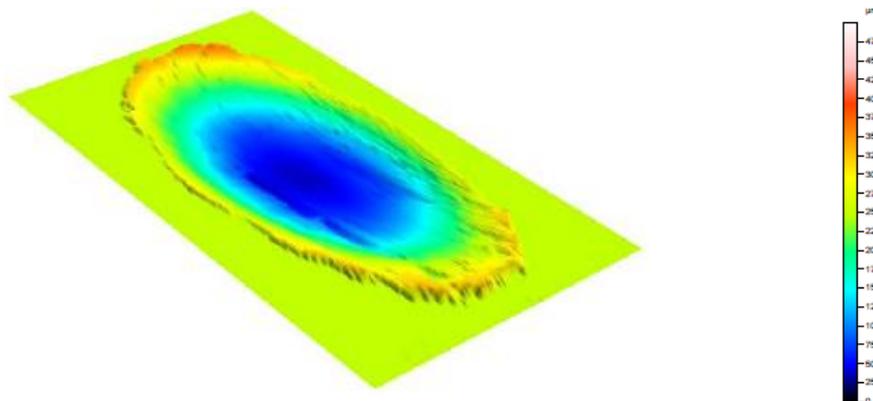
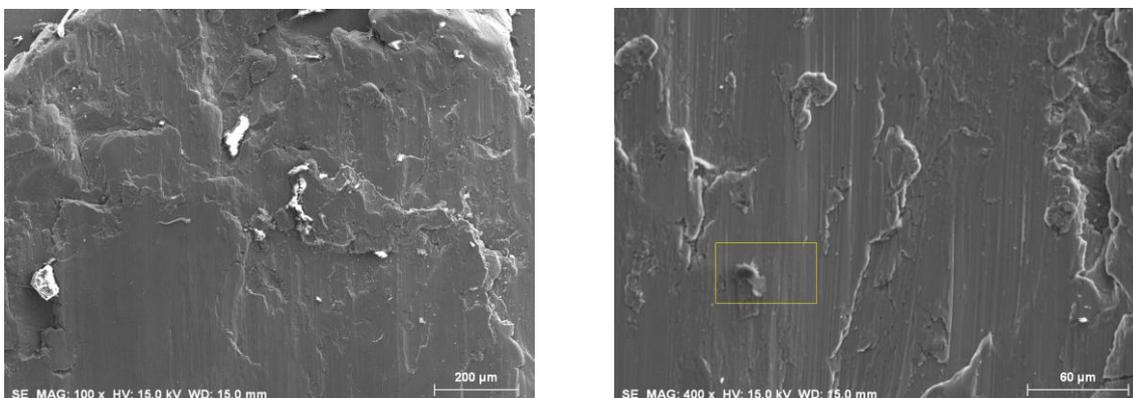


Figura III.14. Huella de desgaste para Al 6061 en seco



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.15 .Micrografía SEM en el disco de Al 6061

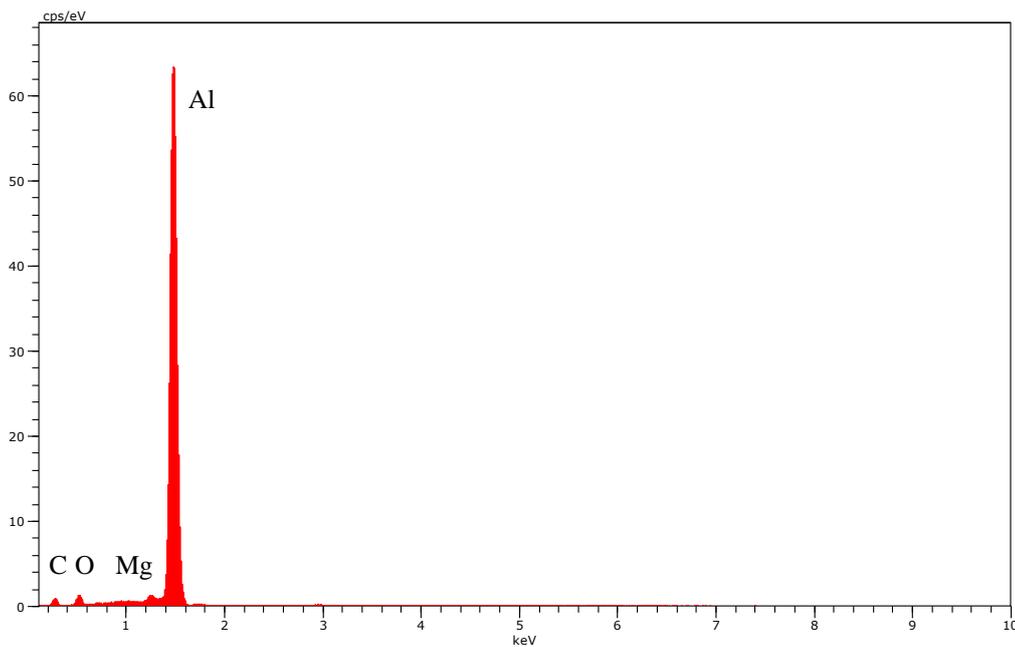
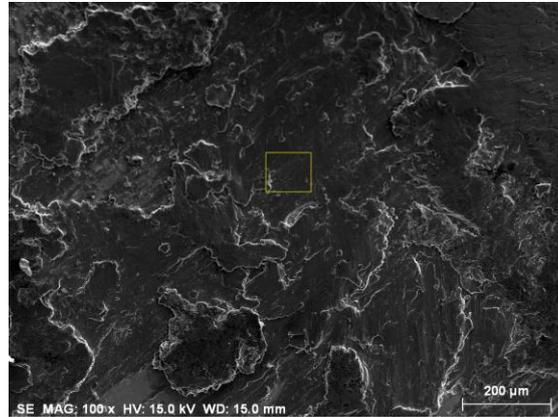


Figura III.16. Espectro EDS de la huella Al 6061 en seco

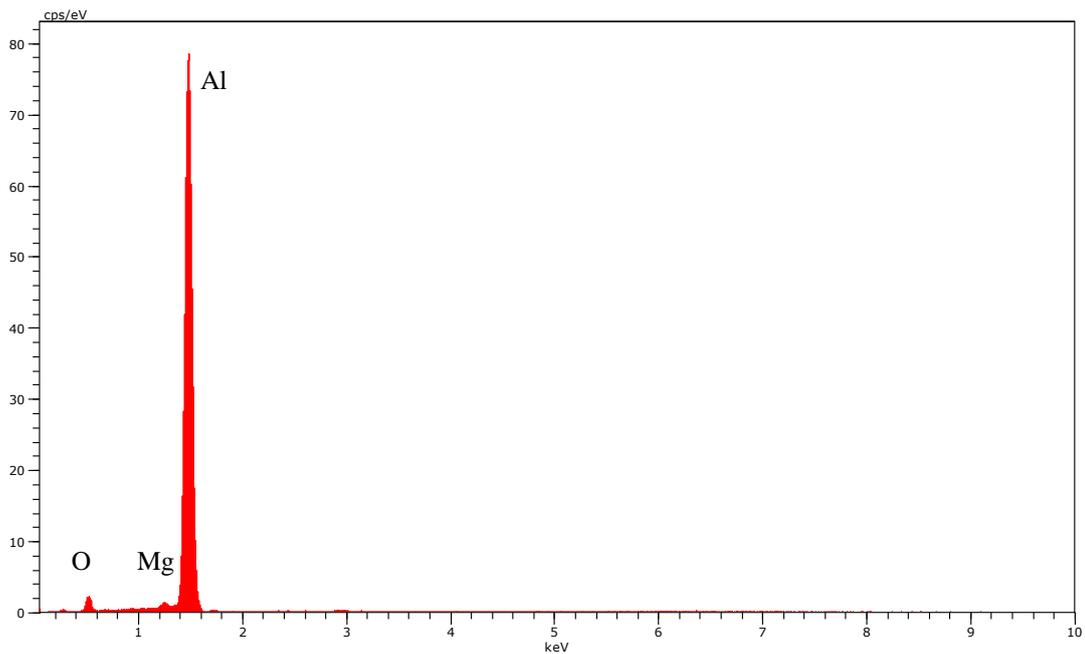
### **2.2.2. Huellas de desgaste en seco del punzón de acero para Al 6061**

Se va a analizar la región marcada en la huella de la bola de acero para el ensayo en seco del Al 6061 en contacto el acero:



*Figura III.17. Micrografía SEM en la bola de acero en contacto con Al 6061 en seco*

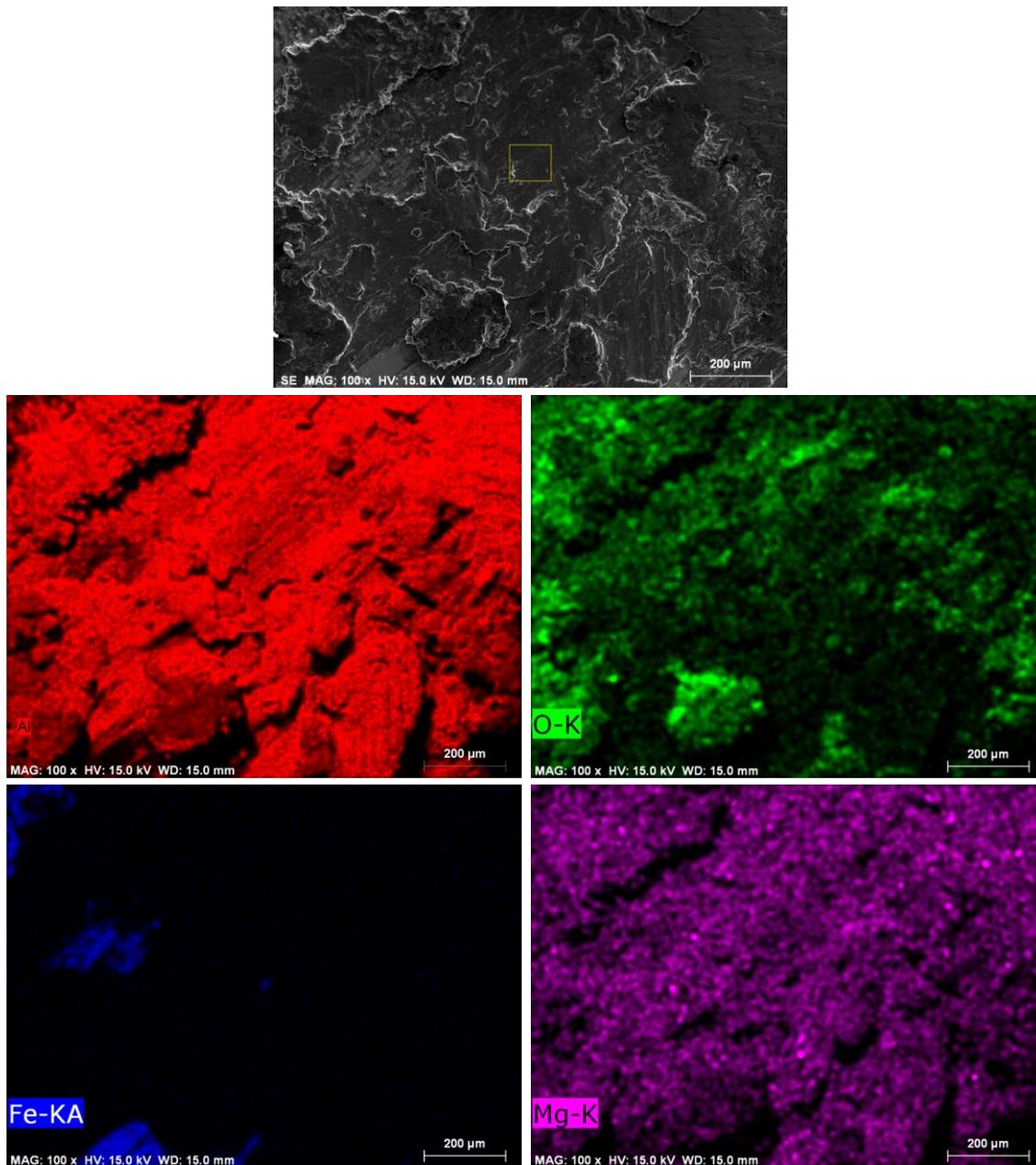
El análisis del espectro EDS presenta los elementos que compone la bola de acero en este ensayo:



*Figura III.18. Espectro EDS de la bola de acero en contacto con Al 6061 en seco*

Los elementos que forman la región señalada de la Figura III.17 son el oxígeno, el magnesio y mayoritariamente aluminio, que pertenecen a la composición de la aleación Al 6061.

La distribución del Al, O, Fe y Mg de la superficie de la bola de acero se ha tomado con el microscopio electrónico:

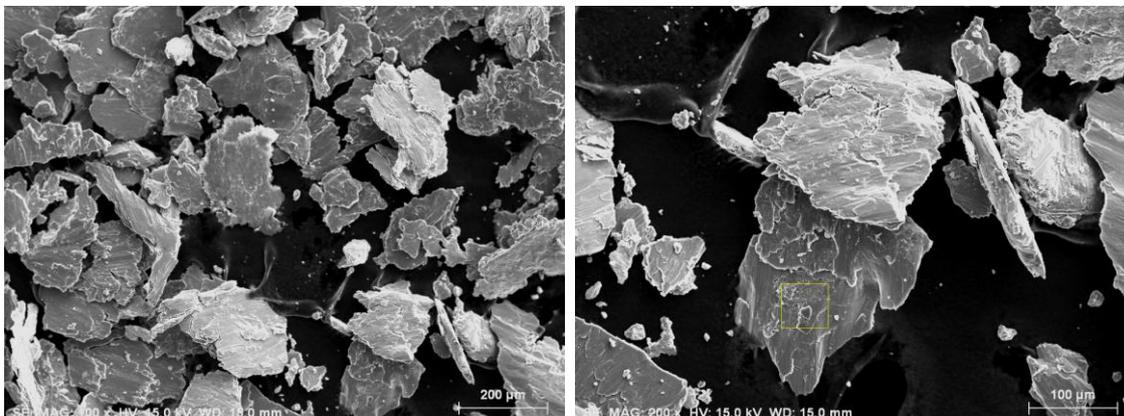


*Figura III.19. Mapa elemental de la tribocapa sobre la bola de acero*

El Al se vuelve a adherir a la bola de acero, de manera que no se produce desgaste en el punzón de acero.

### 2.2.3. Partículas de desgaste en seco para Al 6061

Las partículas de desgaste del Al 6061 en los ensayos en seco presentan la siguiente morfología, y analizamos la región señalada:



a) Partículas de desgaste      b) Análisis micrográfico de la región señalada

Figura III.20. Partículas de desgaste en seco para Al 6061

Se vuelven a observar elementos de la composición de la aleación Al 6061, además de una ligera oxidación en las partículas.

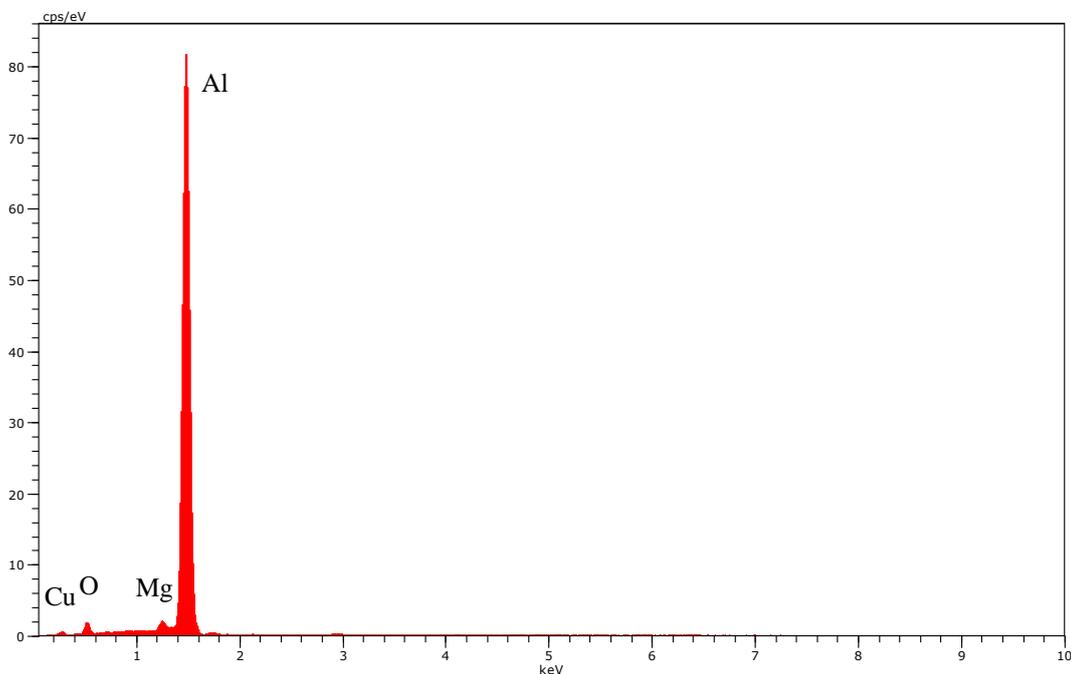


Figura III.21 .Espectro EDS de las partículas de desgaste en seco del Al 6061

### 2.3. Resultados de fricción y desgaste en seco para el Al 7075

Los resultados obtenidos para el Al 7075 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla III.3. Coeficientes de fricción y de desgaste en seco para Al 7075

|                     | Media | Desviación típica |
|---------------------|-------|-------------------|
| Fricción            | 0,56  | 0,054             |
| Desgaste ( $mm^3$ ) | 1,57  | 0,31              |

La evolución de la fricción a lo largo del ensayo:

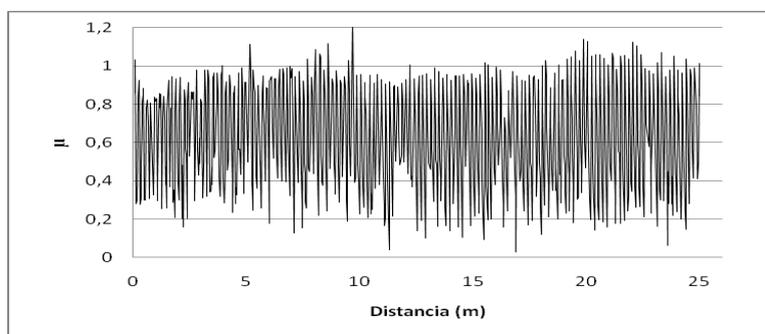


Figura III.22. Curva fricción-distancia para Al 7075 en seco

#### 2.3.1. Huellas de desgaste en seco para Al 7075

Se obtiene una huella similar a los de los ensayos anteriores



Figura III.23. Huella representativa para Al 7075 en seco

Se vuelve a realizar el mismo análisis que en la aleación anterior, consiguiendo la huella de desgaste tridimensional con el perfilómetro y analizando los componentes que la constituyen mediante el microscopio electrónico.

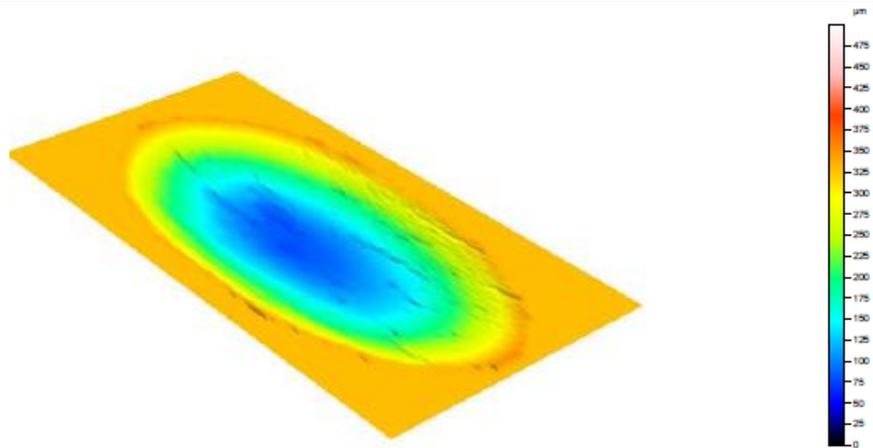
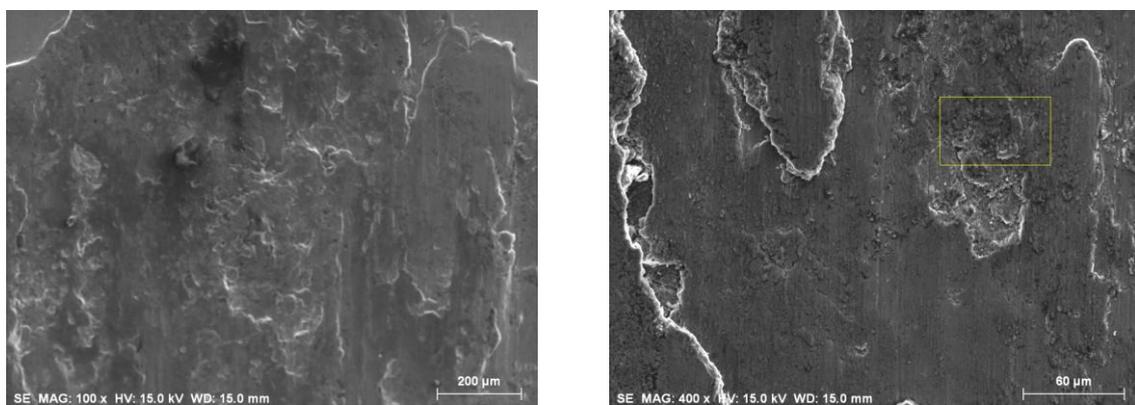


Figura III.24. Huella de desgaste para Al 7075 en seco



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.25. Micrografía SEM en el disco de Al 7075

Los elementos analizados forman parte de esta nueva aleación.

