

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN.

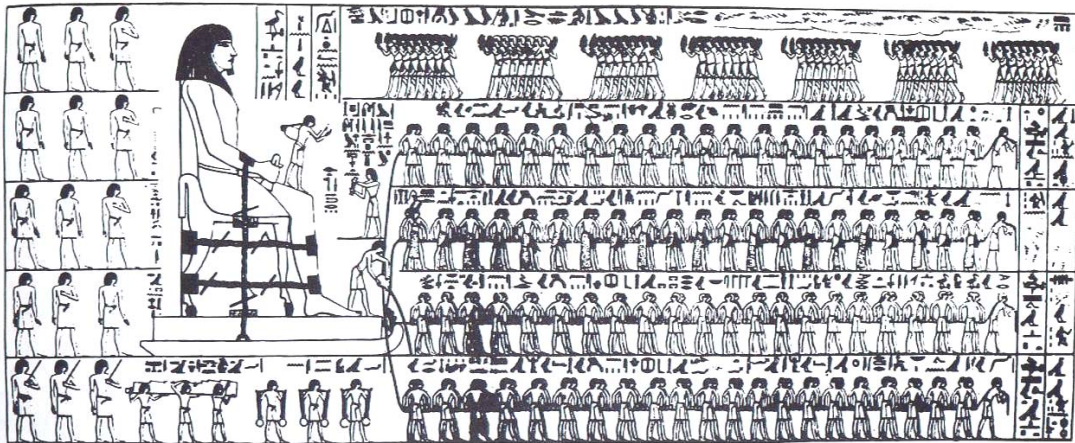


Figura 1.0. Mural datado del año 1.880 a. C. situado en la tumba de Tehuti-Hetep, El Bersheh (Egipto) ^[1]. Nótese la presencia del hombre situado en la parte delantera del patín y que está añadiendo un fluido en la superficie sobre la que se desliza la escultura.

Índice.

1.1. Antecedentes Históricos.	3.
1.2. Objeto y Alcance de la Tesis.	5.
1.3. Metodología Seguida en la Tesis.	5.
1.4. Estructura de la Tesis Doctoral	8.
1.5. Referencias Bibliográficas.	9.

1.1. Antecedentes Históricos.

El empleo de sustancias lubricantes que reduzcan la fricción entre elementos móviles es una técnica aplicada por el hombre desde hace milenios, han sido hallados en Oriente Medio ruedas de carruajes Mesopotámicos datadas del año 4.000 a. C. conteniendo un primitivo cojinete con trazas de arena bituminosa adherida ^[1]. También existen grabados egipcios datados del año 2.400 a. C. en Saqqara (Egipto) o como el mostrado en la figura 1.0, donde se representa el vertido de lubricantes líquidos para facilitar el arrastre de cargas sobre patines de madera. Estos arcaicos lubricantes podrían ser agua, aceites vegetales y animales, leche, o incluso sangre de animales ^[1,2].

Se considera imprescindible comentar, antes de continuar con una descripción de la evolución histórica de los lubricantes, que en las articulaciones del cuerpo humano se encuentra un sistema lubricado sometido a cargas dinámicas, equiparable a un cojinete industrial plano; siendo esta similitud ya comentada por Osborne Reynolds en 1886. En una rodilla, la estructura ósea equivaldría a la coraza exterior de metal duro, el cartilago articular sería la capa de metal blando antifricción y el líquido sinovial trabajaría como un aceite lubricante. No obstante, la Naturaleza está por encima de la tecnología humana, ya que este sistema articular es capaz de reparar pequeños daños sufridos sobre las superficies en contacto.

Las civilizaciones Griega y Romana desarrollaron numerosos mecanismos que buscaban la reducción de la fricción entre objetos, como los trabajos realizados por Hero donde destaca el diseño de compuertas sobre cojinetes pivotantes para facilitar su apertura; además, se han hallado en los restos de barcos romanos rescatados del Lago Nemi (Italia) plataformas giratorias apoyadas sobre esferas de bronce para facilitar su giro y que corresponderían a primitivos rodamientos de bolas.

A lo largo de la Edad Media se realizaron avances en maquinaria agrícola como norias o molinos de viento, con numerosos mecanismos que necesariamente deberían ser lubricados, el mejor ejemplo del grado de evolución técnica alcanzado en dicha época es el reloj de la Catedral de Salisbury, datado del año 1386, donde todo el mecanismo de engranajes está realizado en hierro forjado, sin utilizar piezas de madera, empleándose grasa animal como lubricante.

