

I] INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1. TRIBOLOGÍA

La palabra tribología proviene del griego “τριβος” (tribos), que significa “frotamiento”, pero fue en 1966 cuando se estableció el concepto actual de esta palabra. Este año se publicó el conocido como “informe Jost”. Este informe analizaba el impacto económico de la tribología, asegurando que si se aplicaran los conocimientos sobre tribología, el PIB de las naciones tendría notables beneficios.

Así pues, 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.

La creciente competitividad en los mercados de producción mundiales hace que se demanden procesos de fabricación óptimos de los que resulten productos con precios competitivos.

2. FRICCIÓN

La fricción se define como la resistencia al movimiento relativo entre dos materiales que están en contacto. Fue Coulomb en 1781 el que, tras varios ensayos, emitió la hipótesis de que la fricción entre dos materiales se debe a las rugosidades superficiales que éstos presentan. En efecto, si se observa la superficie de un material en el microscopio, se puede apreciar que la superficie no es perfectamente lisa, sino que es rugosa, formando crestas y valles.

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

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad \text{(Ec. 1.1)}$$

La fricción de un contacto está influida por gran cantidad de parámetros, incluyendo la geometría de las superficies en contacto, sus propiedades, las condiciones ambientales y el lubricante utilizado.

3. DESGASTE

Podríamos definir, según la norma ASTM G40-05, “desgaste” como el 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 ya que la cantidad de equipos que funcionan gracias al movimiento relativo entre las piezas que lo componen es muy elevada, lo que genera inevitablemente este fenómeno. El coste de los problemas producidos por el desgaste en EE.UU. se estima que está entorno a los 8 millones de dólares anuales. Esto es debido a que el desgaste va removiendo material constructivo de ciertas piezas, y esto por tanto determina la vida útil de numerosos equipos como motores de automóvil, articulaciones artificiales y frenos de aeronaves.

Los mecanismos de desgaste se clasifican en dos categorías principales:

- *Desgaste mecánico:*

Se produce por procedimientos puramente mecánicos, sin la actuación de sustancias que provoquen efectos de naturaleza química. A su vez, dentro de este grupo encontramos diferentes procesos que producen desgaste:

- a. **Abrasión.** El desgaste se produce debido a la puesta en contacto de un material duro con otro más blando, en cuyo caso hablamos de “abrasión de dos cuerpos”. Sin embargo, existe otra forma de abrasión que se produce cuando el daño es producido por alguna partícula abrasiva ajena al contacto, a menudo contaminantes. En tal caso, hablamos de “abrasión de tres cuerpos”
- b. **Erosión.** Es producida por el ataque de un fluido portador de partículas abrasivas a una superficie determinada. Es imprescindible el movimiento relativo entre el fluido y la superficie.

- c. **Adhesión.** En este caso, la superficie más blanda sufre arranque de material por parte de la más dura debido a las interacciones entre las microrugosidades de cada una. Este material arrancado, que queda atrapado entre ambas superficies, va creciendo progresivamente absorbiendo nuevas partículas desgastadas, pudiendo llegar incluso al límite de producirse microsoldaduras. Si forzamos a estas superficies a moverse tangencialmente, parte de las uniones se deformarán de manera que se producirán más arranques de fragmentos de la superficie más blanda.
- d. **Fatiga superficial.** Si las superficies en cuestión sufren algún tipo de carga cíclica, el material próximo a la superficie puede generar 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:*

Este caso se produce si los efectos del desgaste mecánico se combinan con un desgaste cuyo origen es un agente químico externo. Cuando esto ocurre, los efectos son sinérgicos, o sea, se da lugar a una pérdida de material y degradación superficial mucho mayor que si simplemente sumamos los dos mecanismos observados independientemente. La corrosión o la oxidación son dos ejemplos del caso que hemos descrito.

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.

4. RELACIÓN ENTRE FRICCIÓN Y DESGASTE

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

Hay que tener en cuenta que 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.

Las altas temperaturas son debidas al calor que se genera durante el proceso, dependiendo 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.

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

La fricción y el desgaste son sensibles a los mismos parámetros y en general a los mismos tipos de fenómenos.

El hecho de 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 ello, 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.

5. DAÑO SUPERFICIAL

5.1 Introducción

El daño superficial se define como el cambio topográfico o microestructural, o ambos, en una capa superficial del material. El daño superficial surge en la superficie de los materiales sometidos a contactos.

Las micrografías juegan un papel importante en el análisis del daño, deterioro o desgaste superficial, pudiendo hablarse de "tribografía" como la descripción micrográfica de las modificaciones topográficas y estructurales en los tribocontactos.

El diagnóstico superficial en relación con los mecanismos y procesos que causan el daño, y la relación de esos mecanismos con la geometría, las propiedades del material y

otras características del tribosistema es una metodología de uso creciente para la más profunda comprensión de las variables tribológicas. El objetivo final de los trabajos tribográficos es disponer de mejores tribosistemas.

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

5.2 Tipos de daño superficial

En un principio, un tribosistema puede presentar un único tipo de daño, pero en general, la estructura es una combinación de dos o más tipos. El examen y la interpretación pueden ser bastante complejos, pero es conveniente una clasificación de tipos ideales de daño superficial, como se presenta a continuación:

1. Daño superficial con cambio de material.

- Cambios estructurales: Daño por cambios estructurales como puede ser el envejecimiento, templado, transformación de fases, recristalización, etc.
- Deformación plástica: Daño caracterizado por deformaciones residuales en la capa superficial, de carácter local o generalizado. El caso extremo se presenta en un cambio en la forma.
- Agrietado superficial: Daño causado por excesivas tensiones locales de contacto o por variaciones cíclicas de tensiones generadas mecánica o térmicamente. Las tensiones de origen mecánico pueden provocar una densa estructura de fisuras paralelas mientras que las tensiones térmicas cíclicas generan una red de fisuras.

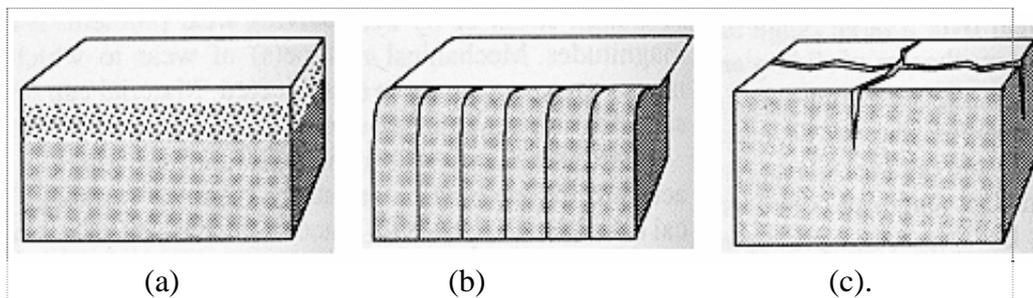


Figura 1.1: Daño superficial con cambio de material.