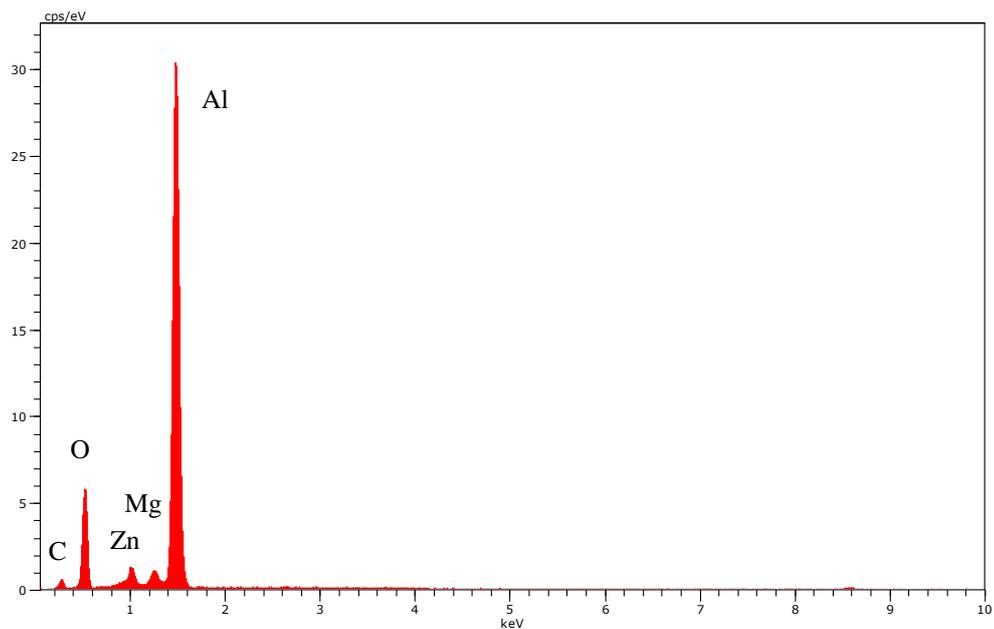


Figura III.26. Espectro EDS de la huella Al 7075 en seco

### 2.3.2. Huellas de desgaste en seco del punzón de acero para Al 7075

Analizamos el punzón para el contacto acero-Al 7075 y obtenemos la siguiente micrografía:



Figura III.27. Micrografía SEM en la bola de acero en contacto con Al 7075 en seco

El análisis del espectro presenta una gran oxidación en la superficie de acero, además de un elevado pico de hierro que forma parte de la bola

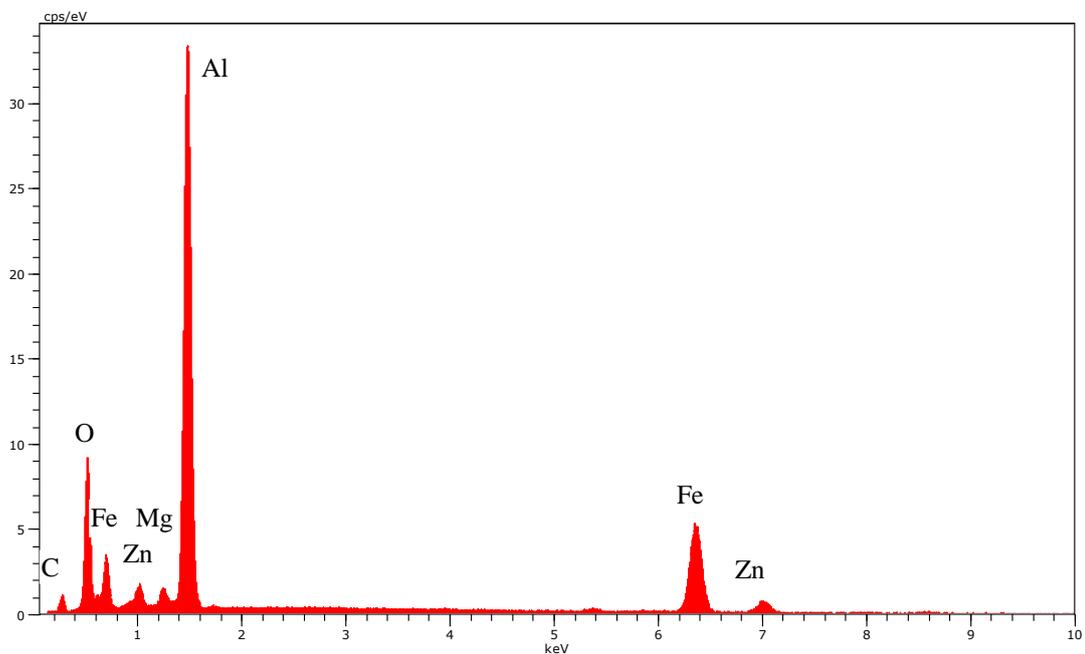
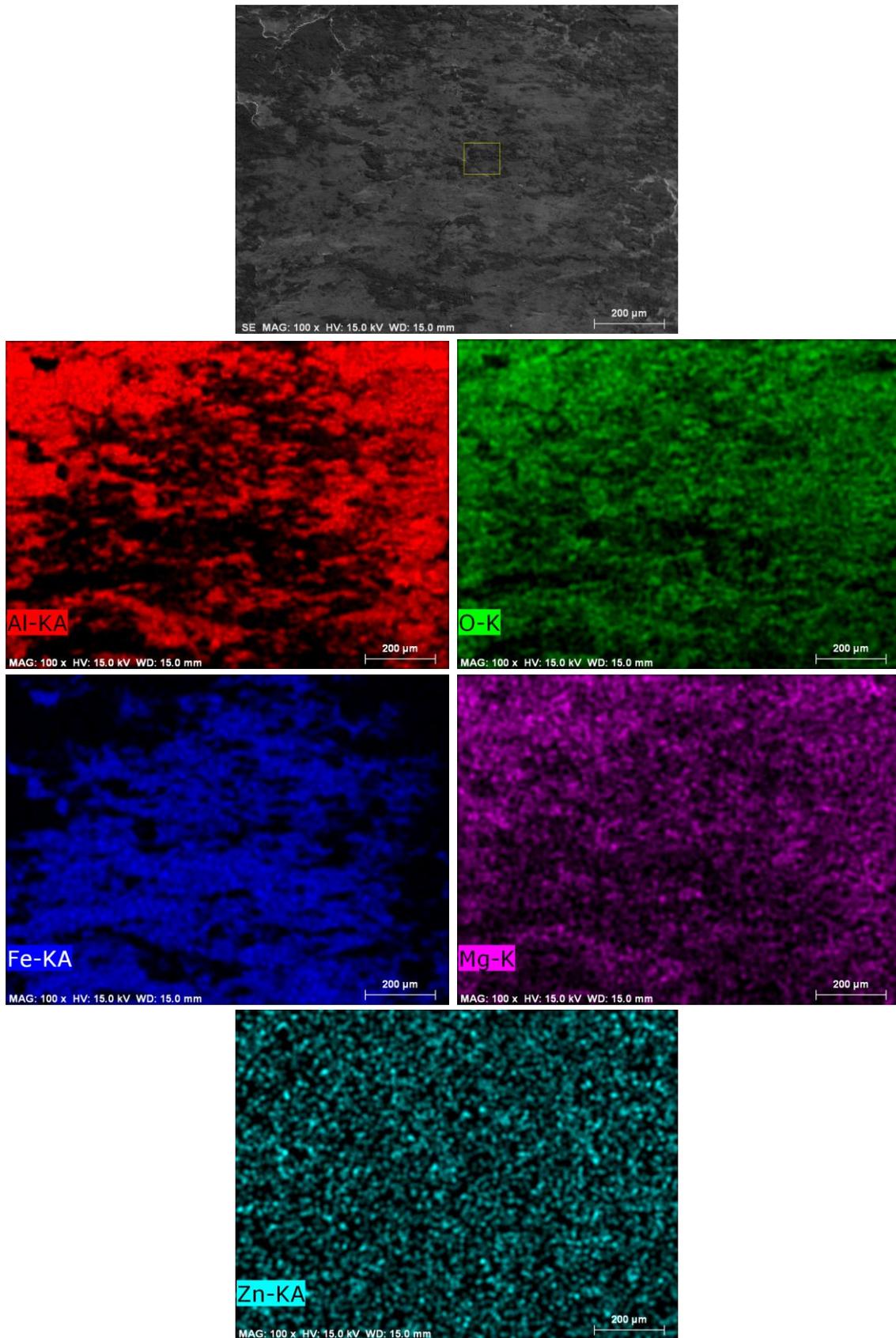


Figura III.28. Espectro EDS de la bola de acero en contacto con Al 7075 en seco

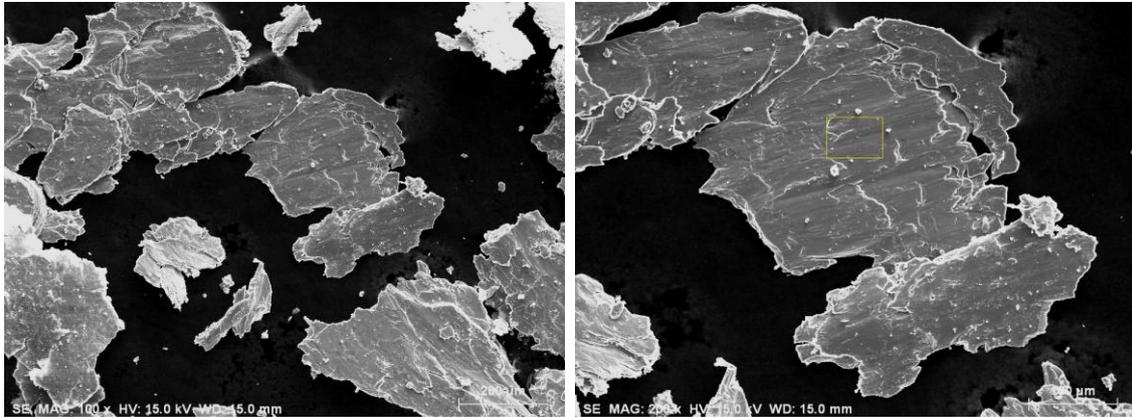
Los elementos anteriores se encuentran repartidos como se muestra a continuación:



*Figura III.29. Mapa elemental de la tribocapa sobre la bola de acero*

### 2.3.3. Partículas de desgaste en seco para Al 7075

Las partículas de desgaste en seco obtenidas para esta nueva aleación son más grandes y presentan la siguiente morfología:



a) Partículas de desgaste      b) Análisis micrográfico de la región señalada  
Figura III.30. Partículas de desgaste en seco para Al 7075

Estas partículas están formadas mayoritariamente por aluminio, además de magnesio y zinc.

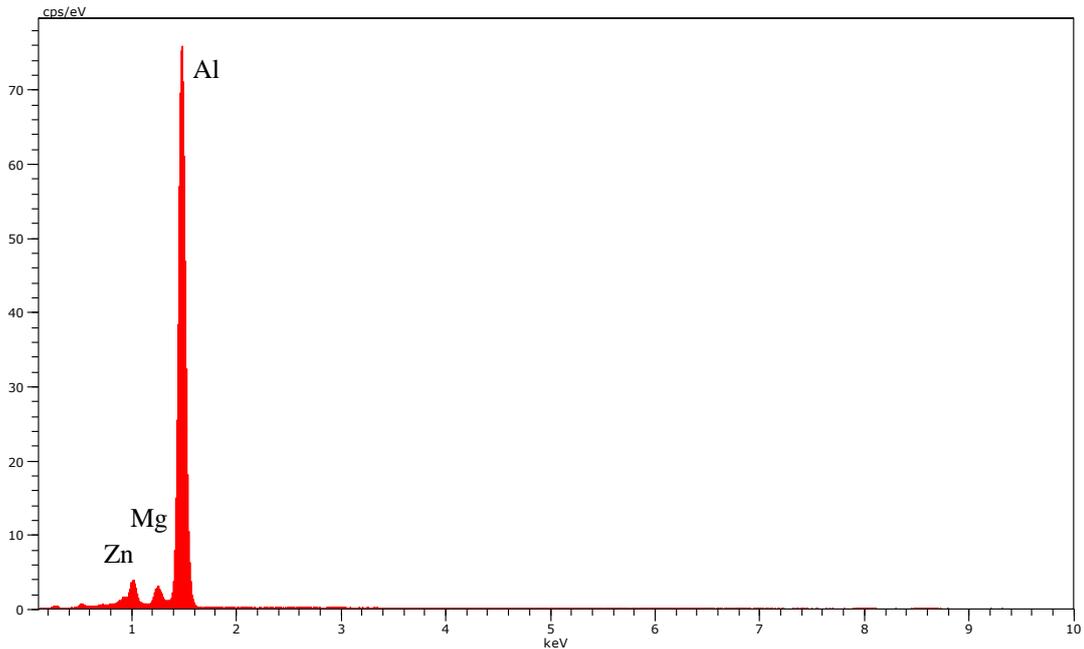


Figura III.31. Espectro EDS de las partículas de desgaste en seco del Al 7075

### 3. Ensayos de fricción y desgaste para Al 2011

Para la probeta Al 2011 se han realizado en el tribómetro ensayos en seco y con los siguientes lubricantes:

- PGDO 1429 puro.
- PGDO 1429 con un 1% L102.
- PGDO 1429 con un 1%L-Ntf102.

#### 3.1. Resultados de fricción

Los coeficientes de fricción medios y la desviación típica obtenidos a partir de todos los ensayos llevados a cabo para cada lubricante se muestran a continuación:

Tabla III.4. Coeficientes de fricción

|                     | EN SECO     | PGDO        | PGDO+1%L102 | PGDO+1%L-Ntf 102 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
| <b>Media</b>        | <b>0,66</b> | <b>0,12</b> | <b>0,15</b> | <b>0,16</b>      |
| <b>Desv. típica</b> | 0,08778     | 0,00716     | 0,001443    | 0,01971          |

En la Figura III.32 se muestra la evolución de la fricción en el Al 2011 en función de la distancia recorrida.

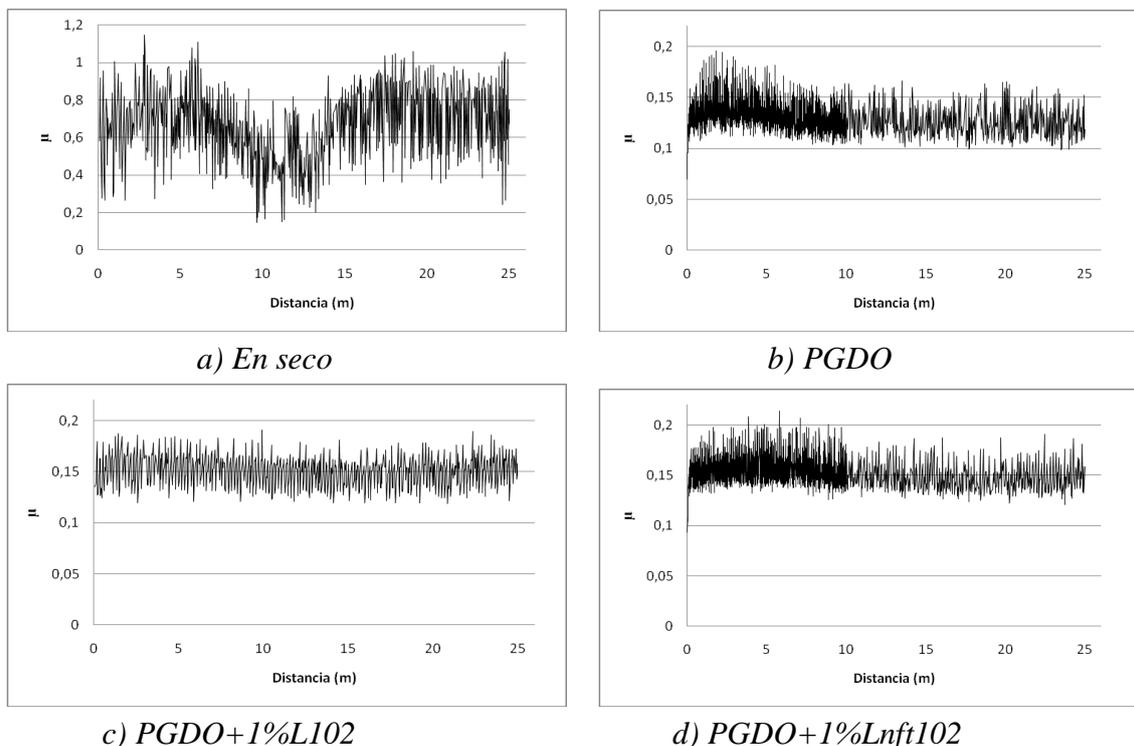


Figura III.32. Curva de fricción del Al 2011

Si realizamos los ensayos de fricción y desgaste en seco, se obtienen valores de fricción elevados y variables a lo largo del ensayo, como se puede observar en la gráfica

En la gráfica b se observa que si usamos el aceite puro PGDO 1429 obtenemos un periodo inicial de mayor fricción, aunque finalmente llega a estabilizarse a un valor más bajo.

Sin embargo, cuando añadimos un 1% de LI como aditivo en el aceite, se obtienen valores de fricción más estables en todo el ensayo, aunque ligeramente superiores a los del aceite sintético puro.

### 3.2. Resultados de desgaste

En la tabla III.5 se muestran los resultados medios de desgaste con la desviación típica correspondiente para cada lubricante:

*Tabla III.5. Desgaste en mm<sup>3</sup>*

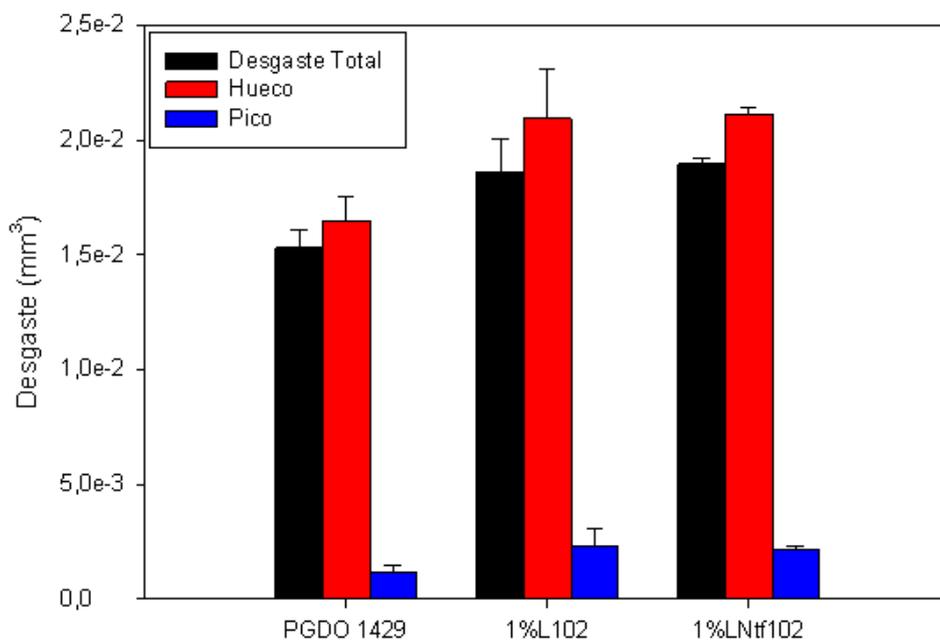
|                     | <b>EN SECO</b> | <b>PGDO</b>                 | <b>PGDO+1%L102</b>          | <b>PGDO+1%L-Ntf 102</b>     |
|---------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Media</b>        | <b>3,23</b>    | <b>1,53·10<sup>-2</sup></b> | <b>1,86·10<sup>-2</sup></b> | <b>1,90·10<sup>-2</sup></b> |
| <b>Desv. típica</b> | 0,925          | 8,03·10 <sup>-4</sup>       | 1,43·10 <sup>-3</sup>       | 2,7·10 <sup>-3</sup>        |

En la siguiente gráfica se representan la media y la desviación típica de los valores hueco, valores pico, y los valores de desgaste obtenidos en cada ensayo.

Se entiende como valor “hueco” la cantidad de materia que se elimina de la probeta al deslizarse el punzón de acero en la probeta de aluminio.

El valor “pico” es la deformación que experimenta la muestra, es decir, la cantidad de materia que se acumula en los bordes de la huella.

Por tanto, el desgaste obtenido será la diferencia entre estos valores, es decir, el valor hueco menos el valor pico.



*Figura III.33. Media y desviación típica del Al 2011*

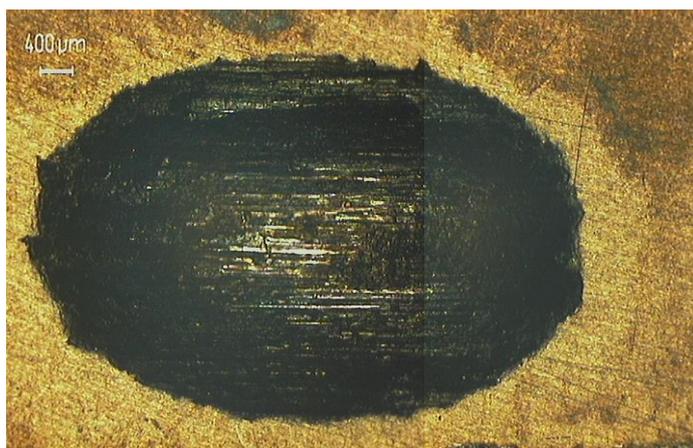
En todos los ensayos se produce una cierta deformación que se corresponde con los valores “pico” y que es aproximadamente igual para los tres lubricantes, obteniéndose el menor desgaste total para el lubricante puro.

Por tanto, el mayor desgaste se dará en el ensayo que presente mayor valor hueco, que es prácticamente igual en los dos casos en los que añadimos un 1% de aditivo en el aceite.