Durante el Renacimiento destacó principalmente la figura de Leonardo da Vinci el cual realizó numerosos estudios sobre las leyes de fricción y el diseño de diferentes tipos de cojinetes y rodamientos. En el siglo XVII Newton planteó y enunció las leyes fundamentales por las cuales se rigen los fenómenos de lubricación, descubriendo en 1687 el principio de la resistencia viscosa de los fluidos. Fue a finales del siglo XVIII cuando Coulomb demostró empíricamente las leyes de Da Vinci y estableció la distinción entre fricción estática y fricción dinámica ^[3].

Uno de los grandes eventos que marcó el uso masivo de lubricantes fue la Revolución Industrial, que comenzó en Inglaterra en 1760 y que a lo largo de unos ochenta años desencadenó un desarrollo a gran escala de la maquinaria industrial, acompañada de la invención de la máquina de vapor por Watt (1769) y el desarrollo del ferrocarril. En esta época también se desarrollaron las grasas, inicialmente formadas por la combinación de hidróxido sódico con aceites de origen animal; posteriormente se empleó cal en su fabricación, además de añadirse lubricantes sólidos para mejorar sus propiedades antifricción.

El segundo gran hito que supuso un desarrollo exponencial en la aplicación y uso de lubricantes fue el descubrimiento del petróleo, a mitad del siglo XIX, empleado inicialmente como combustible y posteriormente como fuente de diferentes compuestos obtenidos de su destilación, dentro de este grupo se incluyen los aceites lubricantes minerales. En 1857 aparecieron los primeros equipos trabajando con dispositivos hidráulicos, área donde también ha sido importante el empleo de fluidos lubricantes. La invención del motor de encendido provocado por Otto en 1872 y del motor de encendido por compresión por Diesel en 1892, el primer vuelo de los Wright en 1903 y el comienzo de la producción en serie de vehículos por Ford en 1909 supusieron el desarrollo del transporte tanto de personas como de mercancías y en consecuencia, el empleo mayoritario de derivados del petróleo como fuente de energía y como fluidos lubricantes. En 1884 Parsons construyó la primera turbina de vapor, equipos que también requerían el empleo de lubricantes líquidos. A partir de 1900 se obtuvieron lubricantes de una mayor calidad gracias al empleo de técnicas de destilación a baja presión ^(a) (y en consecuencia a menores temperaturas) que evitaban el craqueo de las cadenas de hidrocarburos pesados durante el proceso.

A lo largo de la primera mitad del siglo XX, la Primera Guerra Mundial (1914-1918) y especialmente la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) supuso un gran desarrollo tecnológico en carros de combate, navíos y aeronaves; equipos sometidos a condiciones de trabajo extremas y que requerían lubricantes con propiedades mejoradas, por ello fue durante el segundo tercio del siglo XX cuando se introdujo el empleo de aditivos para mejorar las prestaciones de los lubricantes minerales. También en este periodo se crearon los primeros aceites lubricantes sintéticos, con una mayor resistencia a la oxidación y una menor viscosidad a bajas temperaturas que los procedentes de la destilación del petróleo.

El análisis de lubricantes como herramienta de mantenimiento es una técnica empleada desde mediados del siglo XX, originalmente centrada en el mantenimiento de flotas de transporte aéreo y vehículos de tracción ferroviaria, para posteriormente implantarse en otros mecanismos lubricados como transmisiones, reductores, turbinas de gas. Posteriormente, el empleo de aceite en otras aplicaciones industriales como los aceites dieléctricos de transformadores dio

^a En inglés: *vacuum distillation*.

paso a la realización de análisis específicos para determinar el funcionamiento del sistema.

Inicialmente los parámetros estimados en lubricantes usados de MCI A eran básicamente la viscosidad, presencia de agua, dilución por combustible, estimación de la reserva alcalina, cuantificación de insolubles y materia carbonosa; la medida de metales de contaminación y desgaste se reducía a cuantificar los metales básicos (hierro, aluminio, cobre, plomo, estaño y silicio) empleando como técnica de análisis la espectrometría de absorción atómica. Para los aceites industriales los parámetros inicialmente cuantificados eran viscosidad, presencia de agua, presencia de insolubles, color del aceite, tendencia a la formación de espumas y medida de metales con los métodos anteriormente descritos.

En la actualidad, además de los parámetros *originales* determinados por equipos totalmente automatizados que prácticamente no requieren de la participación del técnico, se han introducido modernos equipos como cromatógrafos para la medida de combustible en el aceite, espectrómetros infrarrojos que son capaces de determinar el deterioro químico del aceite o la presencia de trazas de contaminantes orgánicos. La cuantificación de partículas de contaminación se realiza mediante contadores láser y la medida de los metales se ha ampliado a 21 elementos donde, además del desgaste y contaminación, se evalúa el contenido de aditivos organometálicos del lubricante.