2. Daño superficial con pérdida de material: Desgaste.

La pérdida de material de la superficie genera partículas de desgaste de varios tamaños y formas. Los elementos fundamentales en el proceso de arrastre del material pueden ser fractura por cizalla, fractura frágil, por fatiga, extrusión, disolución química, difusión, etc.

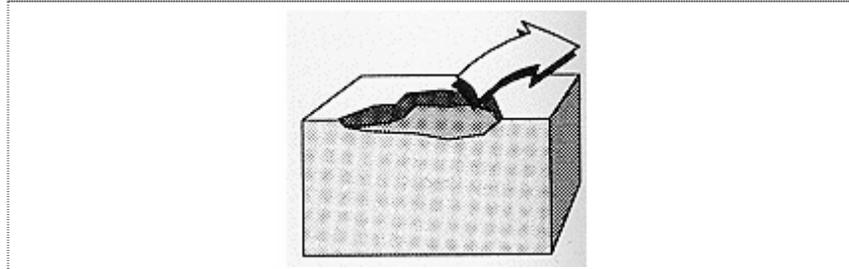


Figura 1.2: Daño superficial con pérdida de material.

3. Daño superficial con ganancia de material.

Se produce por transferencia de material de una superficie a otra.

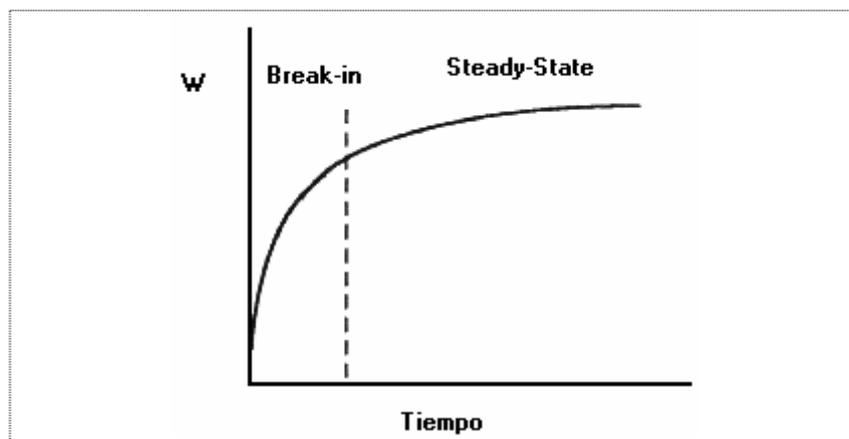


Figura 1.3: Daño superficial con ganancia del material.

4. Corrosión:

Degradación del material por reacciones químicas con elementos ambientales o de la superficie opuesta.

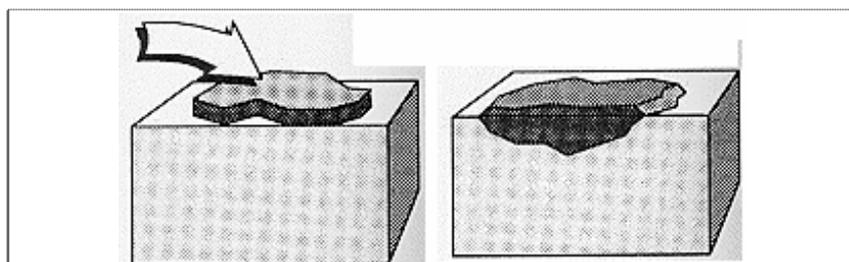


Figura 1.4: Daño superficial por corrosión.

6. LUBRICACIÓN

Los lubricantes se han convertido en un elemento esencial de la vida actual. 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 llegándose 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 medio ambiente, 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.

6.1. Principios de lubricación

Un sistema lubricante consiste en dos superficies en movimiento bajo una carga con una sustancia lubricante entre ellas. La lubricación se consigue gracias a las propiedades físicas y químicas de dicha sustancia. 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. Estos conceptos serán aclarados más adelante.

La lubricación actual se basa en dos principios:

- 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 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 ($\eta \cdot v / F_N$), donde “v” es la velocidad de deslizamiento, “ η ” la viscosidad dinámica y F_N la fuerza normal aplicada (figura 1.5) De este estudio se desprende el hecho de que un aumento de espesor de la capa de lubricante no tiene por qué disminuir la fricción.

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.

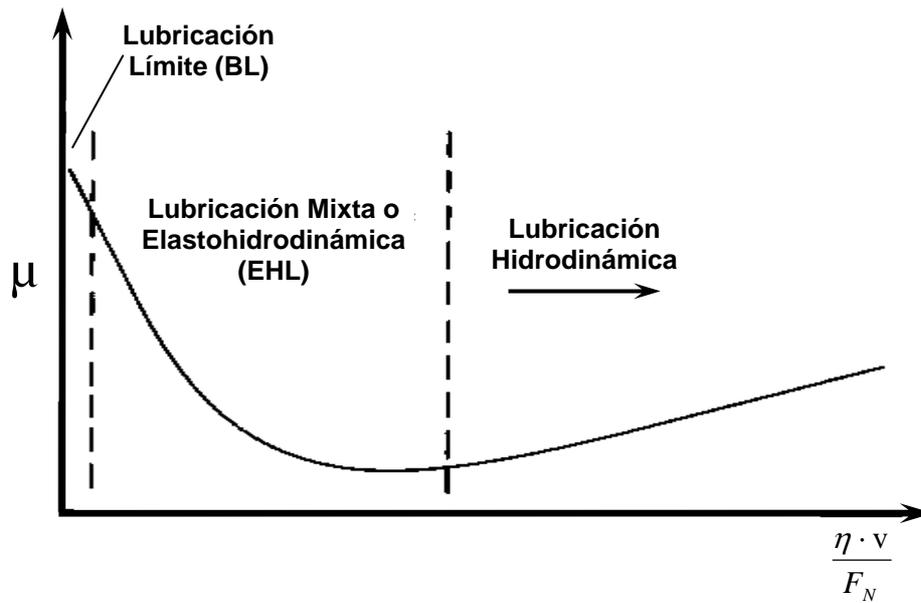


Figura 1.5 Curva de Stribeck.

Más recientemente, se ha propuesto un nuevo mapa de lubricación que se puede ver en la figura 1.6. En esta figura se define:

- h como el espesor de película.
- R_g como el radio efectivo de las moléculas del lubricante.
- R_c 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.