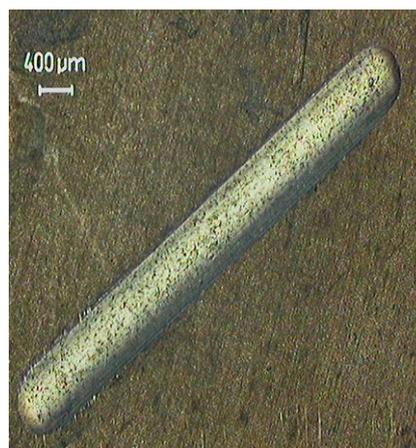
### **3.3. Huellas de desgaste**

#### **3.3.1. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio óptico**

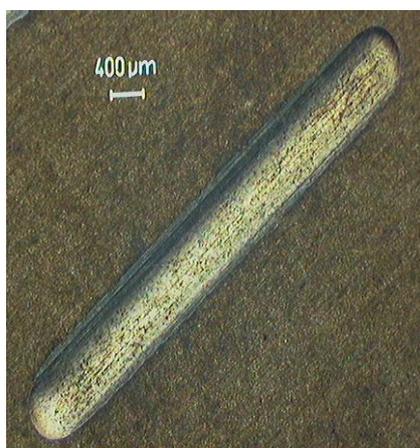
En la Figura III.34 se muestran las micrografías ópticas de las huellas obtenidas en los distintos ensayos. En ellas puede apreciarse el aspecto redondeado de los extremos, así como cierta deformación plástica en los bordes de la huella.



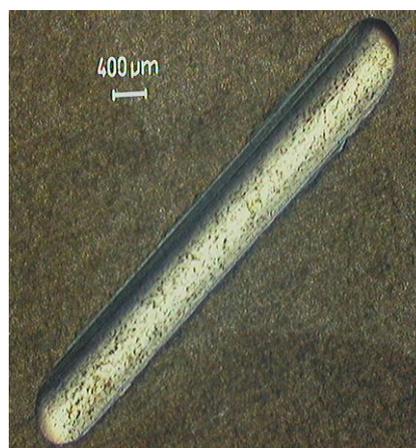
*a) En seco*



*b) PGDO 1429*



*c) PGDO+1%L102*



*d) PGDO+1%Lntf102*

*Figura III.34: Huellas representativas para cada ensayo del Al 2011*

### 3.3.2. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el perfilómetro

En la figura III.35 se muestra la imagen tridimensional obtenida con el perfilómetro óptico debida al contacto entre la bola de acero y el Al 2011 en seco.

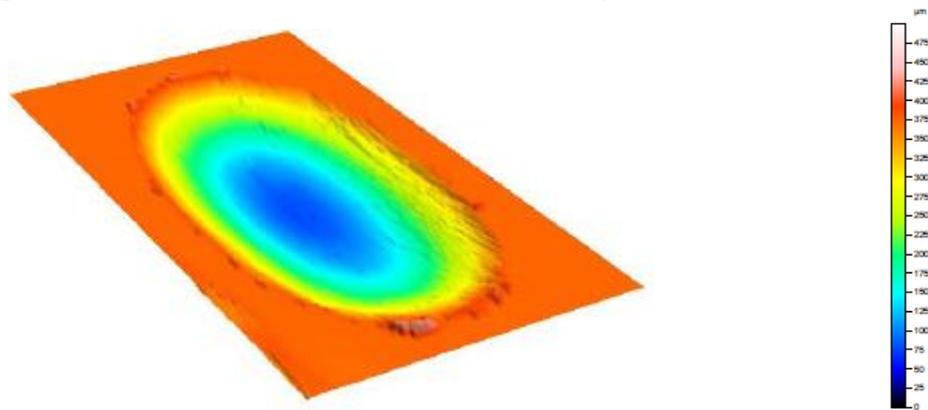


Figura III.35. Huellas de desgaste del Al 2011 en seco

En la Figura III.36 se muestran las huellas tridimensionales debidas al contacto del Al 2011 con los distintos lubricantes.

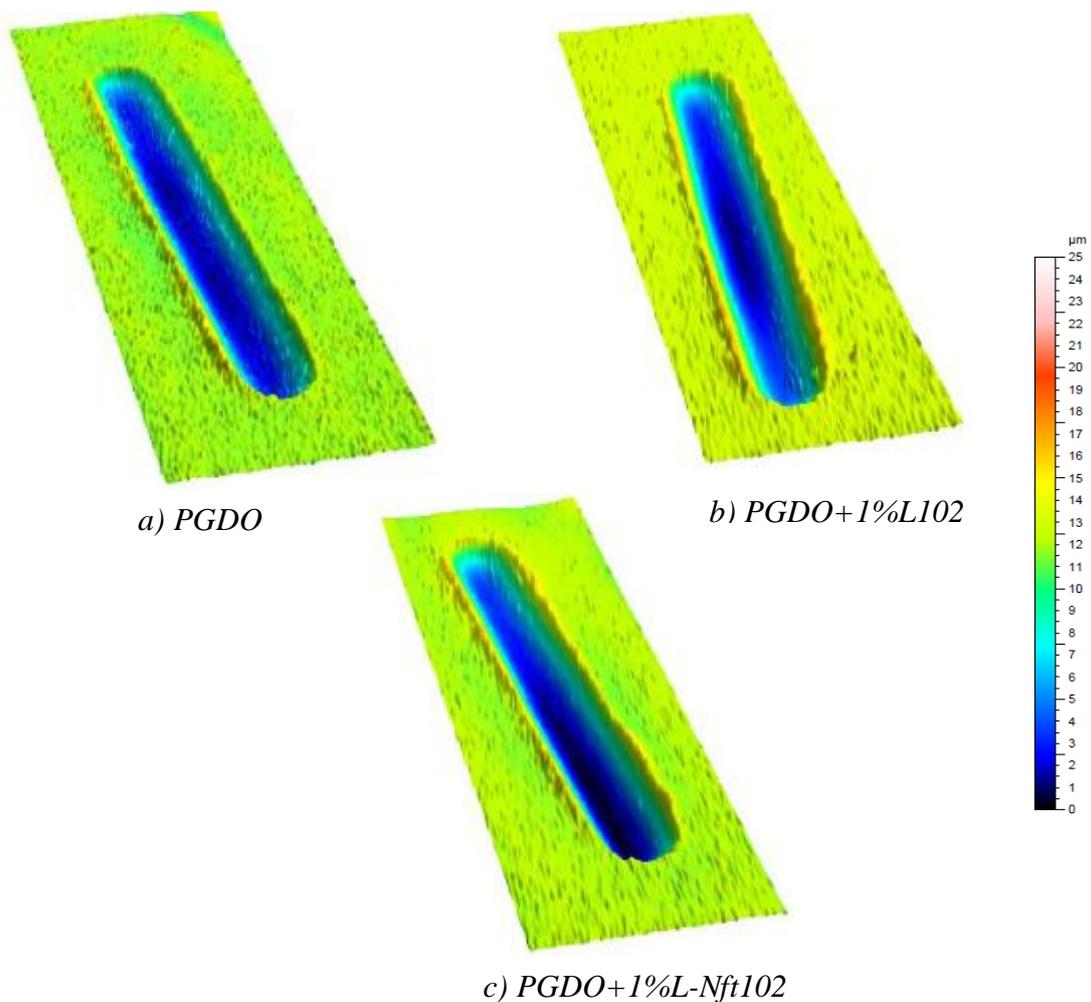


Figura III.36. Huellas de desgaste en el disco Al 2021

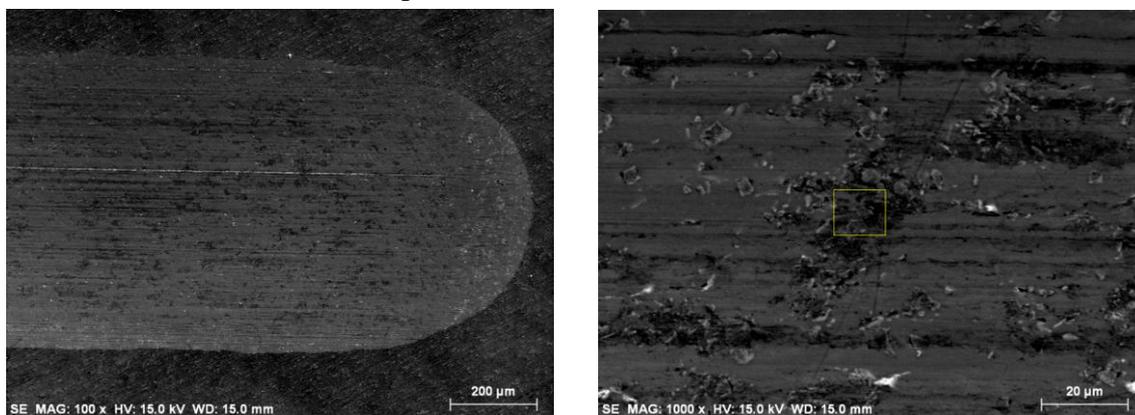
En la Figura III.36.b se observa como en la zona central la profundidad de la huella es mayor, debido probablemente a que el aditivo queda acumulado en los bordes de la huella debido al movimiento oscilante.

### 3.3.3. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio electrónico

Las huellas que se muestran a continuación han sido tomadas con el microscopio electrónico, que se explicó en el apartado 2.7 del Capítulo II

#### Huellas de desgaste con PGDO 1429

Se analizó la superficie de la huella tras el ensayo, obteniendo el espectro EDS que nos da idea de los elementos que la compone. Se observa la presencia de Aluminio, junto con Hierro y Cobre, que son elementos de la aleación del Al 2011. También se observa una oxidación en la superficie.



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.37. Micrografía SEM en el disco de Al 2011

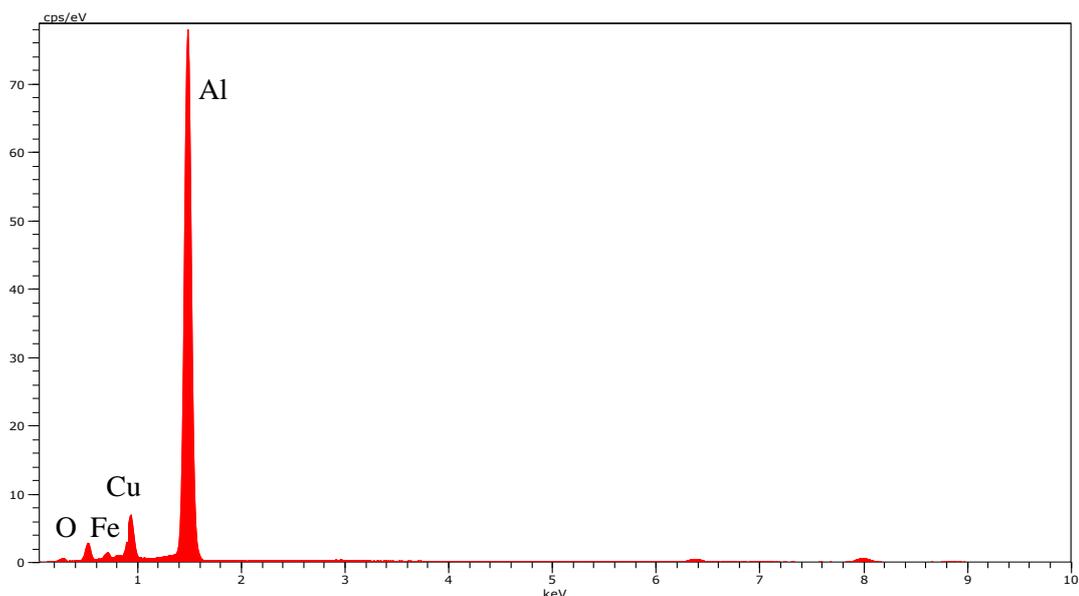
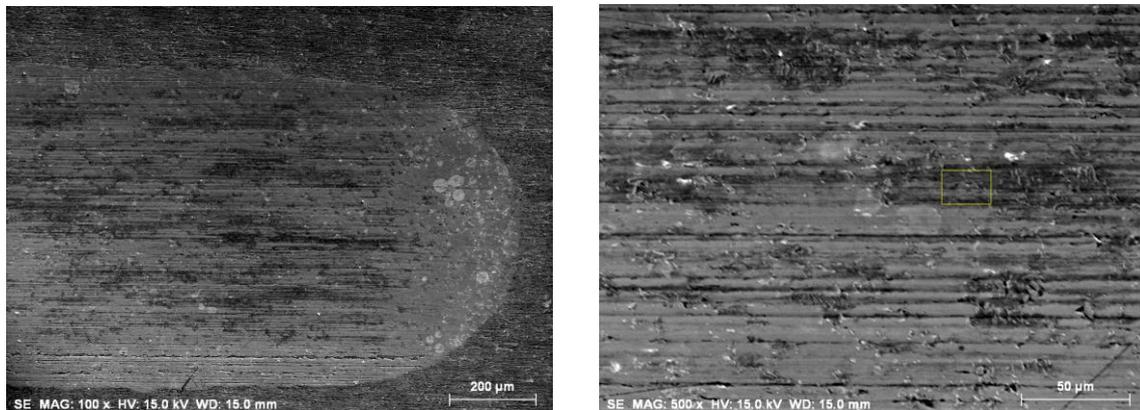


Figura III.38. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 2011

### **Huellas de desgaste con PGDO 1429+1%L102**

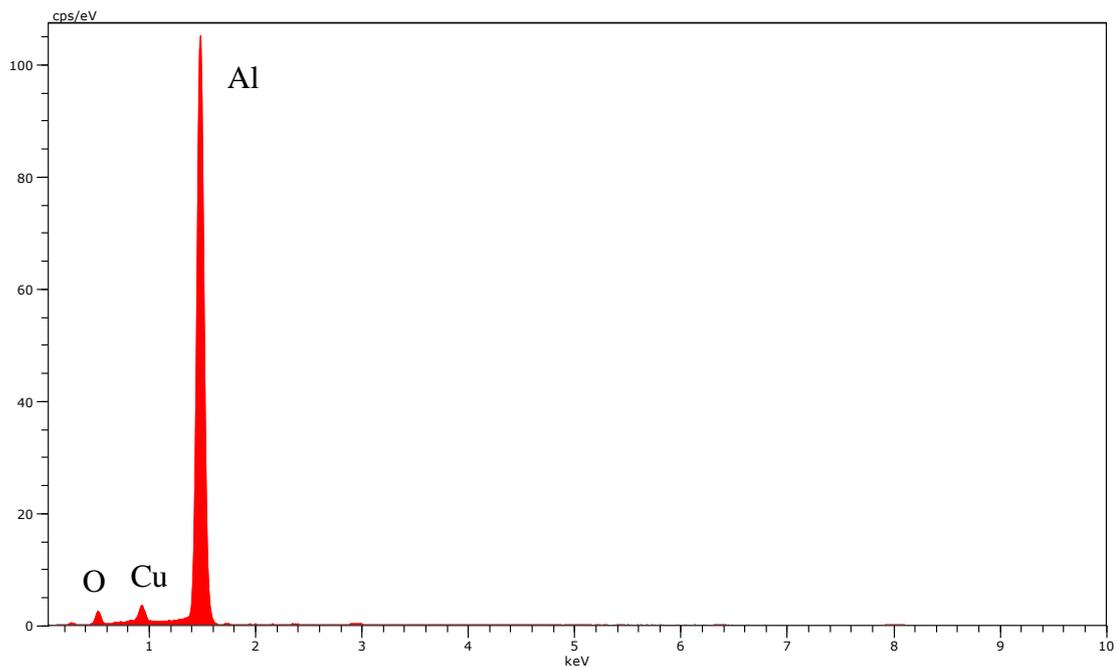
Para este nuevo lubricante obtenemos la siguiente huella, analizada con el microscopio electrónico:



*a) Extremo de la huella*

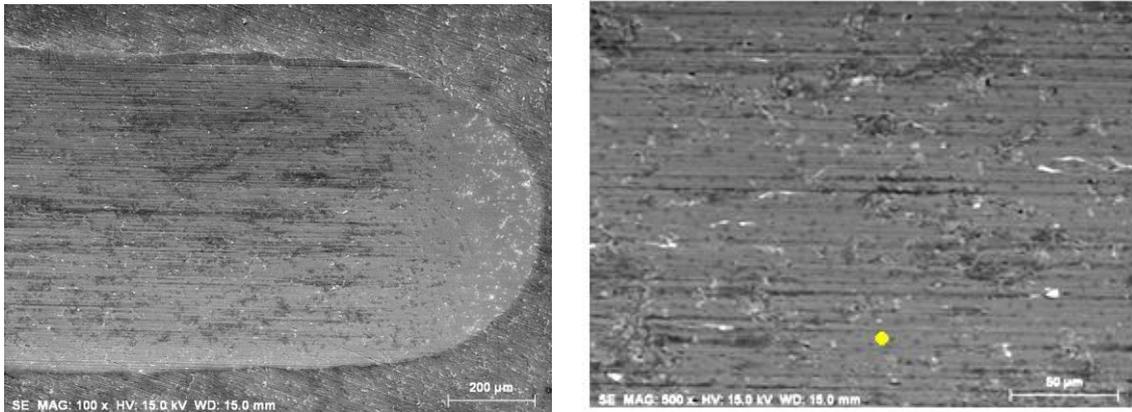
*b) Centro de la huella, con región analizada*

*Figura III.39. Micrografía SEM en el disco de Al 2011*



*Figura III.40. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 2011*

Huellas de desgaste con PGDO 1429+1%L-Ntf 102



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con punto analizado

Figura III.41. Micrografía SEM en el disco de Al 2011

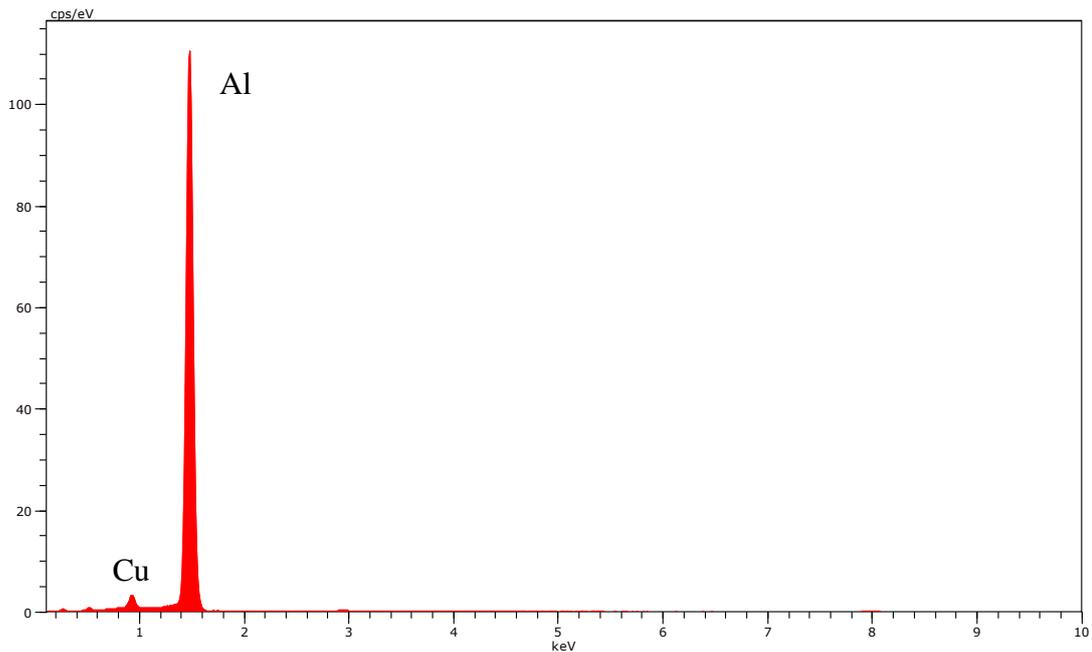


Figura III.42. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 2011

En la huella se aprecia una ligera oxidación de la superficie, pero el aspecto es similar en los tres casos: huellas pulidas, con signos de abrasión especialmente al usar los aditivos.

Se concluye entonces que para el Al 2011 los aditivos líquidos iónicos utilizados no son efectivos en este tipo de contacto lineal recíproco, ya que la inercia del movimiento parece provocar una acumulación del aditivo en los bordes de la huella provocando un aumento de fricción y del desgaste con respecto al lubricante puro.

### 3.4. Huella de desgaste de la bola de acero

A continuación se van a representar las huellas de desgaste del punzón de acero después de los ensayos realizados.

En la probeta de Al 2011 se obtienen los valores más bajos de desgaste con el PGDO puro que con el uso de aditivos.