Dentro del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia se han realizado en la última década diferentes tesis doctorales centradas en el estudio y aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo como el análisis de vibraciones [4,5], la termografía infrarroja [6], el desarrollo de sistemas expertos de diagnóstico [7,8,9] y especialmente en el análisis de lubricantes [3,10,11,12].

1.2. Objeto y Alcance de la Tesis.

La presente Tesis Doctoral realiza un estudio de las diferentes técnicas y equipos de análisis empleados para la determinación de los metales de contaminación y desgaste presentes en aceites lubricantes usados. El objetivo es comparar las técnicas empleadas a fin de detectar sus limitaciones y finalmente establecer el proceso óptimo de análisis que permita establecer eficazmente tanto del deterioro y contaminación del lubricante como la forma y gravedad del desgaste de cada elemento lubricado.

En los análisis realizados no han sido incluidos los aceites dieléctricos empleados en los transformadores eléctricos, ya que en estos elementos no se produce un desgaste mecánico propiamente dicho y el aceite trabaja como mero aislante. Tampoco han sido estudiadas las partículas presentes en grasas lubricantes, dada su elevada viscosidad, no distribuyen de manera homogénea los contaminantes y partículas de desgaste, por tanto, las muestras extraídas no son representativas, excepto si se recogiera la totalidad de grasa existente en los

elementos lubricados; dada la complejidad del muestreo se ha emplazado el análisis de grasas a futuros trabajos de investigación.

1.3. Metodología Seguida en la Tesis.

La tesis se ha realizado siguiendo las diferentes etapas presentadas gráficamente en la figura 1.1, detalladas a continuación:

1. Definición del objetivo y realización de consultas bibliográficas, para ello se partió de la hipótesis inicial de que los métodos actuales obtienen una información sesgada de la cantidad *real* de partículas presentes en el aceite. A raíz de dicha suposición se realizó una intensa búsqueda bibliográfica, comprobándose la hipótesis de partida, diferentes trabajos científicos prueban que las técnicas y metodologías de ensayos mundialmente empleados tienen importantes limitaciones para una cuantificación exacta de la concentración de metales existente en el lubricante.
2. Selección de dos parámetros que permitirían, a priori, evaluar un mayor espectro de las partículas presentes en el aceite. De un lado se incide en la necesidad de cuantificar el metal que se encuentra formando tanto partículas de gran tamaño como partículas de tamaños inferiores a los cinco micrómetros. El otro aspecto considerado es la necesidad de obtener información referente a qué tipo de desgaste sufre la máquina. Para la primera *intensificación de información* se opta un ataque ácido del aceite para disolver las partículas metálicas de mayor tamaño; la otra técnica que se selecciona es la ferrografía analítica.
3. Realización de una búsqueda bibliográfica particularizada para ambos métodos, y selección de los parámetros y condiciones de ensayo idóneas para llevar a cabo los ensayos iniciales.
4. Realización de manera paralela de los ensayos ferrográficos junto a las reacciones de ataque ácido de muestras. Estudiando los resultados parciales obtenidos y realizando modificaciones para mejorar los procesos seleccionados.
5. Una vez terminados los ensayos, en función de los resultados obtenidos, se optará por seleccionar el proceso que presente unas mejores prestaciones.
6. Comparativa con los métodos analíticos actuales y estudio de los resultados obtenidos.
7. Obtención de conclusiones.