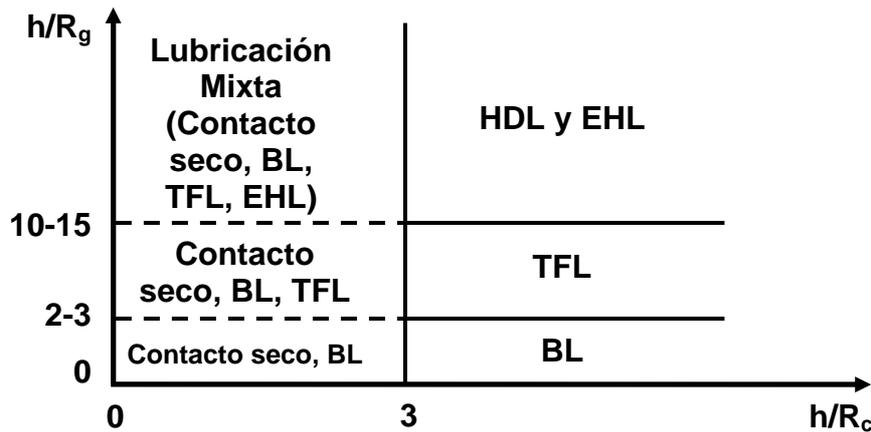


Figura 1.6 Mapa de los regímenes de lubricación.

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.

7. 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 (η) o bien como viscosidad cinemática (ν). La viscosidad cinemática se obtiene normalizando la viscosidad absoluta con la densidad del fluido.

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.

7.1. Aceites base

El aceite lubricante es en realidad una mezcla de dos tipos de componentes. Por un lado, el aceite base, que en un lubricante típico se encuentra en una proporción del 75 al 95%, y por otro lado, los aditivos, que mejoran las propiedades químicas del aceite base. Las propiedades físicas del lubricante vendrán dadas por el tipo de aceite base que lo componga.

7.1.1. Aceites minerales

Los aceites minerales se obtienen por destilación y posterior tratamiento del petróleo. Por consiguiente, están compuestos principalmente por hidrocarburos, pudiendo contener también compuestos de azufre y otras impurezas menores. Si los clasificamos por el tipo de enlace químico, los aceites minerales pueden ser parafínicos, nafténicos o aromáticos (ver figura 1.7). Los parafínicos son los más comunes por sus buenas propiedades generales. Los nafténicos se usan cuando son necesarias buenas propiedades a baja temperatura.

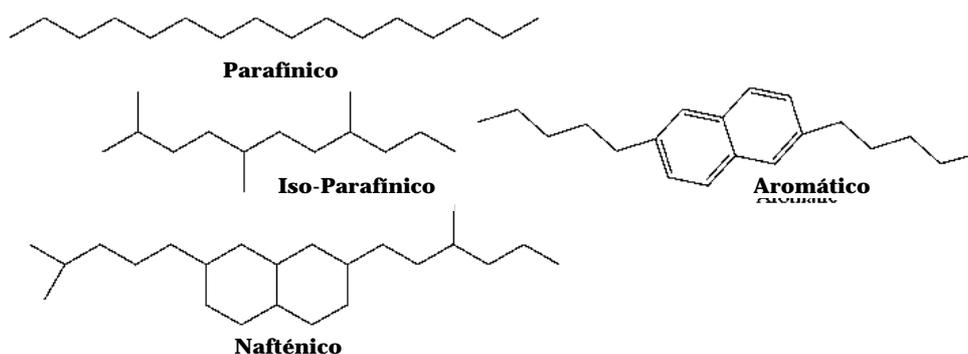


Figura 1.7 Representaciones esquemáticas de distintos aceites minerales.

Los tradicionales aceites lubricantes minerales cumplen su función adecuadamente, pero, como hemos comentado, las reglas están cambiando. La legislación acerca de la contaminación medioambiental es cada vez más exigente, con mayores restricciones en las emisiones a la atmósfera y unos mayores requerimientos en el ahorro del combustible. La legislación europea demanda productos con un alto grado de biodegradabilidad, reciclaje y no-toxicidad.

Sin embargo, todos los tipos de lubricantes minerales siguen conteniendo cierta cantidad de sulfuros y compuestos volátiles. Además, estos fluidos no se consideran renovables o biodegradables. Estas circunstancias convierten a los aceites sintéticos en futuros candidatos para ser lubricantes base.

7.1.2. Aceites sintéticos

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.

En general, los lubricantes sintéticos tienen buenos índices de viscosidad, baja volatilidad, buena fluidez a baja temperatura, alta estabilidad térmica y baja toxicidad, además de no contener azufre, nitrógeno, fósforo o metales. 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 1.8. 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.

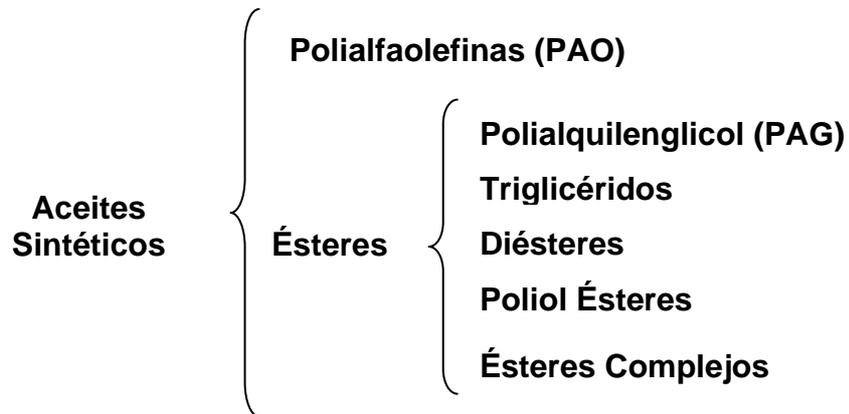


Figura 1.8 Esquema de los aceites sintéticos más usados en lubricación.

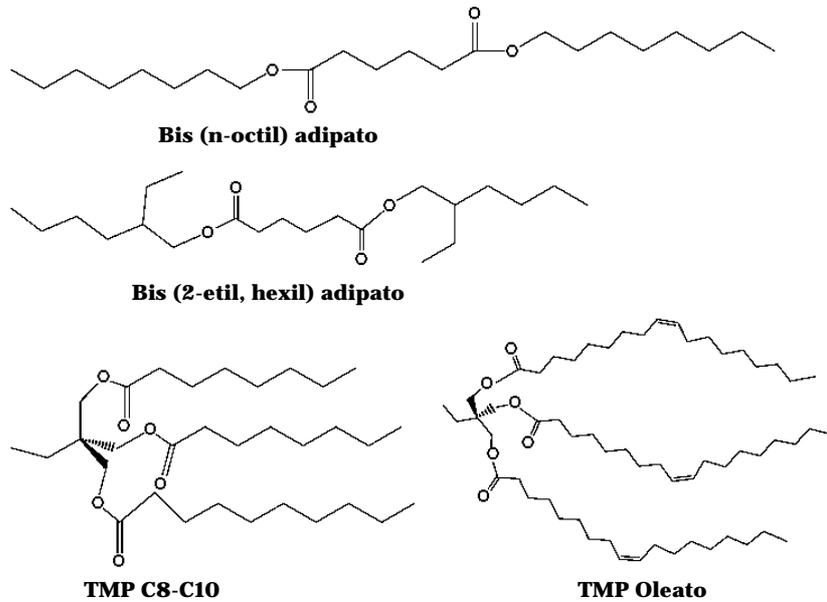


Figura 1.9 Representaciones esquemáticas de cuatro tipos distintos de ésteres sintéticos.