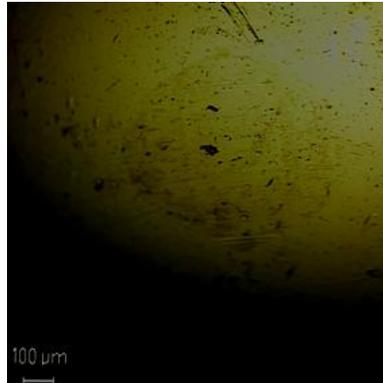
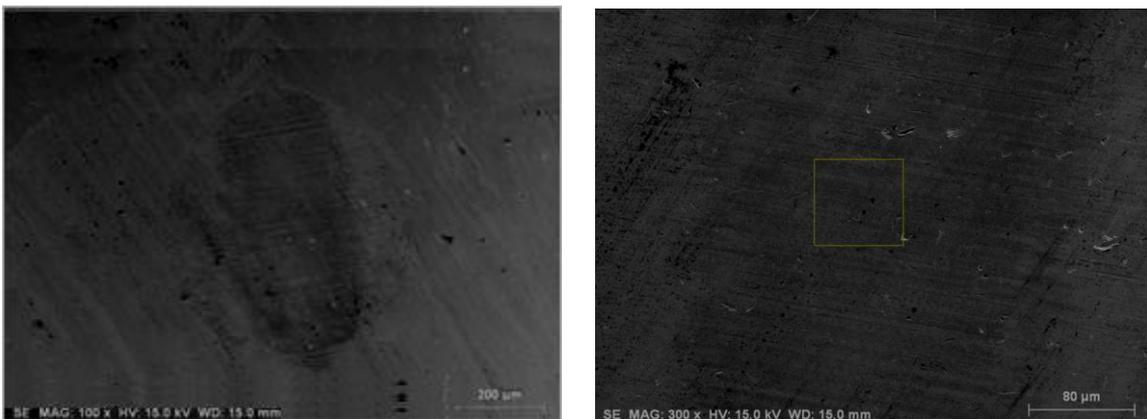


Figura III.43. Bola de acero después del ensayo del Al 2011 con PGDO



a) Huella de desgaste de la bola      b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.44. Micrografía SEM en la bola de acero después del ensayo con PGDO

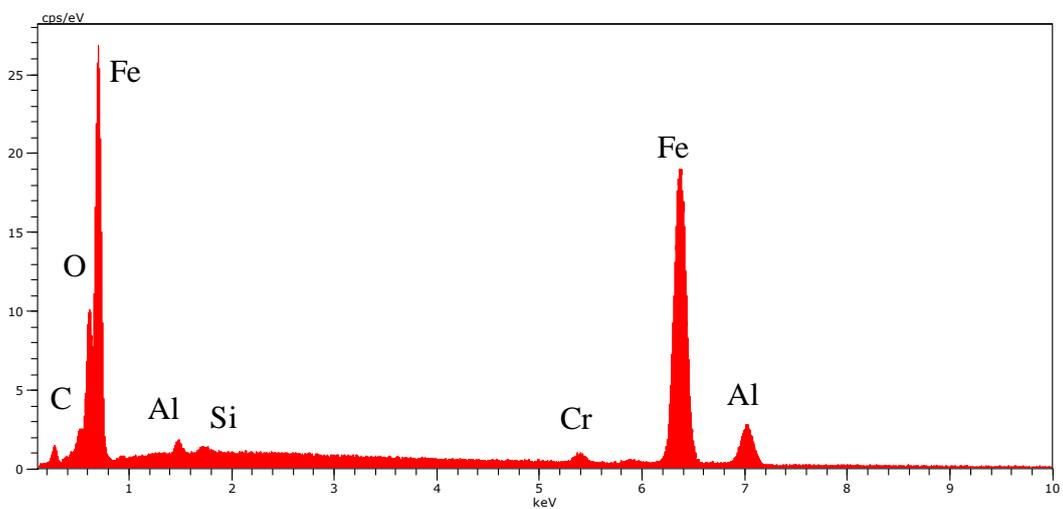
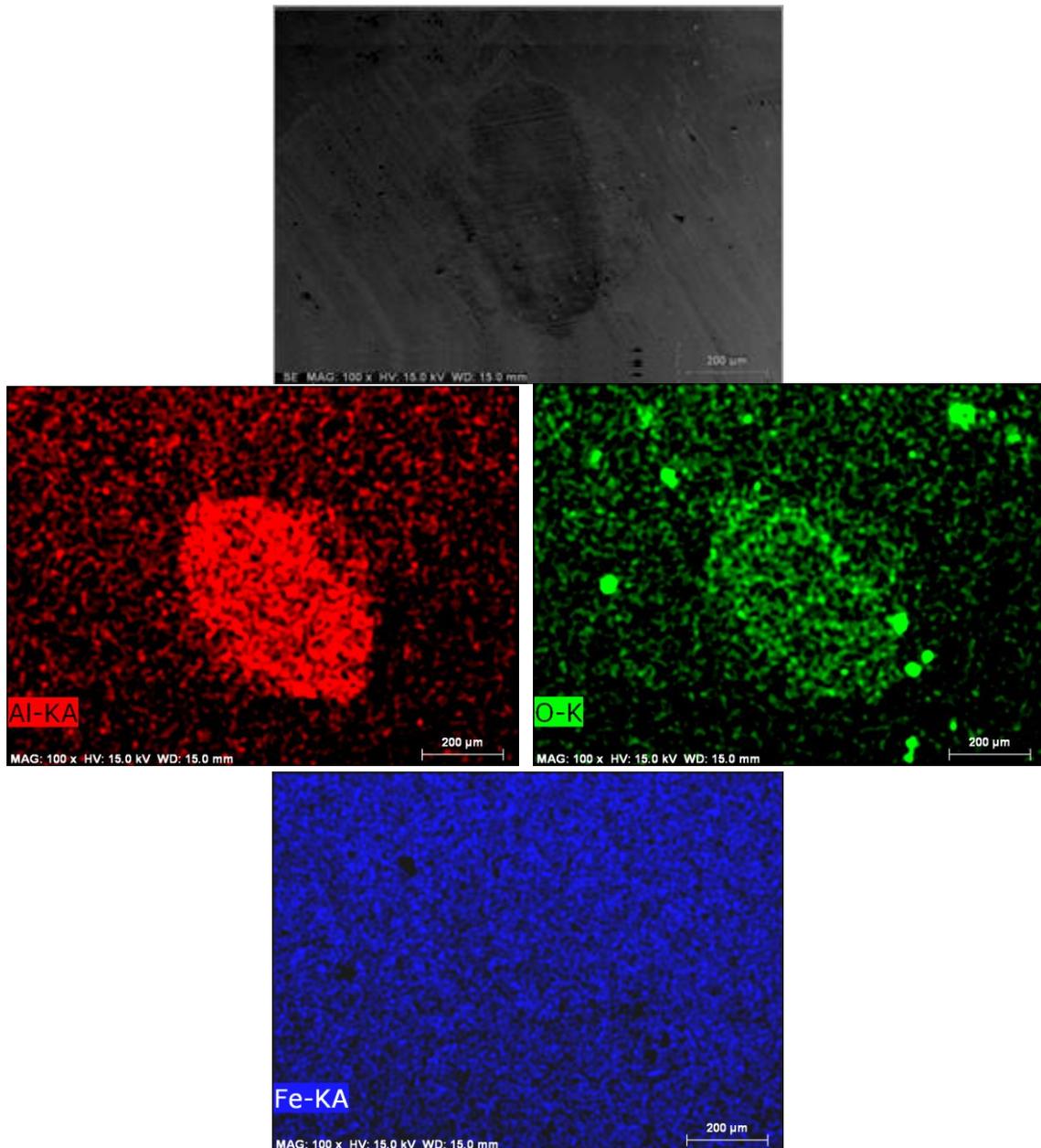


Figura III.45. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 2011 con PGDO puro



*Figura III.46. Mapa elemental de la tribocapa sobre la bola de acero*

En la bola de acero se observa que el hierro se encuentra distribuido uniformemente en la superficie del punzón. Por otro lado, también se encuentran partículas que forman parte de la aleación Al 2011, como son el Al y el Si.

Además, como era de esperar, la mayor concentración de Al aparece en la huella de la bola de acero.

Por tanto, se produce una pequeña adhesión de Al en la superficie de la bola.

Tabla III.6. Anchura y área de desgaste de la huella de Al 2011 para los lubricantes

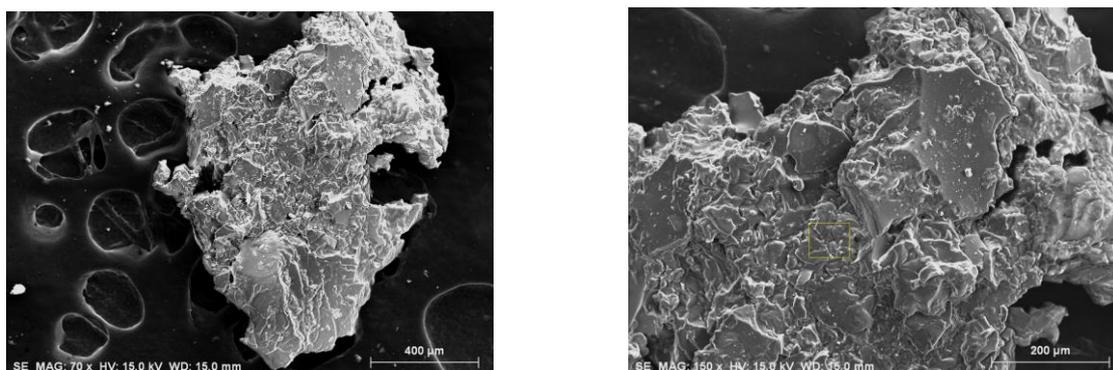
|                        | Anchura (mm) | Área (mm <sup>2</sup> ) |
|------------------------|--------------|-------------------------|
| <b>PGDO</b>            | 0,63         | 3,08                    |
| <b>PGDO+1%L102</b>     | 0,708        | 4,2                     |
| <b>PGDO+1%L-Nft102</b> | 0,688        | 3,4                     |

La bola de acero de la Figura III.43 presenta un área de desgaste de 0,12 mm<sup>2</sup> y una anchura de 0,61 mm. Por tanto, la anchura de la huella del aluminio tiene un valor similar a la huella de la bola de acero, pero el área de ésta es bastante menor que el área de desgaste que se produce en el Al 2011.

### 3.5. Partículas de desgaste en ensayos lubricados

Las partículas de desgaste procedentes de los ensayos lubricados son partículas orgánicas (ya que contienen carbono y oxígeno) con pequeñas trazas metálicas de aluminio, por lo que en realidad estamos tratando un residuo del lubricante.

Por tanto, no se analizarán las partículas de desgaste en este tipo de ensayos.



a) Partículas de desgaste

b) Análisis micrográfico de la región señalada

Figura III.47. Partículas de desgaste con lubricación

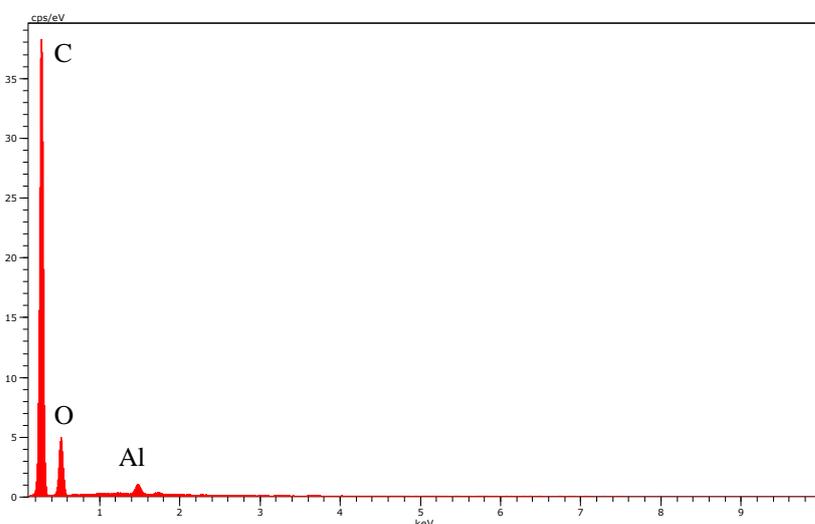


Figura III.48. Espectro EDS de las partículas de desgaste con lubricación

## 4. Ensayos de fricción y desgaste para Al 6061

Las probetas de Al 6061 se han ensayado en el tribómetro, de la misma forma en la que se realizaron los ensayos de Al 2011.

### 4.1. Resultados de fricción

Los coeficientes de fricción medios y la desviación típica para cada lubricante se muestran en la siguiente tabla:

Tabla III.7. Coeficientes de fricción Al 6061

|                     | EN SECO     | PGDO        | PGDO+1%L102 | PGDO+1%L-Ntf 102 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
| <b>Media</b>        | <b>0,78</b> | <b>0,15</b> | <b>0,13</b> | <b>0,14</b>      |
| <b>Desv. típica</b> | 0,076       | 0,00321     | 0,00995     | 0,003157         |

En este caso se puede observar como los aditivos disminuyen el valor medio de fricción.

En la Figura III.49 se muestra la evolución de la fricción en el Al 6061 en función de la distancia recorrida.

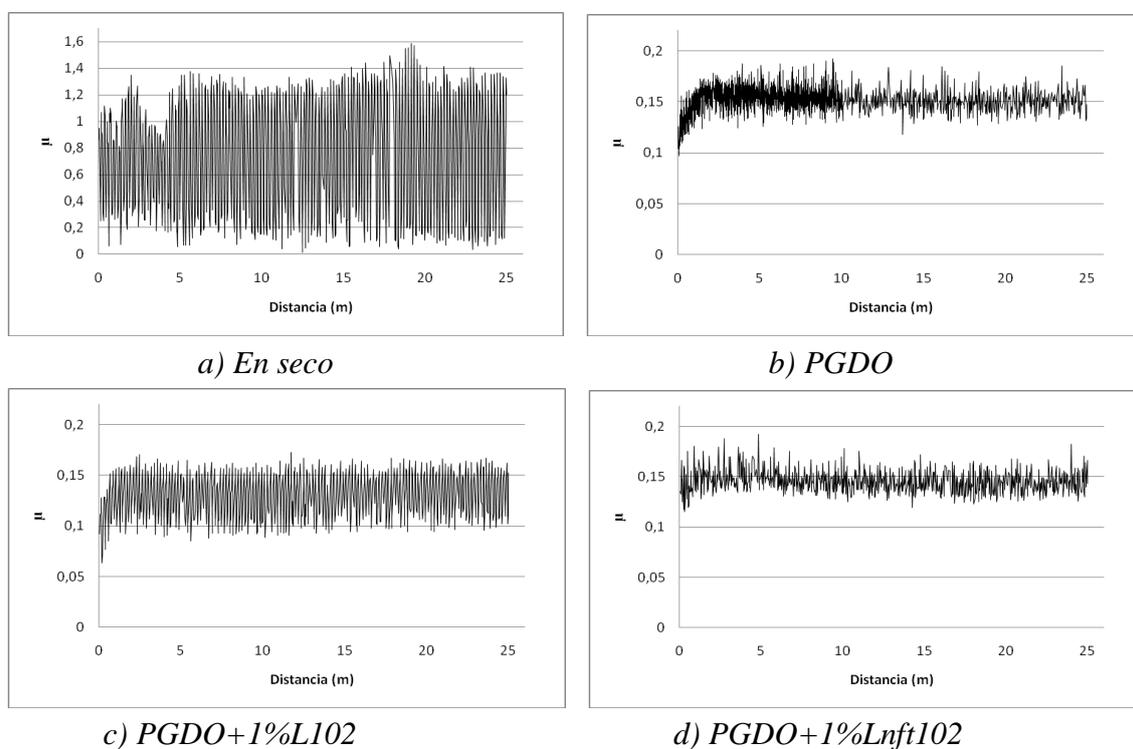


Figura III.49. Curva de fricción del Al 6061

La evolución de la fricción es similar en los tres lubricantes, produciéndose una estabilización a los pocos metros de inicio del ensayo.

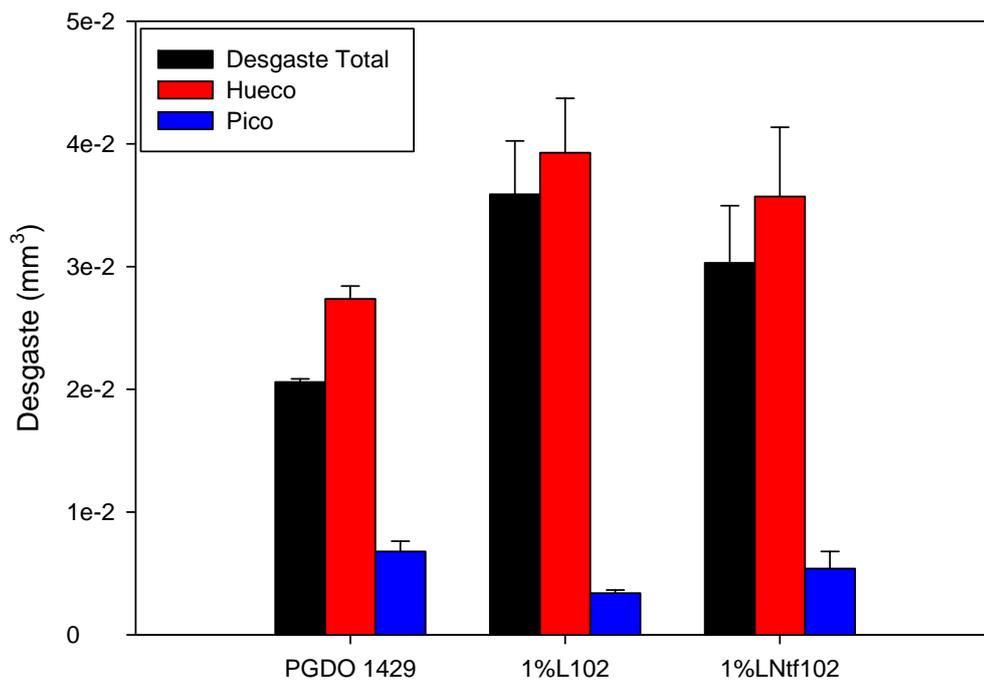
## 4.2. Resultados de desgaste

En la siguiente tabla se muestran los resultados de desgaste medios y la desviación típica teniendo en cuenta todos los ensayos realizados:

*Tabla III.8. Desgaste en mm<sup>3</sup> del Al 6061*

|                     | EN SECO     | PGDO                        | PGDO+1%L102                 | PGDO+1%L-Ntf 102            |
|---------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Media</b>        | <b>0,95</b> | <b>2,06·10<sup>-2</sup></b> | <b>3,59·10<sup>-2</sup></b> | <b>3,03·10<sup>-2</sup></b> |
| <b>Desv. típica</b> | 0,0325      | 2,47·10 <sup>-4</sup>       | 4,34·10 <sup>-3</sup>       | 4,66·10 <sup>-3</sup>       |

En la siguiente gráfica se representan la media y la desviación típica de los valores huecos, valores pico, y los valores de desgaste obtenidos en cada ensayo:



*Figura III.50. Media y desviación típica del Al 6061*

De nuevo, como para el Al 2011, el menor desgaste total es para el PGDO 1429 puro, aunque en esta ocasión la deformación (valor de “pico”) es mayor en el aceite puro que con los aditivos.

Además, al igual que en la aleación anterior, vuelve a obtenerse el mayor valor de desgaste cuando utilizamos un 1% L102 en el aceite.

### 4.3. Huellas de desgaste

#### 4.3.1. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio óptico.

En esta ocasión se puede observar una mayor deformación en los bordes de la huella de la aleación 6061, con respecto a la 2011, probablemente debido a su menor resistencia mecánica.

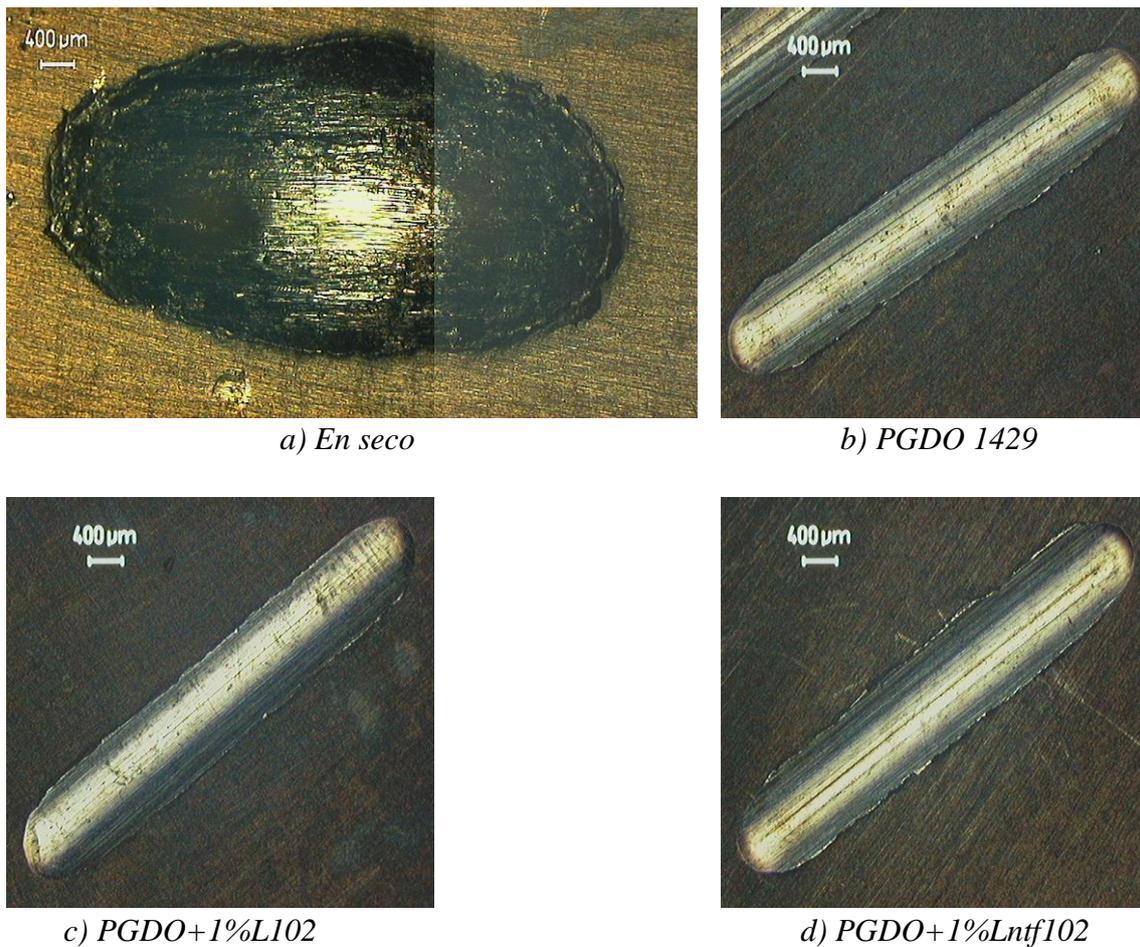


Figura III.51. Huellas representativas para cada ensayo del Al 6061

#### 4.3.2. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el perfilómetro

En la Figura III.52 se muestra la huella de desgaste en seco del Al 6061:

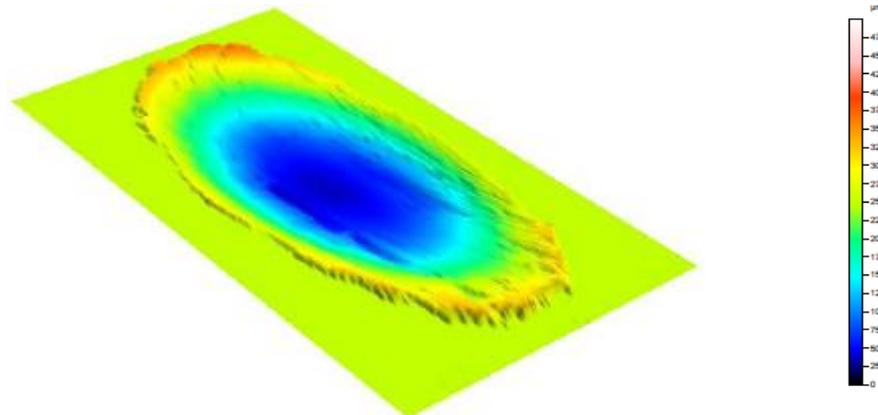


Figura III.52. Huella de desgaste del Al 6061 en seco

En la Figura III.53 se muestran las huellas de desgaste en contacto con Al 6061 y los distintos lubricantes

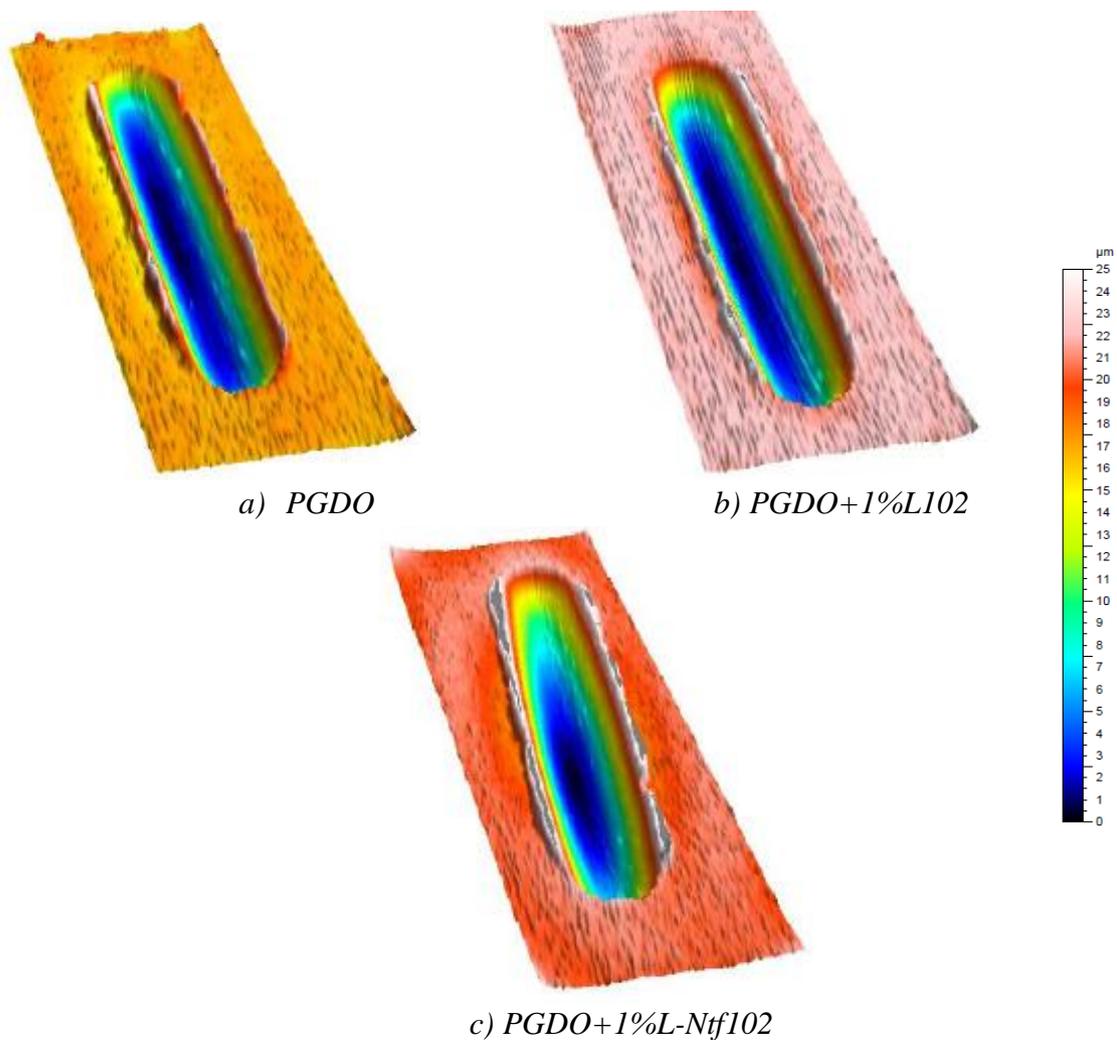


Figura III.53. Huellas de desgaste en el disco Al 6061

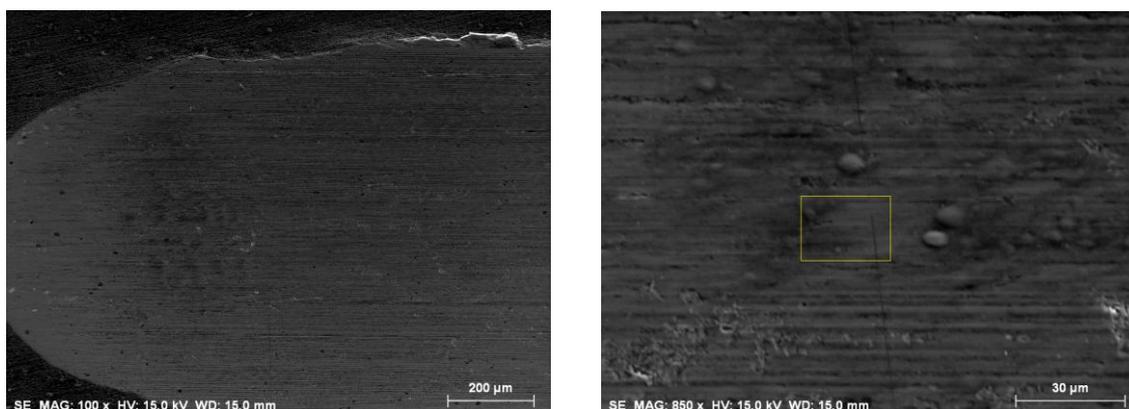
En las tres imágenes se observa que la mayor profundidad se localiza en el centro de la huella.

#### 4.3.3. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio electrónico

Las huellas que se muestran a continuación han sido tomadas con el microscopio electrónico:

##### Huellas de desgaste con PGDO 1429

Las siguientes imágenes muestran las huellas de desgaste producidas sobre la probeta de Al 6061 usando como lubricante el aceite puro PGDO 1429



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.54. Micrografía SEM en el disco de Al 6061

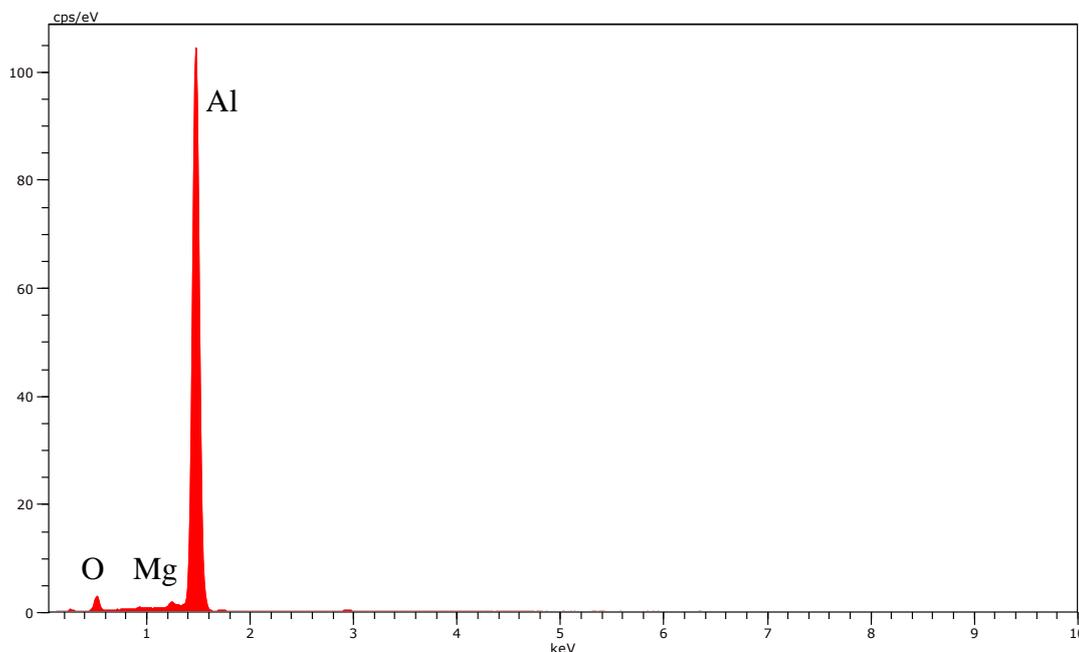


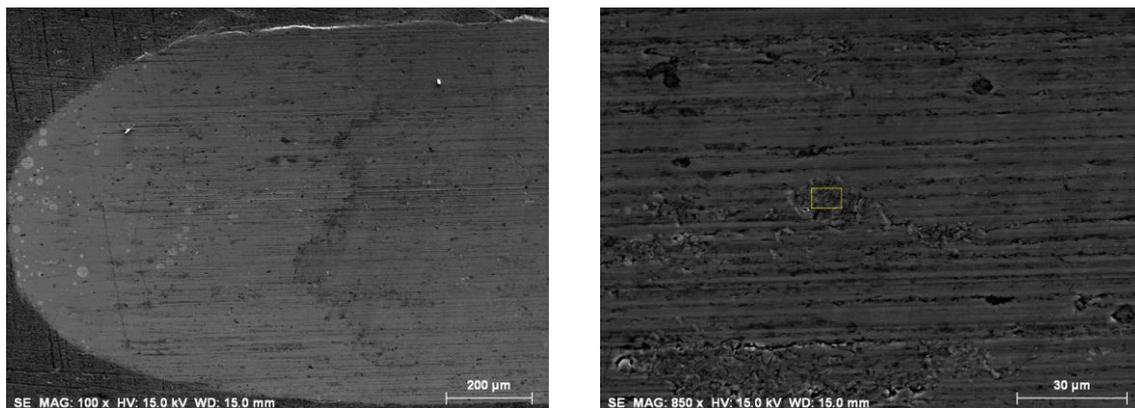
Figura III.55. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 6061

Se observa la presencia de Aluminio, que junto con el Magnesio, da lugar a la composición química de la aleación Al 6061, como vimos en el Capítulo II de este trabajo.

También tenemos la presencia de óxidos de aluminio.

### Huellas de desgaste con PGDO 1429+1%L102

En la Figura III.56 se muestra la micrografía de la huella de desgaste usando ahora este nuevo lubricante



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.56. Micrografía SEM en el disco de Al 6061

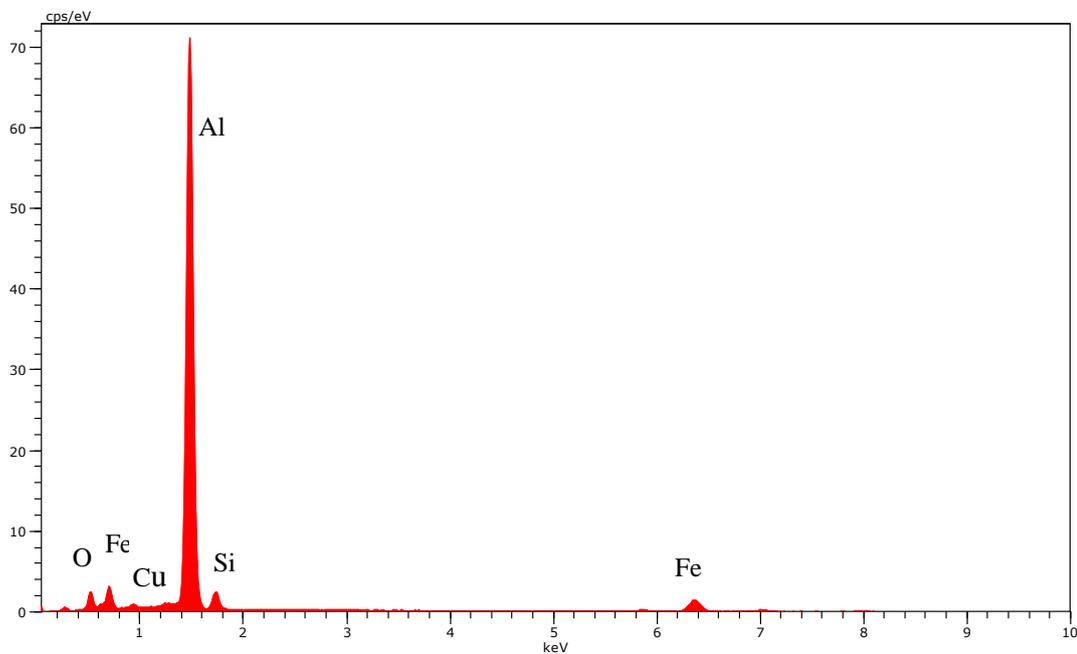
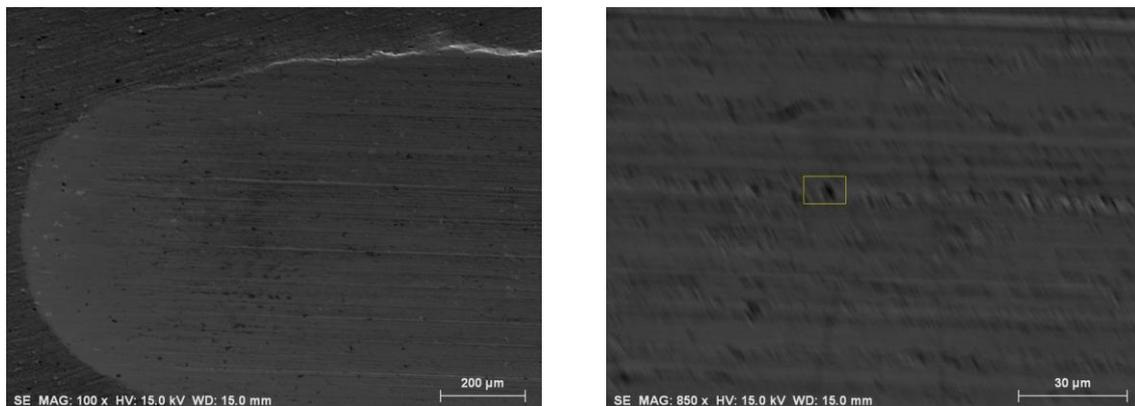


Figura III.57. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 6061

Ahora se obtienen algunos picos de Hierro, Silicio y Cobre, además de la presencia de óxido.

Huellas de desgaste con PGDO 1429+1%L-Ntf 102



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.58. Micrografía SEM en el disco de Aluminio

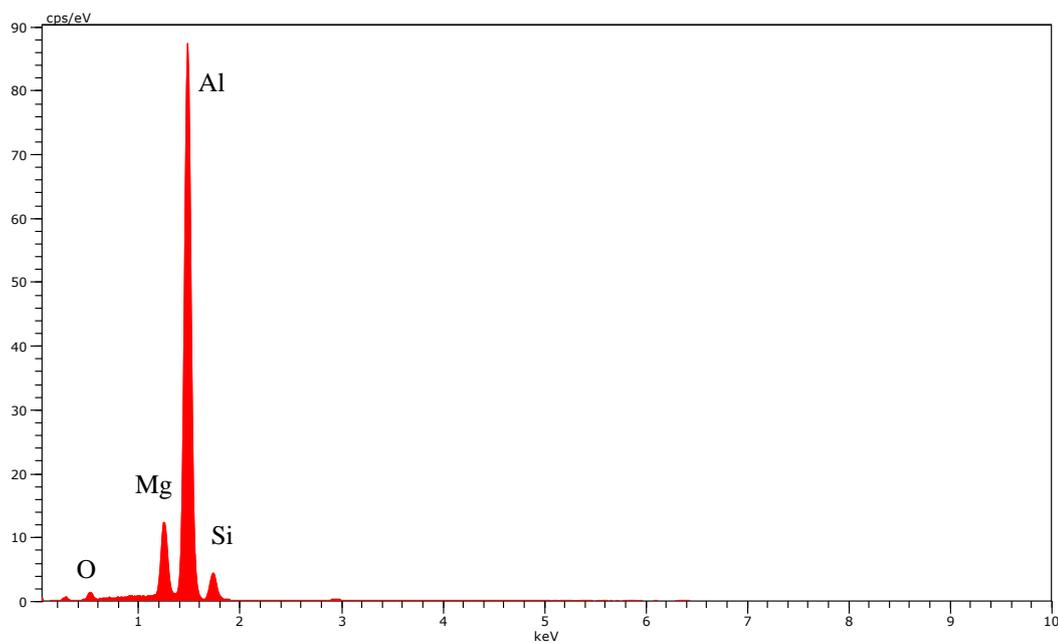


Figura III.59. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 6061

Podemos concluir afirmando que en las tres huellas se observa la presencia de óxidos de aluminio, así como de otros elementos que forman parte de la aleación 6061, como el Si, Mg, Cu y Fe.

#### 4.4. Huella de desgaste de la bola de acero

En la probeta de Al 6061, al igual que en la aleación Al 2011, el uso de los aditivos de cadena corta también aumentan el valor de desgaste.

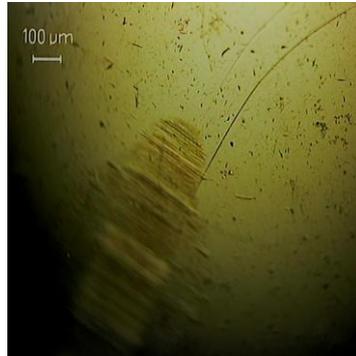
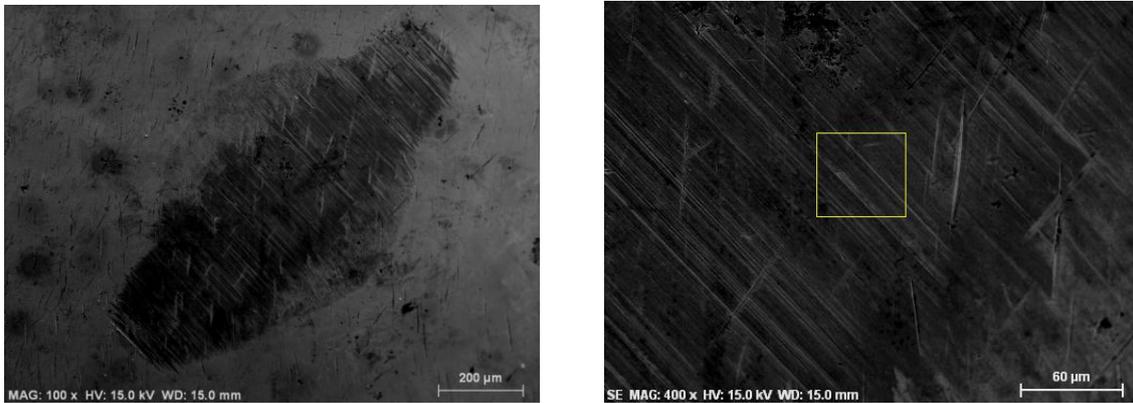


Figura III.60. Bola de acero después del ensayo del Al 6061 con PGDO+1%L102



a) Huella de desgaste de la bola

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.61. Micrografía SEM en la bola después del ensayo con PGDO+1%L102