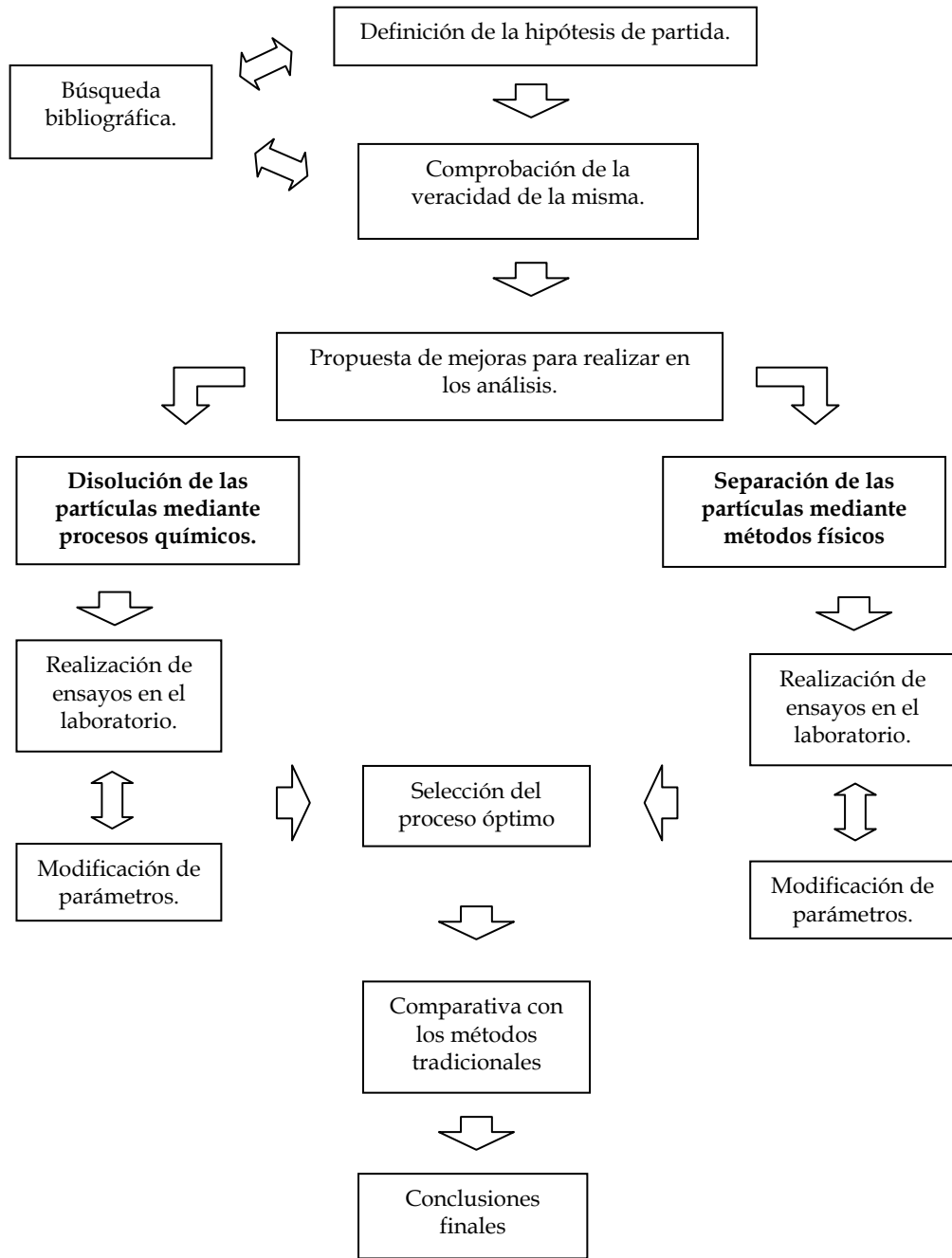


Figura 1.1. Proceso seguido en la realización de la tesis doctoral.

1.4. Estructura de la Tesis Doctoral.

El trabajo final desarrollado durante la realización de esta Tesis Doctoral y aquí presentado, se subdivide en ocho capítulos. En el capítulo primero se realiza una introducción histórica del empleo de lubricantes para pasar posteriormente a la definición del objetivo de la Tesis y a describir la metodología seguida. A lo largo del segundo capítulo, se describen las diferentes técnicas de análisis de lubricantes empleadas para realizar un diagnóstico del mecanismo lubricado.

En el capítulo tercero se comentan con detalle los diferentes tipos de desgaste que puede sufrir un mecanismo así como la morfología de las partículas asociadas a cada uno de dichos fenómenos degenerativos; en último lugar se describen las principales técnicas analíticas para la determinación tanto cualitativa como cuantitativa de metales en aceites lubricantes.

El cuarto capítulo detalla los ensayos realizados para aislar las partículas presentes en un fluido lubricante mediante la aplicación de un campo magnético y también realizando un filtrado con membranas poliméricas. Análogamente, el capítulo quinto describe los ensayos realizados para la evaluación del contenido de metales mediante espectrometría de emisión de plasma.

Los diferentes ensayos realizados mediante los métodos seleccionados son comparados en el capítulo sexto con las técnicas tradicionales de análisis, comprobando de este modo la efectividad de los nuevos tratamientos propuestos.

En el último capítulo de la Tesis se comentan las principales conclusiones obtenidas y los trabajos futuros propuestos a raíz de los resultados de las investigaciones realizadas. También han sido incluidos cuatro anexos donde se detallan cálculos y tablas que complementan la información descrita en los siete capítulos principales de la tesis doctoral.