8. LÍQUIDOS IÓNICOS (LI)

8.1. 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. Si introducimos el término “ionic liquid” en la base de datos ISI, obtenemos una media de 30 referencias anuales hasta el año 1995, creciendo hasta más de 1000 en la primera mitad de 2006.

Este interés creciente se debe claramente a que se ha llegado a la conclusión de que estos materiales, usados formalmente para aplicaciones especializadas en electroquímica, pueden tener aplicación en otros muchos campos. El número de patentes de aplicaciones ha crecido desde unas pocas en 1980 a más de 800 en 2004.

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 dicha sustancia.

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.

8.2. Propiedades físico-químicas

Las propiedades físicas y químicas de los LI vienen determinadas por la composición y estructura de los aniones y cationes que los forman. De esta forma, podemos ajustarlas variando la estructura y combinaciones de cationes y aniones, siendo esta versatilidad una de las principales características de estos materiales. A continuación se explica brevemente las ya mencionadas propiedades físico químicas en función del tipo de cadena presente en el LI.

- *Punto de fusión.*

Los líquidos iónicos con aniones altamente fluorados (BF_4^- , PF_6^- , $(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}^-$, CF_3COO^- , 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: $\text{Cl}^- > \text{PF}_6^- > \text{BF}_4^-$.

Se ha comprobado que los tetrafluoroboratos de 1-alquil, 3-metilimidazolio con cadenas con un número de átomos de carbono $n=2-10$ cristalizan al enfriar por debajo de $-80\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que con cadenas de $n=12-18$ son sólidos a temperatura ambiente con comportamiento de cristal líquido. Un comportamiento parecido se puede observar para las sales de hexafluorofosfato

- *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 $450\text{ }^\circ\text{C}$. Así, las temperaturas de descomposición varían con el tipo de anión, cumpliéndose el siguiente orden general de estabilidad térmica: $\text{Cl}^- < \text{PF}_6^- \approx \text{BF}_4^- < (\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}^-$.

- *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 g·cm⁻³ y 2,4 g·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 Cl⁻ a PF₆⁻. 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, de la observación empírica se ha determinado que los LI tienden a ser inmiscibles con ellos. Entre los disolventes con mayor polaridad, los ésteres exhiben una solubilidad variable con los LI, en función de la naturaleza de los mismos.

- *Polaridad.*

Se ha determinado que la constante dieléctrica “ ϵ ” de los LI se encuentra entre 8,8 y 15,2, disminuyendo este valor al aumentar la longitud de la cadena alquílica. 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 ϵ mediante cambios del catión y el anión del LI.

8.3. Estructura y organización de los LI

Como hemos podido ver en los apartados anteriores, el conocimiento de la estructura de los LI puede jugar un papel muy importante a la hora de su diseño y aplicación. Por ello, se están llevando a cabo intentos para relacionar la fuerza de los enlaces entre el catión y el anión, la simetría o el tamaño de los aniones con las propiedades físicas y químicas de los LI.

8.3.1. Estructura de los LI puros

8.3.1.1. Organización estructural en estado sólido

En estado sólido se ha comprobado que, efectivamente, los LI puros forman una red de cationes y aniones conectados por puentes de hidrógeno en la que cada anillo de imidazolio se encuentra rodeado por tres aniones y viceversa. Diversos estudios indican

que el ordenamiento tridimensional se realiza de forma estratificada, con zonas diferenciadas de cationes y aniones formando una extensa red (ver figuras 1.10 y 1.11).

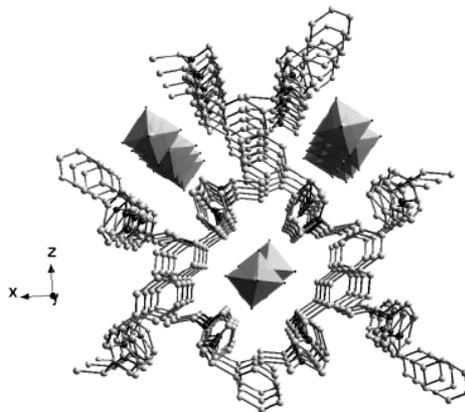


Figura 1.10 Estructura cristalina del hexafluorofosfato de 1,3-dimetilbenzilimidazolio (los octaedros representan los aniones de hexafluorofosfato).

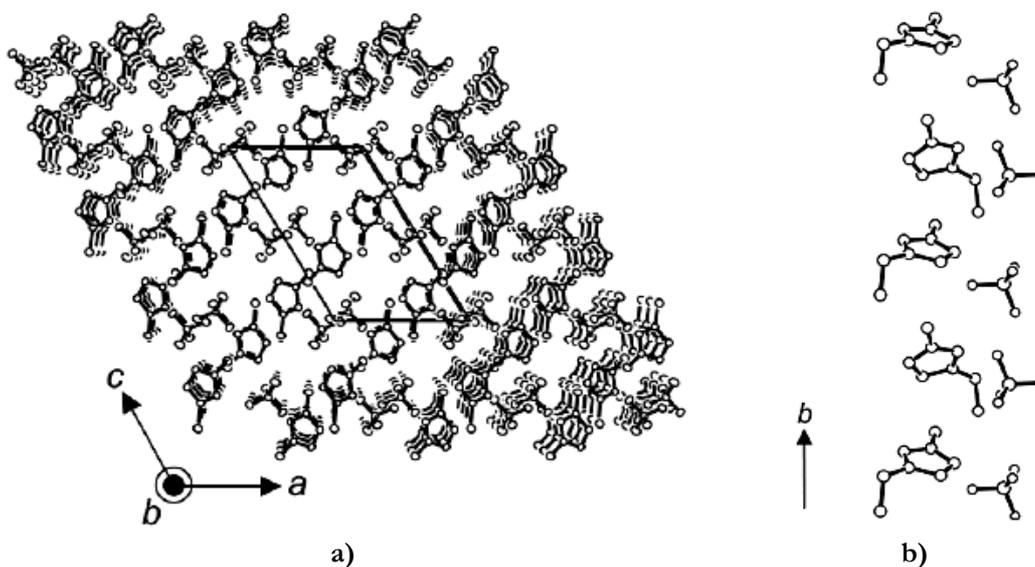


Figura 1.11 Estructura cristalina del tetrafluoroborato de 1-etil, 3-metilimidazolio: a) Empaquetamiento molecular; b) Estructura estratificada de aniones y cationes.