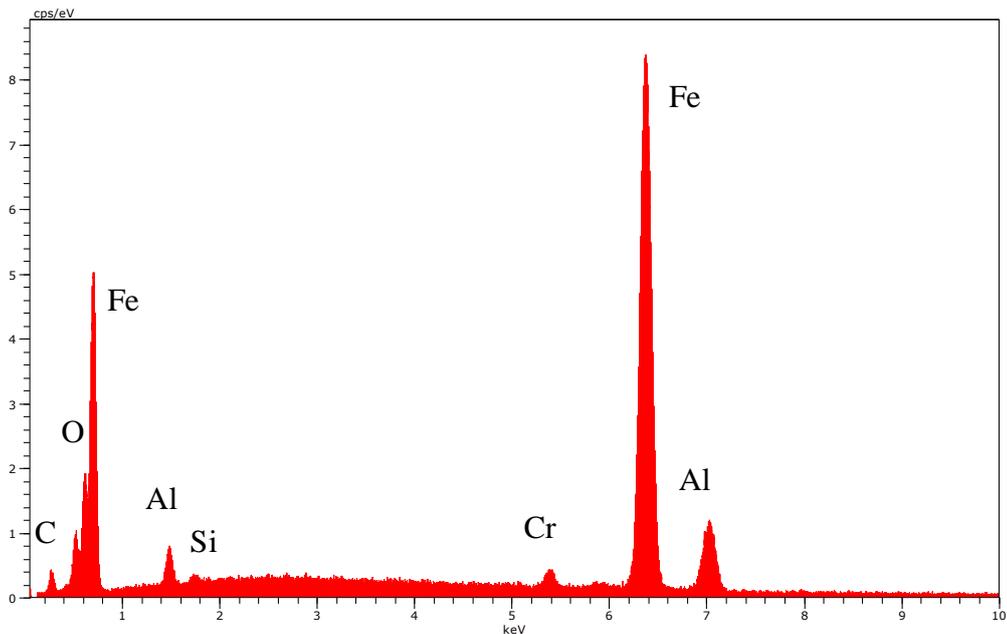
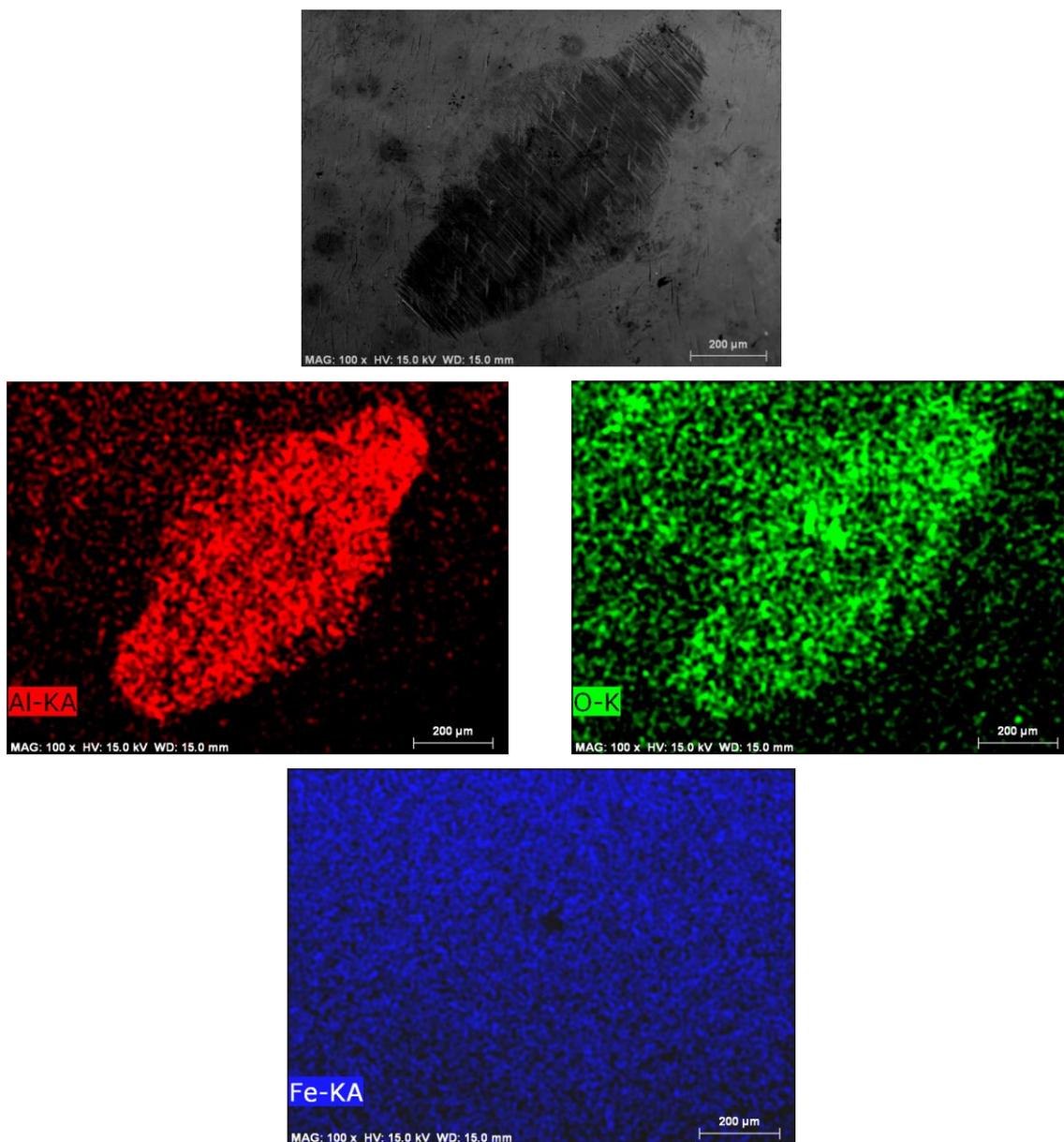


Figura III.62. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 6061 con PGDO+1%L102



*Figura III.63. Mapa elemental de la tribocapa sobre la bola de acero*

Se produce una pequeña adhesión de partículas de aluminio en la bola de acero.

*Tabla III.9. Anchura y área de desgaste de la huella de Al 6061 para los lubricantes*

|                        | Anchura (mm) | Área (mm <sup>2</sup> ) |
|------------------------|--------------|-------------------------|
| <b>PGDO</b>            | 0,85         | 4,16                    |
| <b>PGDO+1%L102</b>     | 0,85         | 4,2                     |
| <b>PGDO+1%L-Nft102</b> | 0,86         | 4,22                    |

La bola de acero de la Figura III.60 presenta un área de desgaste de 0,2 mm<sup>2</sup> y una anchura de 0,72 mm. Por tanto, la anchura de la huella del aluminio es superior a la de la bola, pero el área de ésta es bastante menor que el área de desgaste que se produce en el Al 6061.

## 5. Ensayos de fricción y desgaste para Al 7075

El Al 7075 se ha ensayado de la misma forma que las aleaciones anteriores.

### 5.1. Resultados de fricción

Los valores medios de fricción y la desviación típica para el Al 7075:

Tabla III.10. Coeficientes de fricción del Al 7075

|                     | EN SECO     | PGDO        | PGDO+1%L102 | PGDO+1%L-Ntf 102 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
| <b>Media</b>        | <b>0,56</b> | <b>0,17</b> | <b>0,16</b> | <b>0,16</b>      |
| <b>Desv. típica</b> | 0,054       | 0,0168      | 0,01013     | 0,006122         |

Con el empleo de los aditivos se obtienen valores de fricción más pequeños que con el aceite puro.

La evolución de la fricción en el Al 7075 en función de la distancia recorrida:

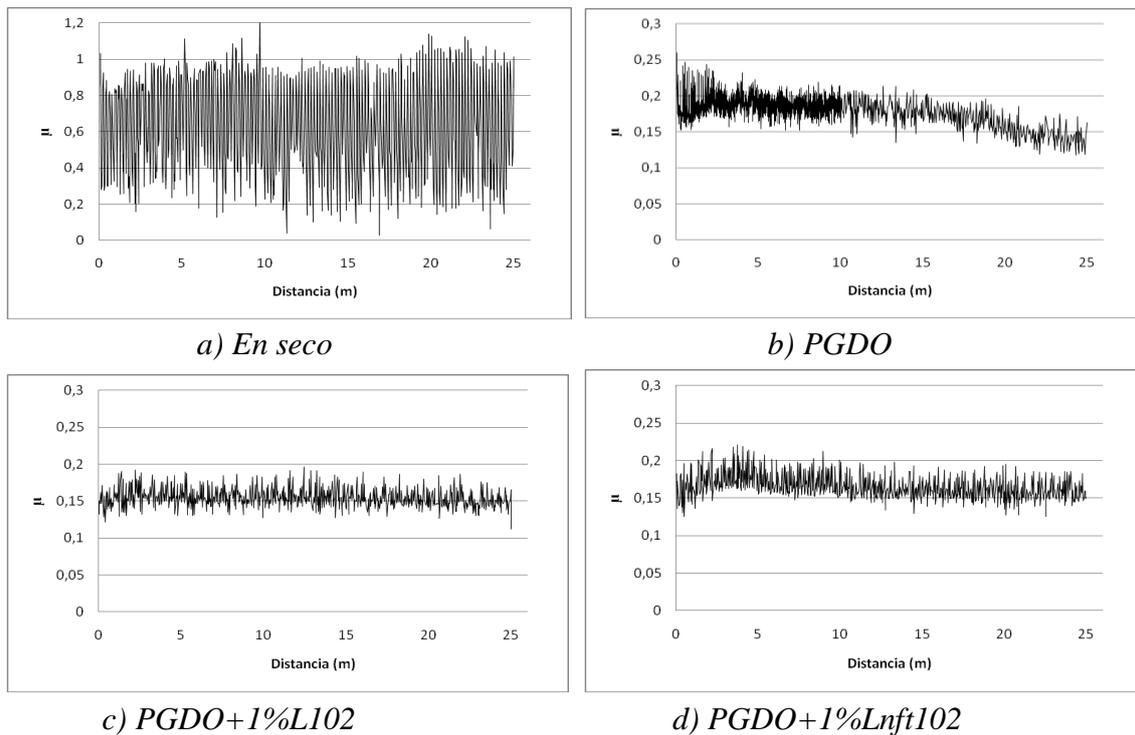


Figura III.64. Curva de fricción del Al 7075

Para el PGDO puro volvemos a obtener una curva de fricción más inestable, con un periodo inicial de mayor valor para luego disminuir. Al usar los aditivos la curva se vuelve más estable.

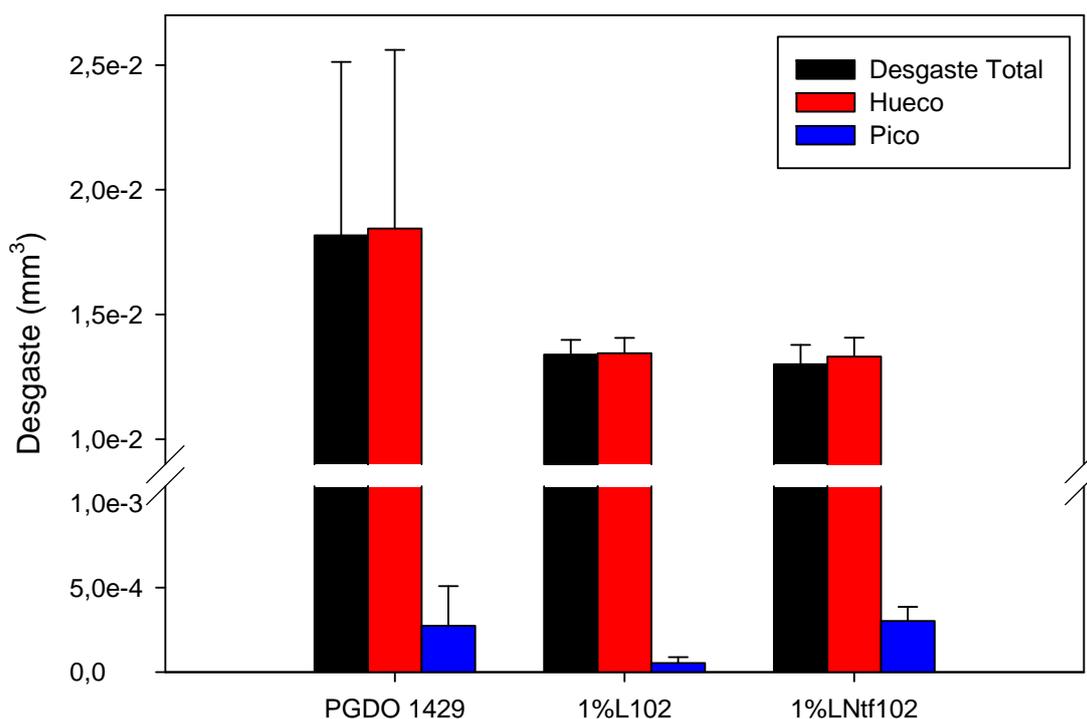
## 5.2. Resultados de desgaste

En la tabla III.11 se muestran los resultados de desgaste obtenidos para cada lubricante:

*Tabla III.11. Desgaste en mm<sup>3</sup> del Al 7075*

|                     | EN SECO     | PGDO                        | PGDO+1%L102                 | PGDO+1%L-Ntf 102            |
|---------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Media</b>        | <b>1,57</b> | <b>1,82·10<sup>-2</sup></b> | <b>1,34·10<sup>-2</sup></b> | <b>1,30·10<sup>-2</sup></b> |
| <b>Desv. típica</b> | 0,31        | 6,95·10 <sup>-3</sup>       | 5,86·10 <sup>-4</sup>       | 7,7·10 <sup>-4</sup>        |

En la siguiente gráfica se representan la media y la desviación típica de los valores huecos, valores pico, y los valores de desgaste obtenidos en cada ensayo:



*Figura III.65. Media y desviación típica del Al 7075*

Coincidiendo con la aleación de mayor resistencia mecánica, el Al 7075, podemos ver en la gráfica como la adición de los aditivos disminuye la tasa de desgaste.

Además, el valor de pico que representa la deformación es mucho menor que para las otras dos aleaciones de Aluminio.

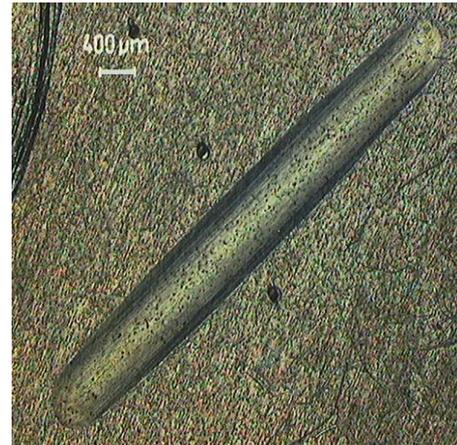
### 5.3. Huellas de desgaste

#### 5.3.1. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio óptico.

Las tres huellas representativas tomadas con el microscopio óptico se representan a continuación:



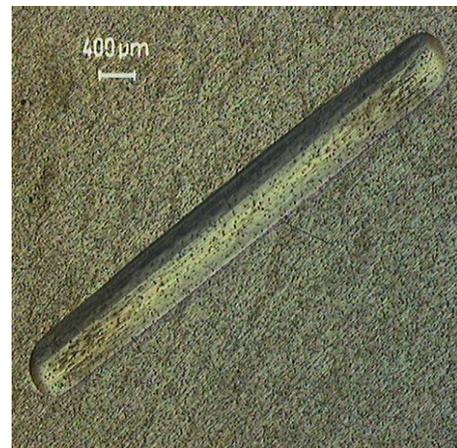
a) *En seco*



b) *PGDO 1429*



c) *PGDO+1%L102*



d) *PGDO+1%Lntf102*

*Figura III.66: Huellas representativas para cada ensayo del Al 7075*

### 5.3.2. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el perfilómetro

La huella de desgaste en seco producida en el Al 7075:

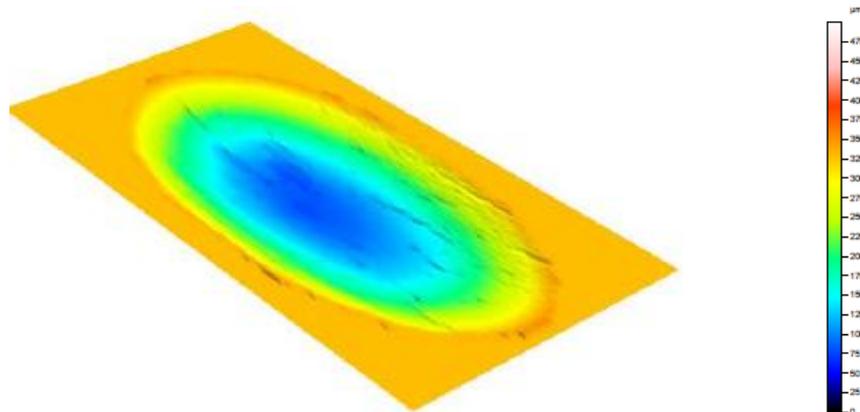


Figura III.67. Huella de desgaste en seco del Al 7075

En la Figura III.68 se muestran las huellas de desgaste en contacto con Al 7075 y los distintos lubricantes.

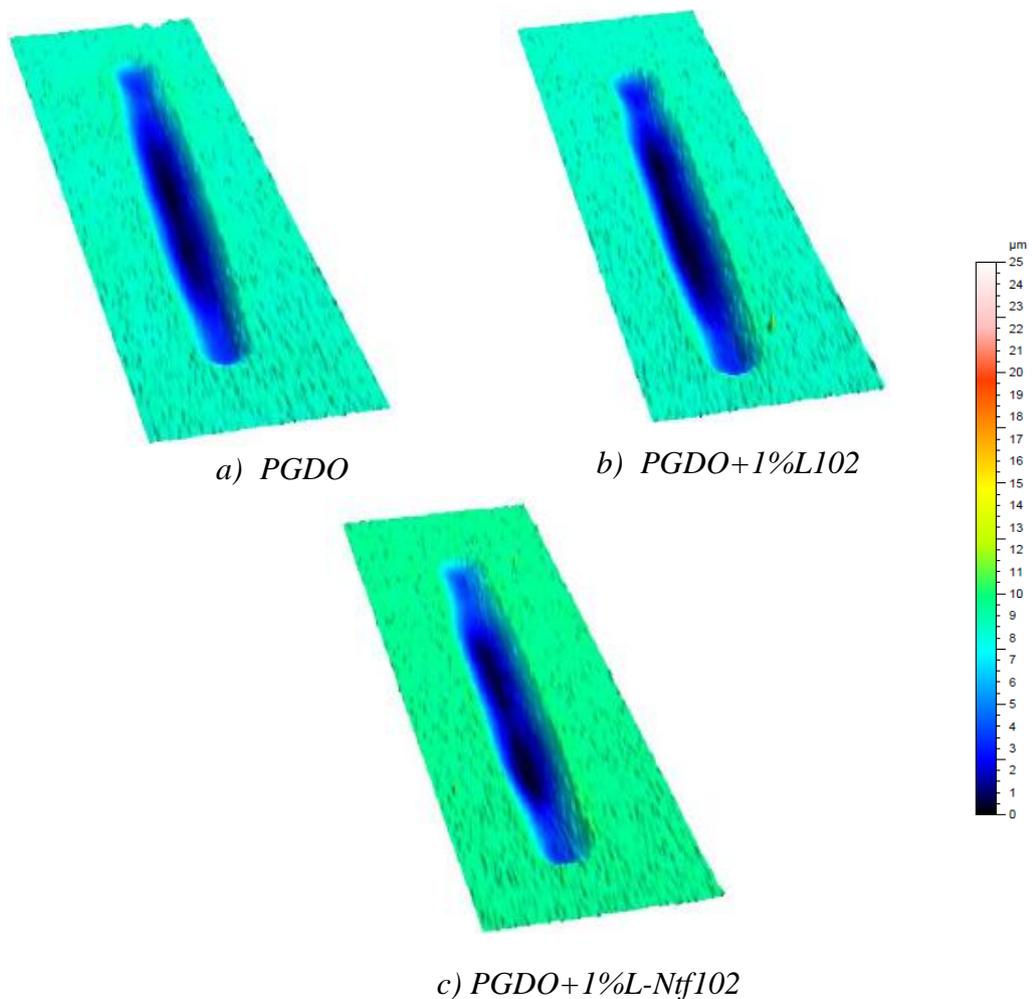


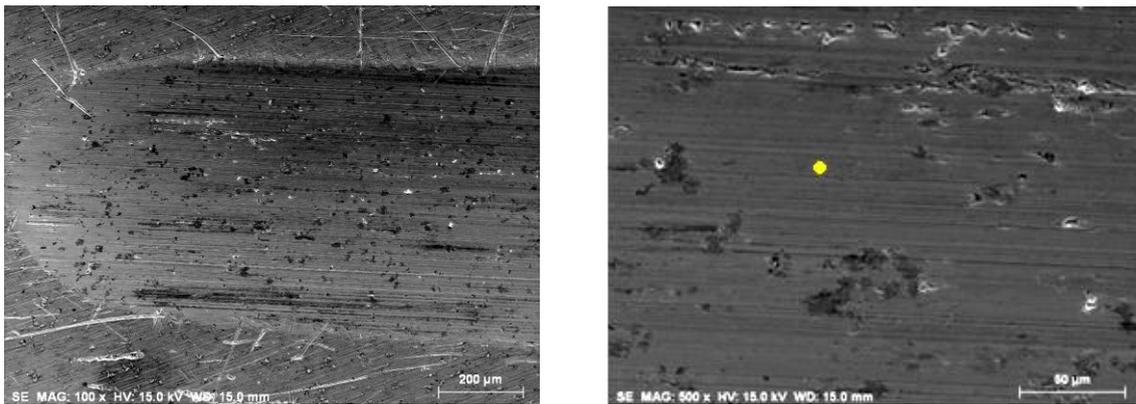
Figura III.68. Huellas de desgaste en el disco Al 7075

Se obtienen tres huellas muy parecidas, y casi no se aprecia la cantidad de materia acumulada en los bordes de la huella, por lo que los valores pico en las tres aleaciones es casi nulo, como se puede ver en la Figura III.68.

Además, se puede apreciar una mayor anchura de la huella en la parte central, donde la frecuencia de paso de la bola es el doble que en los extremos.

### 5.3.3. Huellas de desgaste sobre el Aluminio con el microscopio electrónico

#### Huellas de desgaste con PGDO 1429



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con punto analizado

Figura III.69. Micrografía SEM en el disco de Aluminio

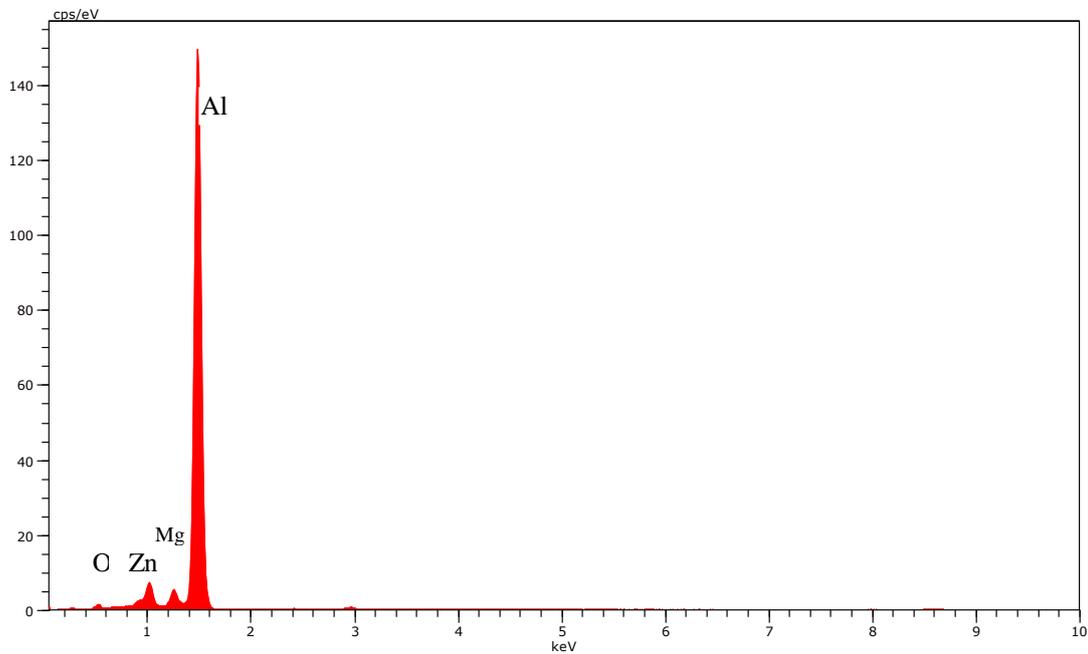
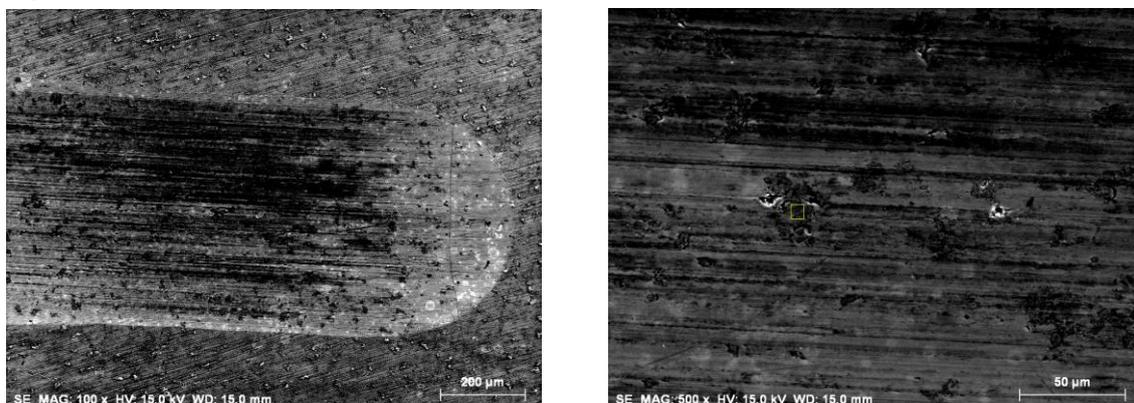


Figura III.70. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 7075

En esta nueva aleación se obtiene también óxido de aluminio, además otros elementos que componen el Al 7075, como el Zn y el Mg.