8.3.1.2. Organización estructural en estado líquido

En la mayoría de los casos sólo se produce un aumento del 10-15% del volumen entre el estado cristalino y el estado líquido de los LI, por lo que las distancias ión-ión o átomo-átomo son similares en ambos estados. Las similitudes entre la estructura de los LI en estado sólido y líquido se mantienen como consecuencia de las fuerzas coulómbicas entre los cationes y aniones. Por este motivo, la estructura de los LI puros en estado líquido se puede asimilar también a una red supramolecular polimérica, en la que cada anión está rodeado de tres cationes y viceversa, conectados por puentes de hidrógeno (figura 1.12).

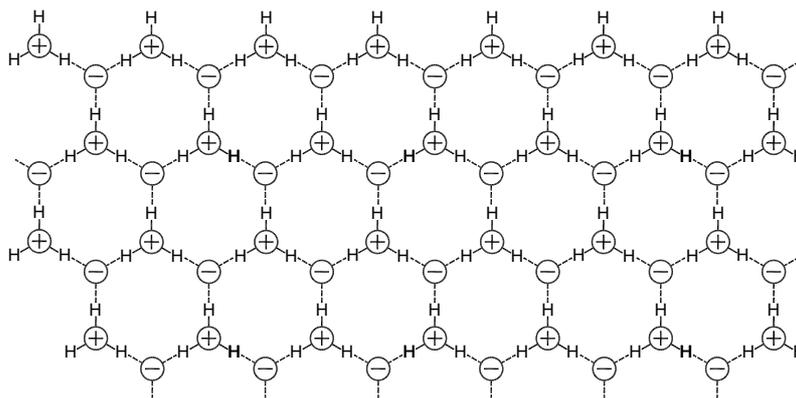


Figura 1.12 Ordenamiento de los LI puros. Estructura supramolecular polimérica en estado líquido.

8.3.2. Estructura de los LI 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 1.13).

Estudios recientes de simulación por ordenador predicen que, en fase líquida, los LI de 1-alkil, 3-metilimidazolio podrían estructurarse en este tipo de dominios de distinta polaridad.

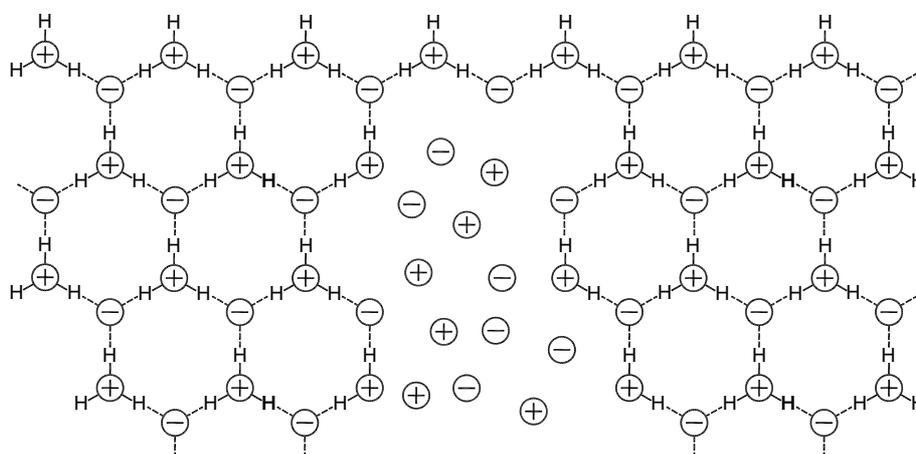


Figura 1.13 Ordenamiento de los LI en presencia de otras moléculas.

8.3.2.1. Influencia de la presencia de agua

Compton fue 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. 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.

Cuando se encuentran en disolución, los LI 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 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.

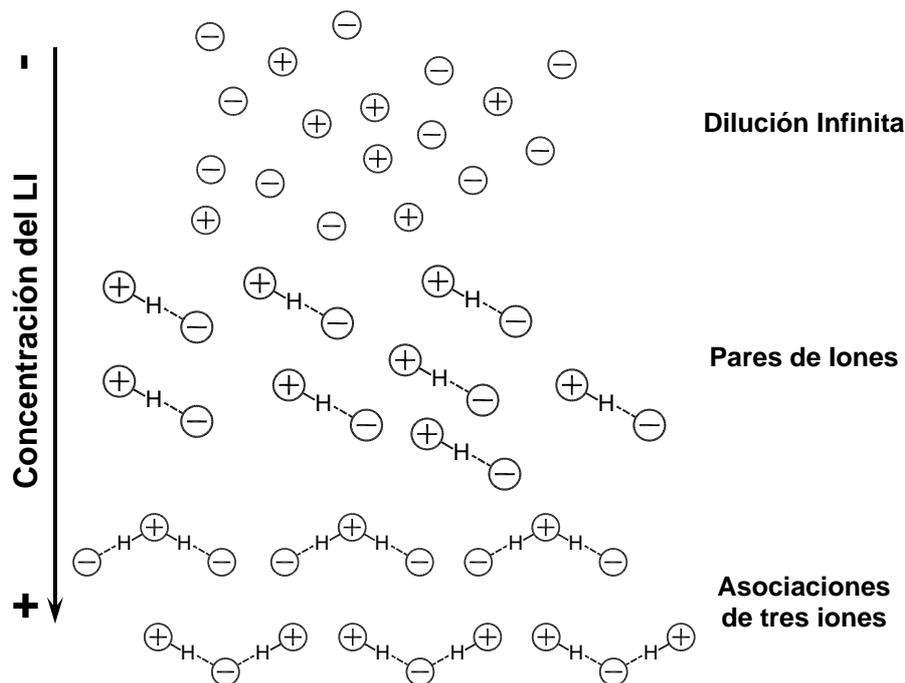


Figura 1.14 LI en disolución. Equilibrio iónico a diferentes concentraciones.

En resumen 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.

8.4. Aplicaciones de los LI como materiales “verdes” en Ingeniería

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 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 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”:

- *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 mS·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 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 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 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; 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 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 trabajan en el reciclaje y tratado de los residuos producidos por los LI.

8.5. Propiedades lubricantes de los LI [1]

Las singulares características que hemos descrito para los LI, 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.

Como se comentó en el apartado 6.1, 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, 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/SiO₂, Si₃N₄/SiO₂, acero/sialón y Si₃N₄/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 la siguiente tabla 1.1 se muestra 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. En la tabla 1.2 se puede ver la composición de los LI que aparecen en la tabla 1.1.

Los valores obtenidos en estos estudios demuestran que el comportamiento tribológico de los LI supera al de otros lubricantes como el PFPE en contactos como el cerámico-cerámico, acero-cerámico y acero-acero.

Tabla 1.1. Antecedentes del uso de los LI como lubricantes base

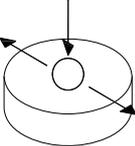
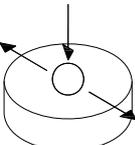
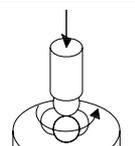
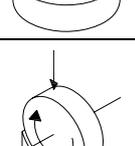
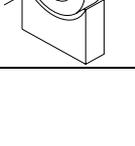
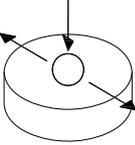
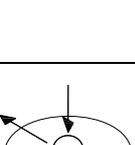
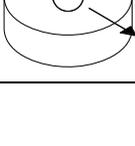
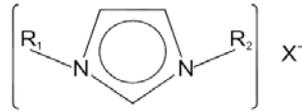
Materiales en Contacto	Líquido Iónico	Tipo de Ensayo	Coefficiente de fricción (μ)	Desgaste (mm³)
Acero/SiO ₂	L-106		0,05-0,083	--
Acero/Si(100)	L-108		0,05-0,085	--
Acero/Sialón	L-106 L-206 L-208 L-P104 L-F206 L-P104 L-P106 L-P108 L-P206 L-P208 L-P308		0,065	--
Si ₃ N ₄ /Sialón			0,045-0,06	0,05-0,53·10 ⁻⁴
Si ₃ N ₄ /SiO ₂			0,37-0,58	0,30-0,56
Si ₃ N ₄ /Si(100)			0,37-0,57	0,27-0,58
Acero/Acero			0,04- 0,08	--
			0,08-0,10	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴
			0,05-0,09	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴
Acero/Cobre	L-106		0,025	--

Tabla 1.2 Designación de los líquidos iónicos derivados del imidazolio listados en la tabla 1.1.

X	R ₁	R ₂	Nomenclatura
BF ₄ ⁻	CH ₃	C ₂ H ₅	L102
		C ₆ H ₁₃	L106
		C ₈ H ₁₇	L108
	C ₂ H ₅	C ₆ H ₁₃	L206
		C ₈ H ₁₇	L208
PF ₆ ⁻	CH ₃	C ₄ H ₉	L-P104
		C ₆ H ₁₃	L-P106
		C ₈ H ₁₇	L-P108
	C ₂ H ₅	C ₆ H ₁₃	L-P206
		C ₈ H ₁₇	L-P208
(CF ₃ SO ₂) ₂ N ⁻	CH ₃	C ₂ H ₅	L-F102
		C ₄ H ₉	L-F104
		C ₁₀ H ₂₁	L-F110
	C ₂ H ₅	C ₆ H ₁₃	L-F206
Br ⁻	CH ₃	C ₄ H ₉	L-Br104
		C ₆ H ₁₃	L-Br106
Tosilato		C ₂ H ₅	L-To102
			L-Es102
EtOSO ₃ ⁻		C ₄ H ₉	L-Cl104
Cl ⁻			L-Os104
OctilOSO ₃ ⁻		C ₈ H ₁₇	L-BT108
(C ₂ F ₅ SO ₂) ₂ N ⁻		CH ₃	L-Dm101
Me ₂ PO ₄ ⁻			

9. ALEACIONES DE NÍQUEL [2,3]

9.1. Evolución histórica

Las aleaciones de níquel han sido usadas desde el principio de la civilización, en aleaciones base cobre: en herramientas, monedas y armas rudimentarias. El primer uso industrial de una aleación base níquel fue en 1905 con la aleación MONEL 400 (NO4400), desarrollada para ambientes acuosos, con elevada resistencia mecánica y a la corrosión. A partir de este material, Paul D. Merica descubrió el uso del aluminio y el titanio como formadores de fases endurecedoras en las aleaciones de níquel, desarrollando NIMONIC (Ni-Cr-Ti), con un buen comportamiento a alta temperatura. En 1920, las investigaciones sobre la mejora de la resistencia a la corrosión, llevaron a la adición de molibdeno, desarrollando HASTELLOY (Ni-Cr-Mo), con resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes reductores. En 1924, se introduce MONEL K-500 (NO5500), endurecido por envejecimiento, con una elevada resistencia mecánica.

En 1931, se desarrolla la aleación Ni-Cr-Fe INCONEL 600, que fue usado inicialmente en la industria láctea, existiendo en la actualidad una gran variedad de aleaciones dentro de esta familia conocida como INCONEL en la industria, principalmente caracterizadas por una buena resistencia a la corrosión por el contenido en cromo, resistencia mecánica y buen comportamiento a elevada temperatura. Dentro de la familia del INCONEL, distinguimos el INCONEL 690 (No6690), como una mejora de la serie 600, y en 1950, debido a la escasez de níquel aparece INCOLOY 800 (No8800), desarrollado para reemplazar al INCONEL 600 en electrodomésticos.

Las extremas condiciones de funcionamiento de los álabes de las turbinas en aeronáutica, llevaron durante los años 40 al desarrollo de las aleaciones NIMONIC 80 y NIMONIC 80A (No7080), ya que las condiciones de funcionamiento de los álabes de los reactores a elevada temperatura, requieren el empleo de materiales de elevada resistencia al creep. Siguiendo esta línea de trabajo, se desarrollaron al comienzo de los años 70 las aleaciones INCONEL 718 (No7718), INCONEL 625 (No6625) e INCONEL 617 (No6617), con elevada resistencia mecánica y a la corrosión. En principio, aunque desarrollados para la industria aeronáutica, podemos encontrarlos en muy diversas aplicaciones donde la resistencia mecánica y a la corrosión son requerimientos básicos de diseño.

En los años 50, se desarrolló para la industria química INCOLOY 825 (No8825) y CARPENTER 20Cb-3 (No8020), contando además de níquel, cromo y hierro, con cobre y molibdeno. En los años 70, las mejoras técnicas en los procesos de fundición, permitieron la aparición de HASTELLOY C (N1002), HASTELLOY B-2 (N10665) y una mejora de la aleación HASTELLOY Ni-Cr, naciendo HASTELLOY B (N1001)

En los años 80, la demanda de materiales con buen comportamiento frente a polución y procesos en la industria química, llevó al desarrollo de HASTELLOY C-22 (N260022). En la siguiente década se desarrolló NICROFER 5923 Mo (No6059), INCONEL 686 (No6686), y la aleación HASTELLOY C-2000 (No6200), proporcionando una mejor resistencia a la corrosión general y localizada en medios oxidantes y reductores por incremento del contenido en cromo, molibdeno, tungsteno y cobre.

El incremento del uso de las aleaciones de níquel en la producción de gas natural llevó al desarrollo de la aleación INCOLOY 925 (No9925), endurecida por envejecimiento. Para aplicaciones de alta temperatura en industria petroquímica, se desarrollaron INCONEL 725 y CARPENTER 625PLUS (No7716); y para aplicaciones en ambientes oxidantes: INCONEL 601(No6601), HASTELLOY 214 (No7214) y HR-160 (N12160), y NICROFER 603 GT y 45TM.