### Huellas de desgaste con PGDO 1429+1%L102

Con este nuevo lubricante obtenemos en el microscopio electrónico los siguientes resultados:



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.71. Micrografía SEM en el disco de Aluminio

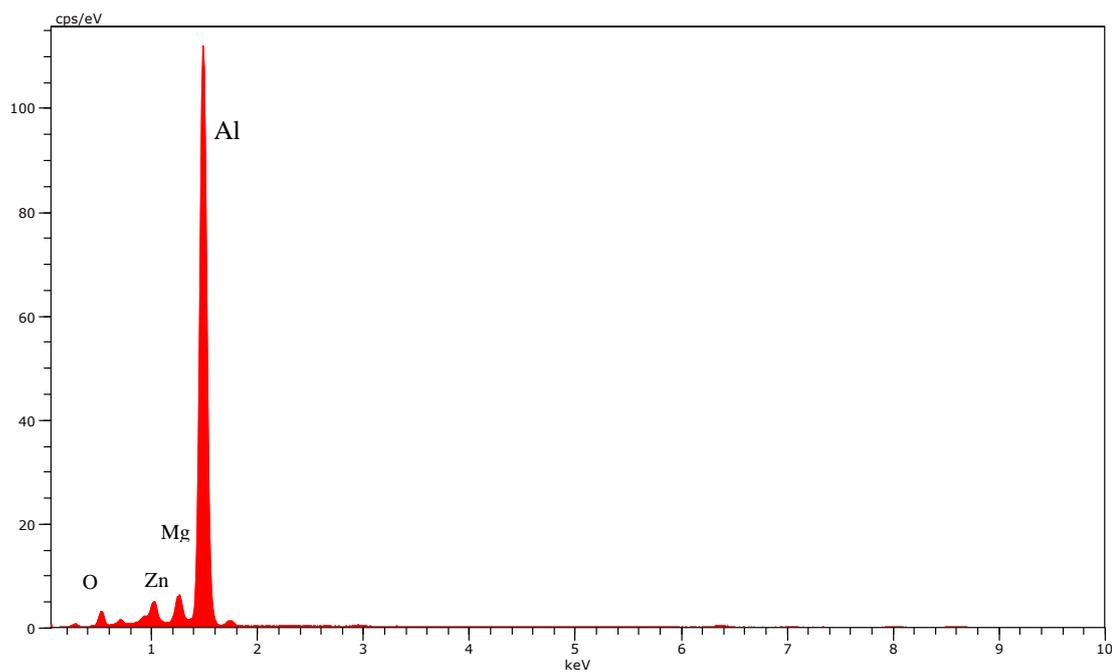
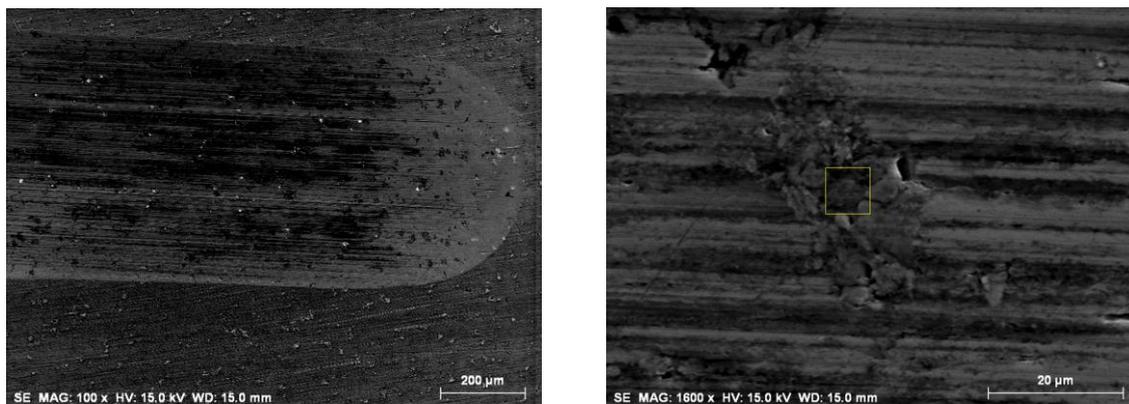


Figura III.72. Espectro EDS de la huella en el disco de Al

Se obtienen resultados muy parecidos a la aleación anterior.

### Huellas de desgaste con PGDO 1429+1%L-Ntf 102



a) Extremo de la huella

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.73. Micrografía SEM en el disco de Al 7075

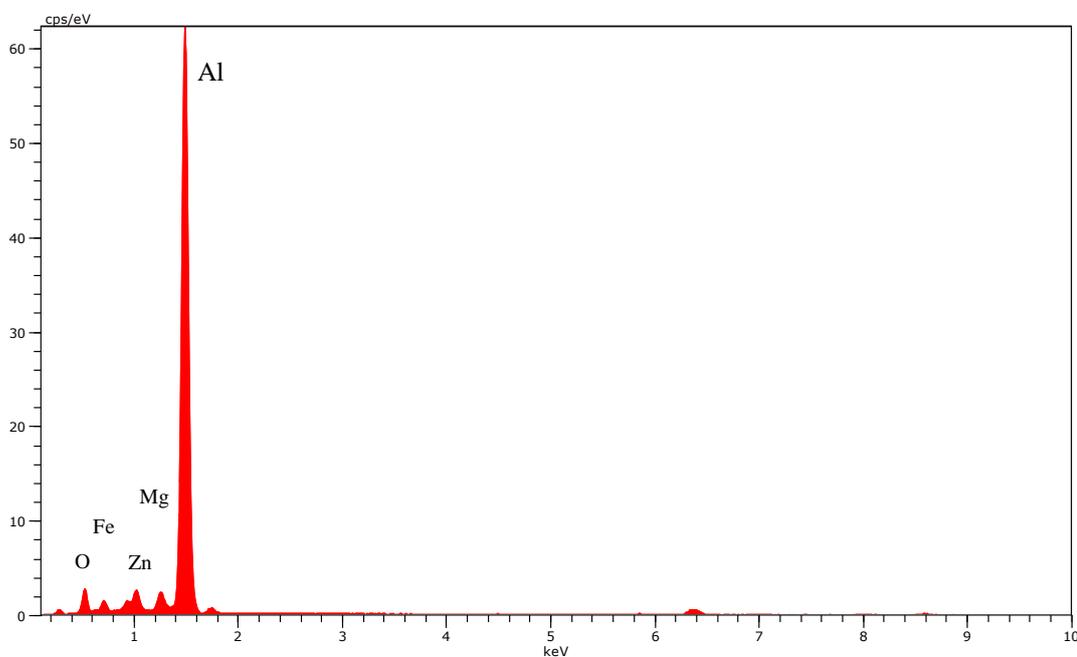


Figura III.74. Espectro EDS de la huella en el disco de Al 7075

En las tres huellas se presenta un análisis elemental similar, con óxido de aluminio y los elementos de la aleación, aunque con los aditivos se observa una mayor oxidación superficial.

La disminución del desgaste puede deberse a la interacción del aditivo con la superficie de la aleación, provocando una mayor oxidación y una disminución del desgaste.

#### 5.4. Huella de desgaste de la bola de acero para Al 7075

Con la aleación Al 7075, que es la más dura, ya que presenta mayor valor de resistencia a la tracción que las otras aleaciones, la adición de un 1% de LI de cadena corta en el aceite reduce el desgaste.

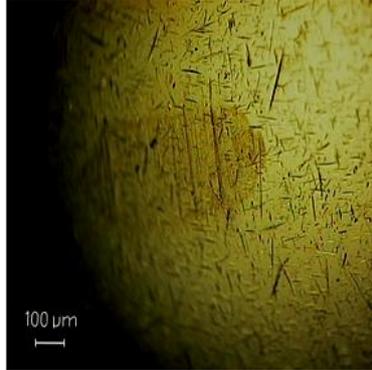
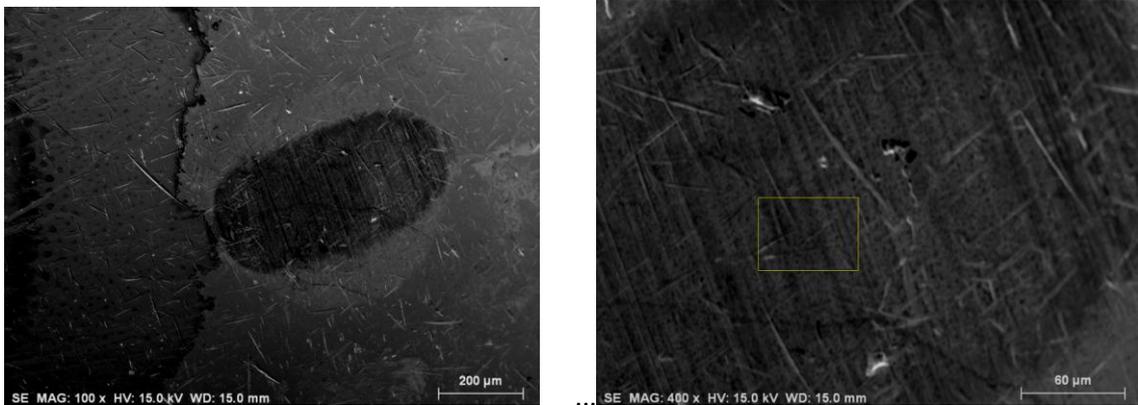


Figura III.75. Bola de acero después del ensayo del Al 7075 con PGDO+1%L-Ntf102



a) Huella de desgaste de la bola

b) Centro de la huella, con región analizada

Figura III.76. Micrografía bola después del ensayo del Al 7075 PGDO+1%L-Ntf102

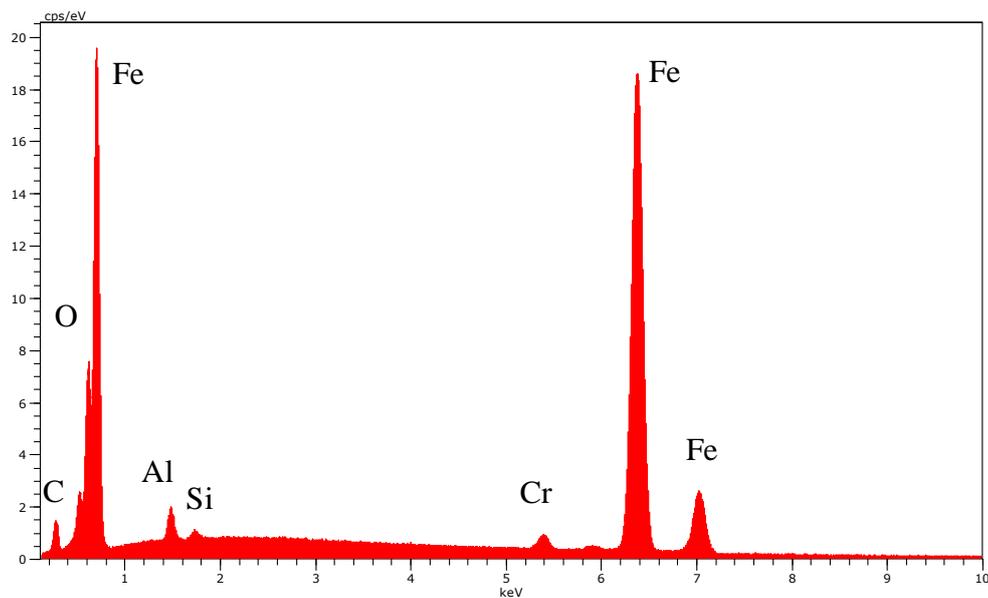
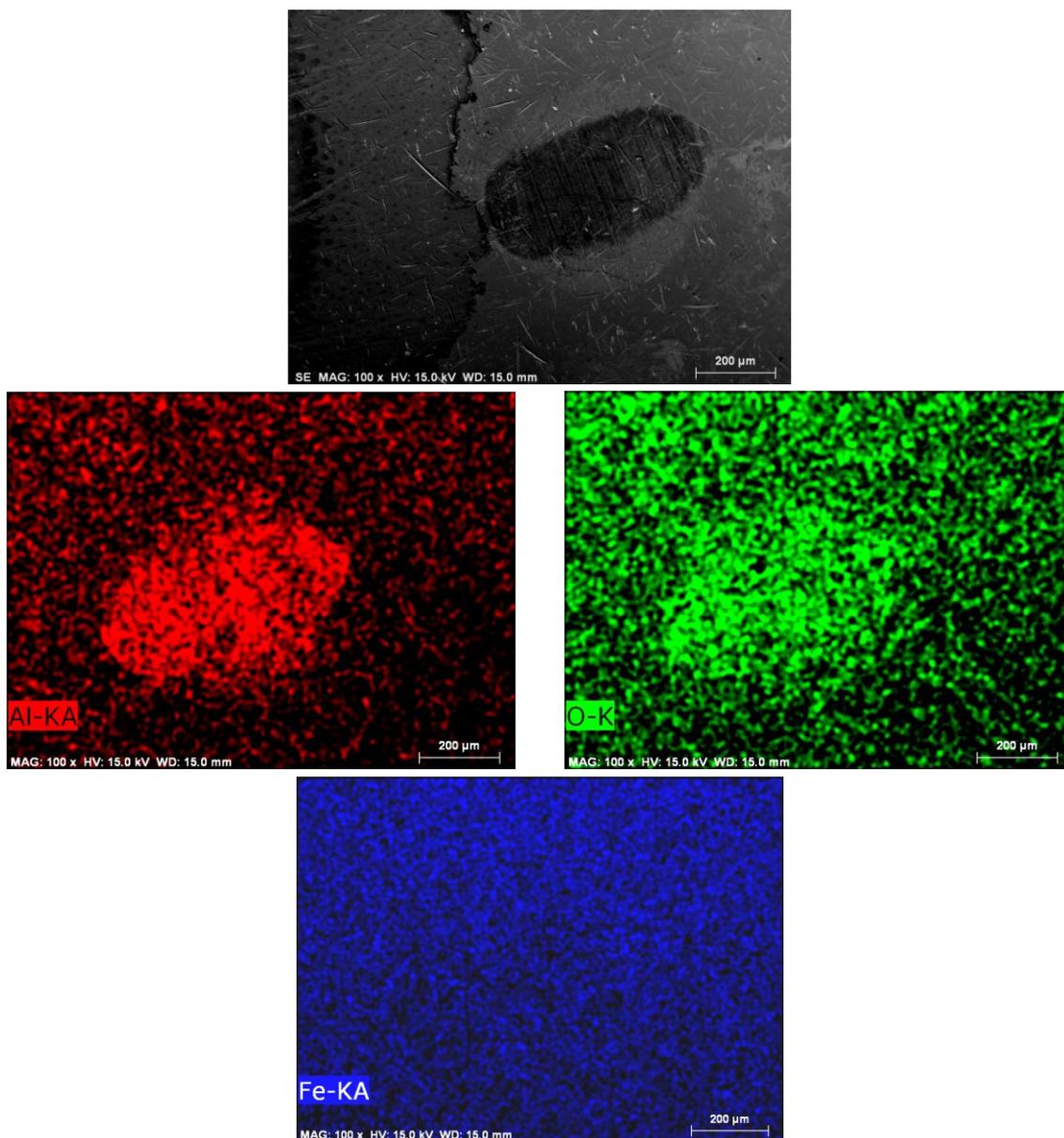


Figura III.77. Espectro EDS de la huella en disco de Al 7075 con PGDO+1%L-Ntf102



*Figura III.78. Mapa elemental de la tribocapa sobre la bola de acero*

Se produce el mismo fenómeno de adhesión que en las aleaciones anteriores.

*Tabla III.12. Anchura y área de desgaste de la huella de Al 6061 para los lubricantes*

|                        | Anchura (mm) | Área (mm <sup>2</sup> ) |
|------------------------|--------------|-------------------------|
| <b>PGDO</b>            | 0,62         | 2,93                    |
| <b>PGDO+1%L102</b>     | 0,56         | 2,68                    |
| <b>PGDO+1%L-Nft102</b> | 0,57         | 2,77                    |

La bola de acero de la Figura III.75 presenta un área de desgaste de 0,14 mm<sup>2</sup> y una anchura de 0,6 mm. Por tanto, la anchura de la huella del aluminio es similar a la de la bola de acero, pero el área de ésta es bastante menor que el área de desgaste que se produce en el Al 6061.

## 6. Comparación de resultados de fricción y desgaste para cada aleación de Al

En las siguientes tablas se representa una síntesis de los resultados obtenidos en los ensayos de fricción y desgaste para las distintas aleaciones de aluminio tratadas

### 6.1. Ensayos de fricción y desgaste en seco

Los resultados de fricción obtenidos en los ensayos en seco de las tres aleaciones:

Tabla III.13. Coeficientes de fricción medios en seco

|                     | Al 2011 | Al 6061 | Al 7075 |
|---------------------|---------|---------|---------|
| <b>Media</b>        | 0,66    | 0,78    | 0,56    |
| <b>Desv. típica</b> | 0,08778 | 0,076   | 0,054   |

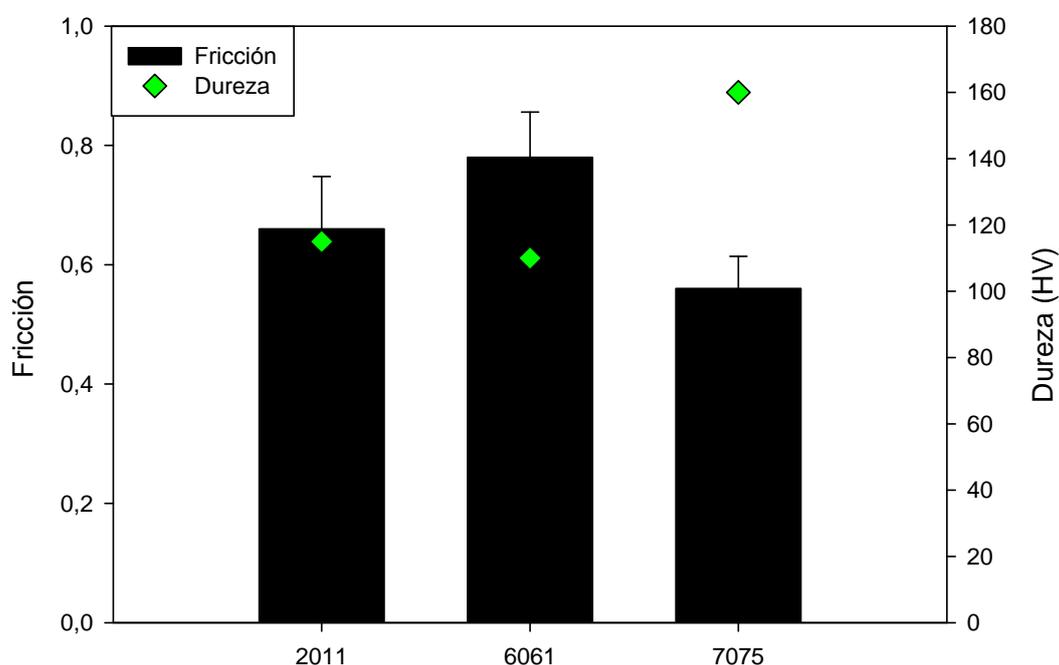


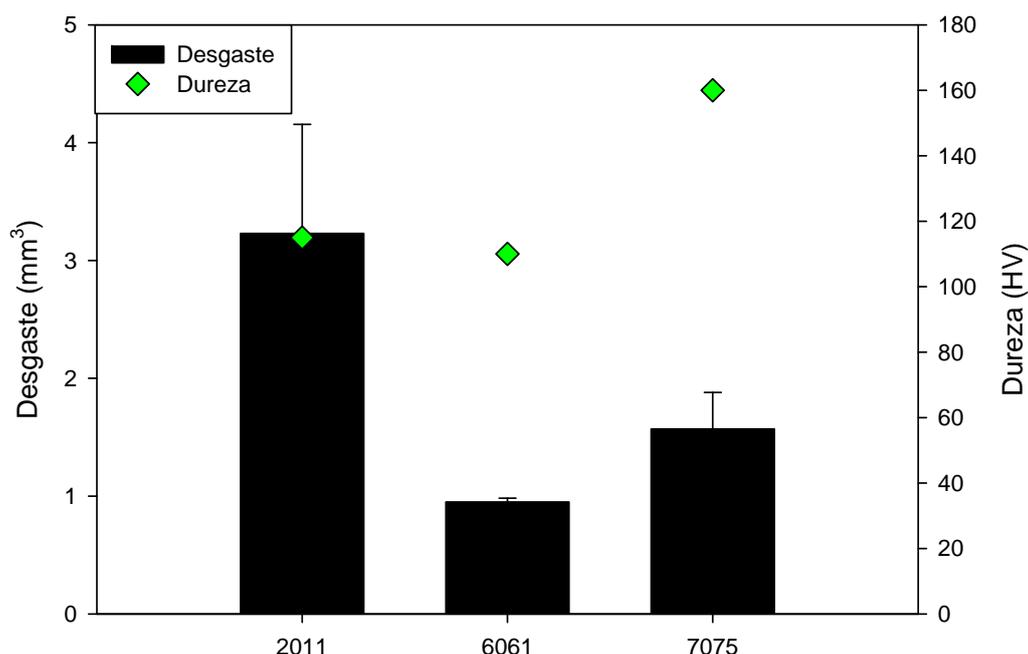
Figura III.79. Gráfica dureza-fricción para cada aleación en seco

Cuando se comparan los coeficientes de fricción en seco de las aleaciones de aluminio frente a acero, se observa que el coeficiente de fricción medio aumenta en el orden Al 6061>Al 2011>Al 7075, es decir, es mayor al disminuir la dureza de la aleación de aluminio.