A continuación, se incluye un gráfico (figura 1.15) en el que se pueden observar distintas aleaciones base níquel, variando su composición por adición de varios elementos. Una de las aleaciones centrales en el desarrollo de los materiales base níquel es la aleación 600, señalada en la figura 1.15 y utilizada en el presente proyecto.

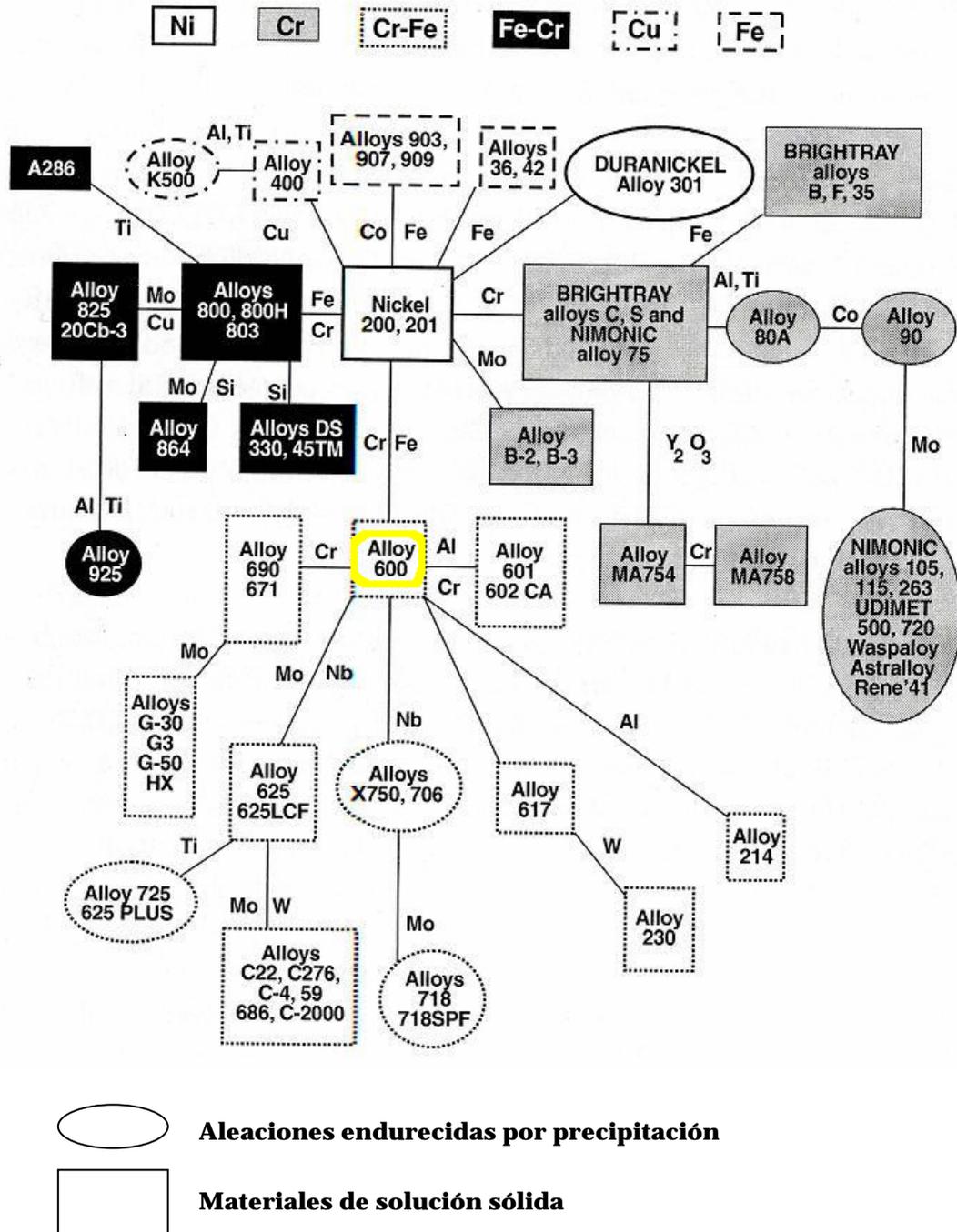


Figura 1.15 Desarrollo de las aleaciones de níquel.

Como podemos ver en el esquema, se han desarrollado numerosas aleaciones derivadas de Inconel 600 por adición de Cr o Al, formadores de óxidos protectores, o bien por adición de metales refractarios. Así, añadiendo aluminio y cromo a Inconel

600, se obtiene Inconel 601, mientras que, añadiendo molibdeno y niobio, se obtiene Inconel 625.

Podemos resumir la función de los principales aleantes en:

- Titanio y aluminio: formadores de fase endurecedora γ' .
- Cromo y aluminio: formadores de óxidos protectores.
- Molibdeno, wolframio y niobio: endurecedores de disolución sólida, formadores de precipitados de borde de grano que proporcionan mayor resistencia a alta temperatura.

En la siguiente tabla podemos ver la composición de algunas de las aleaciones mostradas en el gráfico anterior.

Tabla 1.3 **Composición de algunas aleaciones base níquel**

Número UNS	Nombre Común	Composición Química
S35045	Alloy 803	Ni 32-37 Cr 25-29 C 0,06-0,01 Al 0,15-0,6 Ti 0,15-0,6
N02200	Nickel 200	Ni 99 min C 0,15 max Cu 0,25 max Fe 0,4 max Mn 0,35 max S 0,01 max Si 0,035 max
N02201	Nickel 201	Ni 99 min C 0,2 max Cu 0,25 max Fe 0,4 max Mn 0,35 max S 0,01 max Si 0,035 max
N02211	Nickel 211	Ni 99 min C 0,15 max Cu 0,25 max Fe 0,75 max Mn 0,35 max S 0,01 max Si 0,035 max
N05500	Alloy k-500	Ni 63-70 Al 2,3- 3,15 C 0,25 max Fe 2 max Mn 1,5 max S 0,01 max Si 0,5 max Ti 0,35-0,85
N06004	65Ni-15Cr	Ni 57 min C 0,15 max Cr 14-18 Mn 1 max S 0,01 max Si 0,75-1.6
N06600	Alloy 600	Ni 72 min C 0,15 max Cr 14-17 Cu 0,5 max Fe 6-11 Mn 1 max S 0,0015 max Si 0,5 max
N06601	Alloy 601	Ni 58-73 Al 1-1,7 C 0,1 max Cr 21-25 Cu 1 max Fe 6-11 Mn 1 max S 0,0015 max Si 0,5 max

Su buena resistencia a la corrosión tanto en medios ácidos y alcalinos, como oxidantes y reductores, su buena resistencia mecánica, su buen comportamiento a elevada temperatura y su resistencia al creep; provoca una infinidad en las aplicaciones de estas aleaciones y su continua evolución, apareciendo periódicamente nuevas aleaciones con unas propiedades específicas para unos requerimientos dados.

9.2. Aplicaciones de las aleaciones de níquel

Las aleaciones base níquel se utilizan para un amplio rango de aplicaciones en ambientes corrosivos, de alta temperatura y resistencia mecánica. La resistencia a la corrosión puede ser requerida en aplicaciones en medios acuosos y ambientes de alta temperatura, donde son posibles una gran variedad de mecanismos de ataque. Teniendo en cuenta otras aplicaciones, donde se requiere una buena resistencia mecánica bajo diversos esfuerzos, como fatiga o creep, lleva a un amplio abanico en el uso de las aleaciones de níquel, desplazando en muchas aplicaciones al acero inoxidable. Las aplicaciones de las aleaciones de níquel son en general:

- Instalaciones en ambiente acuosos, agua de mar y aplicaciones atmosféricas.
- Producción de gas natural
- Procesos de la industria química.
- Procesos petroquímicos y refinería.
- Turbinas de gas.
- Misiles, cohetes e industria aeronáutica.
- Tratamientos térmicos y procesos térmicos.
- En centrales de producción de energía eléctrica.
- Aplicaciones eléctricas: en forma de cables donde están sometidas a altas temperaturas
- Aplicaciones en la industria de automoción
- Resistencia a la corrosión en metales fundidos
- Resistencia a la corrosión en sales fundidas

9.3. Inconel 600 y sus aplicaciones

Como se ha comentado, dentro de las distintas aleaciones base níquel, encontramos INCONEL 600, desarrollado en 1931, con un contenido en níquel del 72%, 16% en cromo y un 8% en hierro. Seguiremos hablando de sus propiedades en el capítulo 2 referente a materiales usados; para continuar, podemos encontrar INCONEL 600 en diversas aplicaciones que se describen a continuación.

En la **industria de la madera y papel**, INCONEL 600 ha desempeñado un papel crucial en las operaciones de digestores de pulpa continuos o por lotes durante más de treinta años.

El **gas natural** es una de las fuentes de energía más abundantes del planeta. Antiguamente, en esta industria se usaba principalmente acero, reservándose el uso de las aleaciones de níquel para válvulas o instrumentación. Actualmente, la resistencia a la corrosión de las tuberías de aleaciones de níquel son requeridas por:

- Buen comportamiento a alta temperatura (hasta 260°C) y presión.
- Aumentar métodos de recuperación tales como inyección de vapor o CO₂.
- Consideraciones de peso, especialmente en aplicaciones mar a dentro.
- Necesidad de una mayor resistencia a la corrosión en aplicaciones de sulfuro de hidrogeno, dióxido de carbono y cloro.

El uso de las aleaciones de níquel se ha extendido a los equipamientos en las **industrias petroquímicas y de refino**. Las condiciones adversas de corrosión y las elevadas temperaturas que se alcanzan en los procesos como en el refino de crudo y la producción de diversos productos como etileno, amoniaco y cloruro de vinilo, llevan al uso de estas aleaciones. Para el caso del INCONEL 600, encontramos su aplicación en la producción de cloruro de vinilo, donde se alcanzan temperaturas por encima de los 650°C, siendo el INCONEL 600 muy resistente al cloro libre en el proceso.

Encontramos una gran aplicación en las **Centrales Térmicas y Nucleares**, donde deberán resistir las altas temperaturas y corrosión de los gases de combustión. El INCONEL 600 se ha usado en plantas de energía nuclear; en reactores de agua a presión (PWR), para las tuberías del generador de vapor, boquillas y placas desviadoras. Esta siendo sustituido por INCONEL 690, con más contenido en cromo, con mejor comportamiento a la corrosión.

En los **procesos térmicos e industria de los tratamientos térmicos**, los requisitos en la elección del material son: resistencia a alta temperatura, a la corrosión en atmósferas específicas, fatiga térmica y shock térmico, así como resistencia al creep; junto con facilidad de fabricación y reparación de componentes. Los procesos de corrosión típicos en esta industria son: oxidación, carburización, halogenación, nitruración y sulfatación. El INCONEL 600 se utiliza en la fabricación de tubos radiantes, ofreciendo larga vida de servicio, largo tiempo entre revisiones y de ahí la elevada reducción de costes de mantenimiento. Encontramos también INCONEL 600 en silenciadores de caldera y almas de cables en procesos de térmicos y de sinterizado.

La presencia de **corrosión por sales fundidas**, es importante en tratamientos térmicos, procesamiento de metales e industrias de refinado de metales así como sistemas de energía solar y nuclear; donde las sales pueden proporcionar el medio de transferencia de calor y almacenamiento. La corrosión procede normalmente de la oxidación, seguida de la disolución de las especies oxidantes en los fluidos. El Inconel 600 se utiliza cuando se necesita una alta resistencia mecánica, o están presentes compuestos sulfúricos.

En común con otras aleaciones metálicas, las aleaciones de níquel pueden sufrir **ataque por metales fundidos**, tanto uniformemente o selectivamente a lo largo del borde de grano. INCONEL 600 se puede utilizar en contacto con sodio fundido, con

menor resistencia a la corrosión hasta la temperatura de 650°C, pero incrementándose ésta significativamente por encima de 700°C, particularmente bajo condiciones de fluido, donde los gradientes de temperatura pueden alcanzar los efectos de transferencia de masa. Altos niveles de oxígeno en el sodio también tienden a incrementar la corrosión, mientras que el carbono puede causar carburización, aunque menos que en los aceros inoxidable. También se usa en contacto con potasio fundido. El litio fundido es mucho más agresivo, produciéndose transferencia de masa por encima de 425°C. También se usa en mercurio fundido hasta temperaturas de 500°C, sin presentar ningún tipo de corrosión intergranular o pérdida de resistencia mecánica.

Por último, en la **industria de la automoción**, se utiliza Inconel 600 en una gran variedad de aplicaciones, debido a sus propiedades mecánicas a alta temperatura y excelente resistencia a la corrosión. La principal aplicación es en bujías, colectores de admisión, fuelles, catalizadores y silenciadores. INCONEL 600 se usa en la fabricación de fuelles, por sus características frente fatiga, junto con su resistencia a alta temperatura y a la corrosión por sales.

Las características mecánicas y térmicas del Inconel 600 serán descritas en el siguiente capítulo.

10. OBJETIVOS

El presente proyecto presenta resultados obtenidos en ensayos utilizando los líquidos iónicos LI-108 y LP-106 en contacto INCONEL 600/AISI 152100, continuando así una de las líneas de investigación del Departamento de Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena.

En este marco, nos proponemos al inicio del presente trabajo alcanzar los siguientes objetivos:

- Determinación de las características de ciertos LI como lubricantes en contactos acero/INCONEL 600, estableciendo medidas de fricción y desgaste.
- Establecer la variación del desgaste y coeficiente de fricción en función de la temperatura del ensayo y líquido iónico empleado.
- Determinar el mecanismo de desgaste mediante la observación de las huellas producidas en los ensayos pin-on-disk.