Los valores de desgaste para las tres aleaciones:

*Tabla III.14. Desgaste medio en mm<sup>3</sup> en seco*

|                     | Al 2011 | Al 6061 | Al 7075 |
|---------------------|---------|---------|---------|
| <b>Media</b>        | 3,23    | 0,95    | 1,57    |
| <b>Desv. típica</b> | 0,925   | 0,0325  | 0,31    |



*Figura III.80. Gráfica dureza-desgaste para cada aleación en seco*

Los coeficientes de desgaste en seco se incrementan al aumentar el contenido en cobre de la aleación (Al 6061 < Al 7075 < Al 2011), de manera que el material más blando (Al 6061) es el que menor desgaste presenta.

Por tanto, si realizamos los ensayos en seco, el menor valor de fricción se obtiene en la aleación más dura, es decir la de Al 7075, y el menor valor de desgaste se obtiene en la más blanda, que corresponde a la aleación Al 6061.

## 6.2. Ensayos de fricción y desgaste con PGDO 1429

*Tabla III.15. Coeficientes de fricción medios con PGDO 1429*

|                     | Al 2011 | Al 6061 | Al 7075 |
|---------------------|---------|---------|---------|
| <b>Media</b>        | 0,12    | 0,15    | 0,17    |
| <b>Desv. típica</b> | 0,00716 | 0,00321 | 0,0168  |

*Tabla III.16. Desgaste medio en mm<sup>3</sup> con PGDO 1429*

|                     | Al 2011              | Al 6061              | Al 7075              |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Media</b>        | $1,53 \cdot 10^{-2}$ | $2,06 \cdot 10^{-2}$ | $1,82 \cdot 10^{-2}$ |
| <b>Desv. típica</b> | $8,03 \cdot 10^{-4}$ | $2,47 \cdot 10^{-4}$ | $6,95 \cdot 10^{-3}$ |

Se observa que con el aceite puro PGDO 1429 se obtienen unos valores de fricción y desgaste menores con el Al 2011 que con las otras aleaciones tratadas.

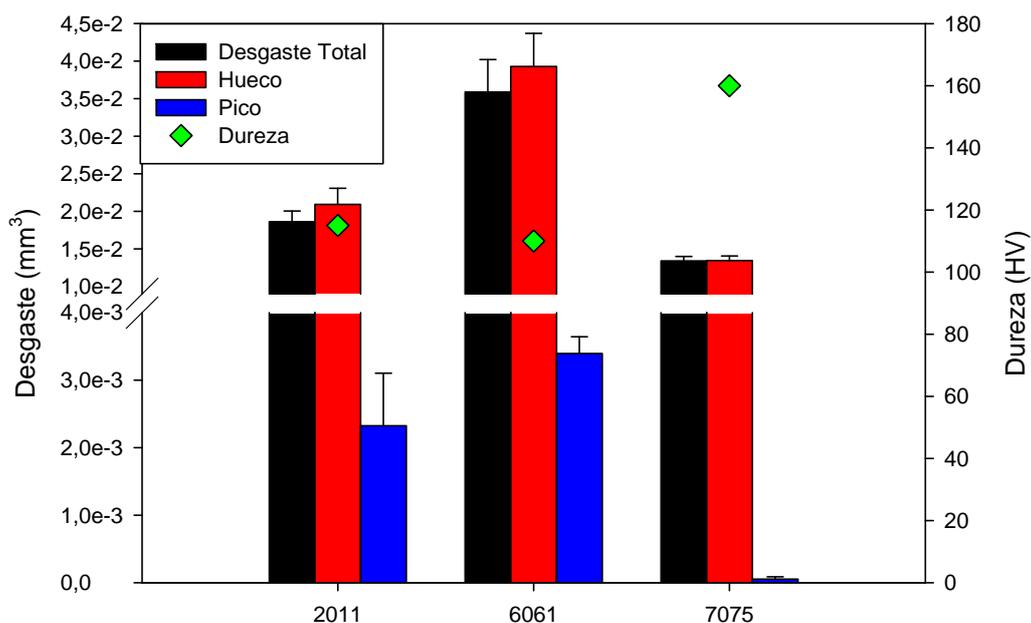
### 6.3. Ensayos de fricción y desgaste con PGDO 1429 con 1% L102

*Tabla III.17. Coeficientes de fricción medios con PGDO+1% L102*

|                     | Al 2011  | Al 6061  | Al 7075 |
|---------------------|----------|----------|---------|
| <b>Media</b>        | 0,15     | 0,13     | 0,16    |
| <b>Desv. típica</b> | 0,001443 | 0,009951 | 0,01013 |

*Tabla III.18. Desgaste medio en mm<sup>3</sup> con PGDO+1% L102*

|                     | Al 2011              | Al 6061              | Al 7075              |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Media</b>        | $1,86 \cdot 10^{-2}$ | $3,59 \cdot 10^{-2}$ | $1,34 \cdot 10^{-2}$ |
| <b>Desv. típica</b> | $1,43 \cdot 10^{-3}$ | $4,34 \cdot 10^{-3}$ | $5,86 \cdot 10^{-4}$ |



*Figura III.81. Gráfica dureza-desgaste para cada aleación con PGDO+1%L102*

Con un 1% L102 en el aceite obtenemos menores valores de fricción en la aleación más blanda, que es la de Al 6061, y menores valores de desgaste en el Al 7075, que es la más dura.

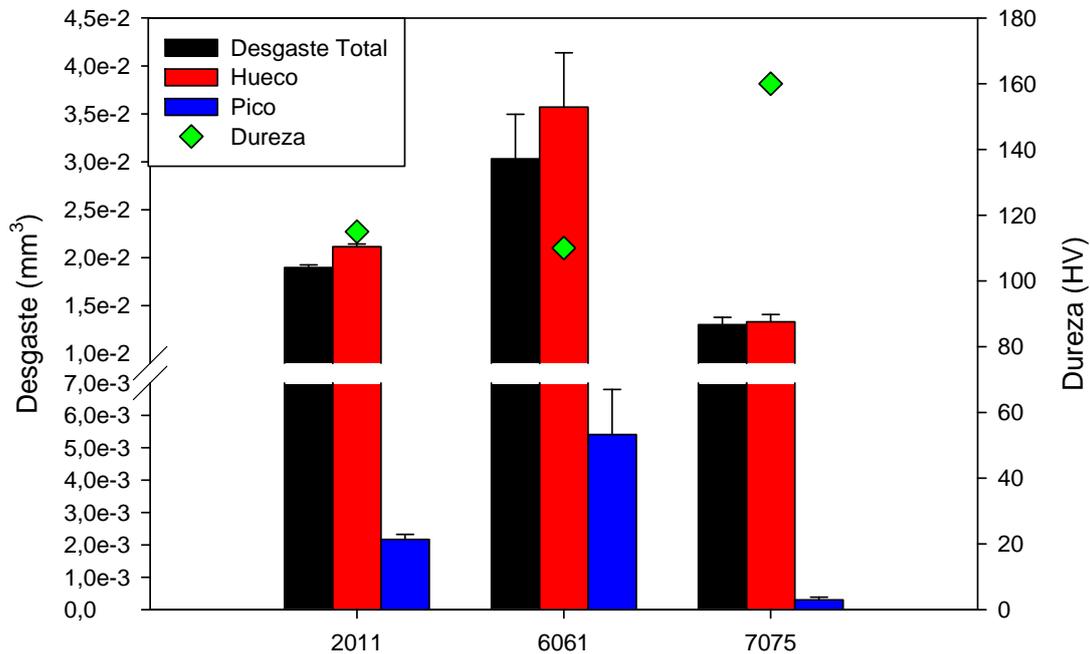
#### 6.4. Ensayos de fricción y desgaste con PGDO 1429 con 1% L-Ntf 102

*Tabla II.19. Coeficientes de fricción medios con PGDO+1% L-Ntf 102*

|                     | Al 2011 | Al 6061  | Al 7075  |
|---------------------|---------|----------|----------|
| <b>Media</b>        | 0,16    | 0,14     | 0,16     |
| <b>Desv. típica</b> | 0,01971 | 0,003157 | 0,006122 |

*Tabla II.20. Desgaste medio en mm<sup>3</sup> con PGDO+1% L-Ntf 102*

|                     | Al 2011              | Al 6061              | Al 7075              |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Media</b>        | $1,90 \cdot 10^{-2}$ | $3,03 \cdot 10^{-2}$ | $1,30 \cdot 10^{-2}$ |
| <b>Desv. típica</b> | $2,7 \cdot 10^{-4}$  | $4,66 \cdot 10^{-3}$ | $7,70 \cdot 10^{-4}$ |



*Figura III.82. Gráfica dureza-desgaste con PGDO+1%Lntf 102*

Como se observa en las figuras anteriores, en condiciones de deslizamiento con lubricación, el material que presenta mayores valores de desgaste y menores valores de fricción es siempre el de menor dureza (Al 6061). El material más duro Al (7075) es el que presenta menor desgaste y mayor fricción en presencia de cualquiera de los lubricantes.

Con un 1% L-Ntf 102 en el aceite sintético volvemos a obtener la misma conclusión que con un 1% L102, por lo que se puede afirmar que aditivos LI de cadena corta al 1% disminuyen la fricción para la aleación Al 6061 y reducen el desgaste para el Al 7075.

Por tanto, en las probetas más blandas, que son las que presentan un valor de dureza más pequeño (Al 2011 y Al 6061), se ha comprobado que aditivos LI de cadena corta al 1% en el aceite puro aumentan el desgaste.

Estudios anteriores [43] afirman que las tres aleaciones tratadas muestran una buena resistencia a la corrosión en una disolución acuosa de L102. Además, los valores de corrosión aumentan con el contenido de Cu en la aleación, por lo que la resistencia a la corrosión de las aleaciones, de mayor a menor, son Al 6061>Al7075>Al 2011.

En nuestro caso, la aleación que mejor responde a la presencia de un 1% LI de cadena corta es el Al 7075, que tiene mayor dureza y menor contenido en Cu que el Al 2011. Como usamos poca cantidad de LI, los efectos corrosivos son mínimos y no afectan al comportamiento frente al desgaste.

# **CAPÍTULO IV**

---

# **CONCLUSIONES**

## **CONCLUSIONES:**

- 1.** Cuando se comparan los coeficientes de fricción en seco de las aleaciones de aluminio frente a acero se observa que el coeficiente de fricción medio aumenta en el orden Al6061>Al2011>Al7075, es decir, es mayor al disminuir la dureza de la aleación de aluminio.
- 2.** Los coeficientes de desgaste en seco se incrementa al aumentar el contenido en cobre de la aleación (Al6061>Al7075>Al2011), de manera que el material más blando (Al 6061) es el que menor desgaste presenta.
- 3.** En condiciones de deslizamiento con lubricación, el material que presenta mayores valores de desgaste y menores valores de fricción es siempre el de menor dureza (Al 6061). El material más duro (Al 7075) es el que presenta menor desgaste en presencia de cualquiera de los lubricantes.
- 4.** La adición de un 1% de líquido iónico de cadena corta al aceite sintético base sólo disminuye el coeficiente de desgaste del material más duro (Al 7075) y el coeficiente de fricción del material más blando (Al 6061). La aleación con mayor contenido en cobre (Al 2011) presenta menores valores de fricción y desgaste en ausencia de aditivos líquido iónico.

# **CAPÍTULO V**

---

# **BIBLIOGRAFÍA**

## **Bibliografía**

1. H. P. Jost, "Lubrication (Tribology) Education and Research ("Jost Report")", Department of Education and Science, HMSO. Reino Unido, (1966).
2. H. P. Jost, "The Tasks of Tribology Societies on a Changing World", Opening Address, 2nd World Tribology Congress. Viena, (2001).
3. "Standard Terminology Relating to Wear and Erosion", ASTM G40-05, (2005).
4. J. B. Adams, L. G. Hector, D. J. Siegel, H. L. Yu, J. Zhong, "Adhesion, Lubrication and Wear on the Atomic Scale", *Surface and Interface Analysis*, 31 (2001) 619-626.
5. I. M. Hutchings (Ed.), "Friction, Lubrication and Wear of Artificial Joints". Wiley (2003).
6. J. A. Williams, "Wear and Wear Particles--Some Fundamentals", *Tribology International*, 38 (2005) 863-870.
7. S. M. Hsu, "Molecular Basis of Lubrication", *Tribology International*, 37 (2004) 553-559.
8. S. Andersson, A. Söderberg, S. Björklund, "Friction Models for Sliding Dry, Boundary and Mixed Lubricated Contacts", *Tribology International*, 40 (2007) 580-587.
9. C. H. Zhang, "Research on Thin Film Lubrication: State of the Art", *Tribology International*, 38 (2005) 443-448.
10. A. Pettersson, "High-Performance Base Fluids for Environmentally Adapted Lubricants", *Tribology International*, 40 (2007) 638-645.
11. S. Gryglewicz, M. Stankiewicz, F. A. Oko, I. Surawska, "Esters of Dicarboxylic Acids As Additives for Lubricating Oils", *Tribology International*, 39 (2006) 560-564.
12. L. R. Rudnik, "Lubricant Additives. Chemistry and Applications". CRC (2003).
13. H. Yanhong, L. Weimin, "Tribological Properties of Alcohols As Lubricating Additives for Aluminum-on-Steel Contact", *Wear*, 218 (1998) 244-249.
14. Y. Wan, Q. J. Xue, L. L. Cao, "Boundary Lubrication of Aluminum Alloy With Cl-Containing Antiwear and Extreme Pressure Additives", *Wear*, 208 (1997) 57-60.
15. L. T. Hu, J. M. Chen, W. M. Liu, Q. J. Xue, C. Kajdas, "Investigation of Tribochemical Behavior of Al-Si Alloy Against Itself Lubricated by Amines", *Wear*, 243 (2000) 60-67.
16. Y. Wan, W. Liu, Q. Xue, "Effects of Diol Compounds on the Friction and Wear of Aluminum Alloy in a Lubricated Aluminum-on-Steel Contact", *Wear*, 193 (1996) 99.

17. P. Wasserscheid, T. E. Welton (Eds.), "Ionic Liquids in Synthesis". Wiley (2003).
18. M. J. Earle, K. R. Seddon, "Ionic Liquids. Green Solvents for the Future", *Pure and Applied Chemistry*, 72 (2000) 1391-1398.
19. C. Wakai, A. Oleinikova, M. Ott, H. Weingartner, "How Polar Are Ionic Liquids? Determination of the Static Dielectric Constant of an Imidazolium-Based Ionic Liquid by Microwave Dielectric Spectroscopy", *Journal of Physical Chemistry B*, 109 (2005) 17028-17030
20. U. Schroder, J. D. Wadhawan, R. G. Compton, F. Marken, P. A. Z. Suarez, C. S. Consorti, R. F. de Souza, J. Dupont, "Water-Induced Accelerated Ion Diffusion: Voltammetric Studies in 1-Methyl-3-[2,6-(S)-Dimethylocten-2-yl]Imidazolium Tetrafluoroborate, 1-Butyl-3-Methylimidazolium Tetrafluoroborate and Hexafluorophosphate Ionic Liquids", *New Journal of Chemistry*, 24 (2000) 1009-1015.
21. J. Dupont, "On the Solid, Liquid and Solution Structural Organization of Imidazolium Ionic Liquids", *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 15 (2004) 341-350.
22. C. S. Consorti, P. A. Z. Suarez, R. F. de Souza, R. A. Burrow, D. H. Farrar, A. J. Lough, W. Loh, L. H. M. da Silva, J. Dupont, "Identification of 1,3-Dialkylimidazolium Salt Supramolecular Aggregates in Solution", *Journal of Physical Chemistry B*, 109 (2005) 4341-4349.
23. P. Yu, Y. Q. Lin, L. Xiang, L. Su, J. Zhang, L. Q. Mao, "Molecular Films of Water-Miscible Ionic Liquids Formed on Glassy Carbon Electrodes: Characterization and Electrochemical Applications", *Langmuir*, 21 (2005) 9000-9006.
24. H. Olivier, "Recent Developments in the Use of Non-Aqueous Ionic Liquids for Two-Phase Catalysis", *Journal of Molecular Catalysis A-Chemical*, 146 (1999) 285-289.
25. P. Bonhote, A. P. Dias, N. Papageorgiou, K. Kalyanasundaram, M. Gratzel, "Hydrophobic, Highly Conductive Ambient-Temperature Molten Salts", *Inorganic Chemistry*, 35 (1996) 1168-1178.
26. H. Zhao, "Innovative Applications of Ionic Liquids As "Green" Engineering Liquids", *Chemical Engineering Communications*, 193 (2006) 1660-1677.
27. P. Yu, Y. Q. Lin, L. Xiang, L. Su, J. Zhang, L. Q. Mao, "Molecular Films of Water-Miscible Ionic Liquids Formed on Glassy Carbon Electrodes: Characterization and Electrochemical Applications", *Langmuir*, 21 (2005) 9000-9006.
28. S. N. Baker, E. B. Brauns, T. M. McCleskey, A. K. Burrell, G. A. Baker, "Fluorescence Quenching Immunoassay Performed in an Ionic Liquid", *Chemical Communications*, (2006) 2851-2853.

29. C. B. Jones, R. Haiges, T. Schroer, K. O. Christe, "Oxygen-Balanced Energetic Ionic Liquid", *Angewandte Chemie-International Edition*, 45 (2006) 4981-4984.
30. M. Freemantle, "BASF's Smart Ionic Liquid", *Chemical & Engineering News*, 81 (2006) 9.
31. B. Jastorff, K. Molter, P. Behrend, U. Bottin-Weber, J. Filser, A. Heimers, B. Ondruschka, J. Ranke, M. Schaefer, H. Schroder, A. Stark, P. Stepnowski, F. Stock, R. Stormann, S. Stolte, U. Welz-Biermann, S. Ziegert, J. Thoming, "Progress in Evaluation of Risk Potential of Ionic Liquids-Basis for an Eco-Design of Sustainable Products", *Green Chemistry*, 7 (2005) 362-372.
32. P. J. Scammells, J. L. Scott, R. D. Singer, "Ionic Liquids: The Neglected Issues", *Australian Journal of Chemistry*, 58 (2005) 155-169.
33. M. J. Earle, J. M. S. S. Esperanca, M. A. Gilea, J. N. C. Lopes, L. P. N. Rebelo, J. W. Magee, K. R. Seddon, J. A. Widegren, "The Distillation and Volatility of Ionic Liquids", *Nature*, 439 (2006) 831-834.
34. C. Pinilla, M. G. Del Popolo, R. M. Lynden-Bell, J. Kohanoff, "Structure and Dynamics of a Confined Ionic Liquid. Topics of Relevance to Dye-Sensitized Solar Cells", *Journal of Physical Chemistry B*, 109 (2005) 17922-17927.
35. W. Liu, C. Ye, Y. Chen, Z. Ou, D. C. Sun, "Tribological Behavior of Sialon Ceramics Sliding Against Steel Lubricated by Fluorine-Containing Oils", *Tribology International*, 35 (2002) 503-509.
36. C. Ye, W. Liu, Y. Chen, Z. Ou, "Tribological Behavior of Dy-Sialon Ceramics Sliding Against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Under Lubrication of Fluorine-Containing Oils", *Wear*, 253 (2002) 579-584.
37. A.E. Jiménez and M.D. Bermúdez, "Advanced Lubricants Based on Ionic Liquids", *Tribology Research Advances*, Nova Science (2009).
38. Ana Eva Jiménez Ballesta, "Fluidos Iónicos en Lubricación de Contactos Aluminio-Acero". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, 2007
39. Ana Eva Jiménez, M.D. Bermudez, "Imidazolium ionic liquids as additives of the synthetic ester propylene glycol dioleate in aluminium-steel lubrication", *Wear* 265 (2008) 787-798
40. Pensado, A.S, "The Pressure-Viscosity Coefficient of Several Ionic Liquids", *Tribol Lett.*, 31(2008) 107-118
41. Bibliografía sobre el Al y sus aleaciones

42. Knibb, Gormezano & Partners (KGP), “El uso del Al en automóviles” BRUSELAS, Bélgica, January 15, Distributed by PR Newswire on behalf of EAA - European Aluminium Association
  
43. M.D.Bermudez, Ana Eva Jiménez, Ginés Martínez-Nicolás, “Study of surface interactions of ionic liquids with aluminium alloys in corrosion and erosion-corrosion processes”, Applied Surface Science 253 (2007) 7295-7302.