1.5. Referencias Bibliográficas.

-
- 1 Caines, A.; Haycock, R. *Automotive Lubricants Reference Book*. Society of Automotive Engineers. 1996.
 - 2 Dowson, D. *History of Tribology*. Longman. 1979.
 - 3 Fygueroa Salgado, S. J. *Diagnóstico de Motores de Encendido por Compresión de Automoción Mediante Análisis del Lubricante*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 1993.
 - 4 Barilá Rodríguez, D. *Contribución al Diagnóstico de Averías en Motores Diesel por Análisis de Vibraciones*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 1998.
 - 5 Olmeda González, P. C. *Diagnóstico de Fallos de Motores Diesel Mediante el Análisis de la Oscilación del Bloque*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 2002.
 - 6 Peralta Uría, R. W. *Aplicación de la Termografía Infrarroja al Diagnóstico de Fallos en Motores Diesel*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 2001.
 - 7 Oliver Palomero, E. *Estudio de Sistemas de Adquisición y Tratamiento de Datos en Motores de Combustión Interna Alternativos*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 1991.
 - 8 Wonsang Amen, Y. A. *Diagnóstico de Motores de Encendido por Compresión de Automoción a Partir del Monitorizado de sus Prestaciones*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 1993.
 - 9 Chacón Velasco, J. L. *Diagnóstico de Fallos Mediante la Utilización de Información Incompleta e Incierta. Aplicación a Motores Diesel*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 2001.
 - 10 Ontiveros Padilla, L. E. *Diagnóstico de Motores de Encendido por Compresión Marinos mediante el Análisis de su Lubricante*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 1994.
 - 11 Morán Redondo, R. *Origen, Efectos y Tratamiento de las Contaminaciones de Lubricantes y Combustibles en Motores Marinos de Combustión Interna*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 1997.
 - 12 Tormos Martínez, B. *Contribución al Diagnóstico de Motores Diesel Basado en el Análisis del Lubricante Usado*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 2002.

CAPÍTULO 2.

DIAGNÓSTICO DE EQUIPOS LUBRICADOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DEL ACEITE USADO.

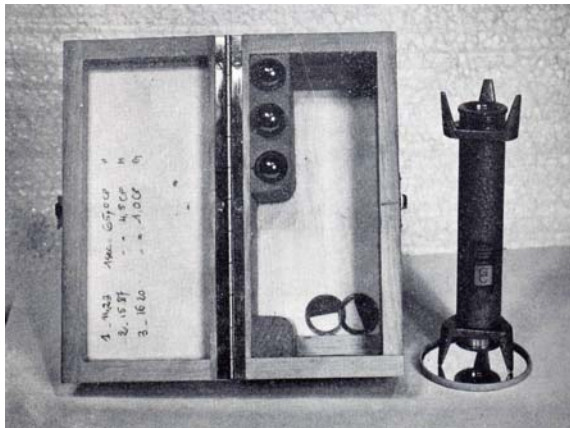


Figura 2.0. Viscosímetro de caída de bola, 1970. [1].

Índice

2.1. Introducción.	12.
2.2. Mantenimiento de Equipos Lubricados.	12.
2.3. Los Aceites Lubricantes.	16.
2.4. Determinación de la Degradación del Lubricante.	20.
2.5. Determinación de la Contaminación del Lubricante.	30.
2.6. Estudio del Proceso de Toma de Muestras.	34.
2.7. Referencias Bibliográficas.	40.

2.1. Introducción.

A lo largo de este capítulo se comentarán las principales modalidades de mantenimiento empleadas en vehículos y maquinaria lubricada. Posteriormente se definen los principales tipos de lubricantes y aditivos empleados a nivel industrial y se describen los distintos métodos de laboratorio para el análisis de los lubricantes usados, y cuyos resultados son empleados en el diagnóstico de la máquina. Para cada uno de los parámetros, se realiza una breve descripción de las técnicas analíticas empleadas en su evaluación. En último lugar se incide en la importancia del proceso de toma de muestras.

2.2. Mantenimiento de Equipos Lubricados.

El mantenimiento es el conjunto de acciones o técnicas que permiten conservar o restablecer un equipo en un estado específico y asegurar un determinado servicio con un coste mínimo y la máxima seguridad. En la actualidad, el mantenimiento a escala industrial, realiza funciones tan importantes como cualquiera de las actividades productivas de la empresa. Los principales objetivos del mantenimiento son ^[2,3] :

- A. Reducir al máximo los costes debidos a las paradas por averías accidentales de la maquinaria que comporten pérdidas de producción o de servicios, incluyendo en tales costes los correspondientes al propio mantenimiento.
- B. Limitar el deterioro de la maquinaria y en consecuencia reducir faltas de calidad en el producto o en el servicio (caso de retrasos en el transporte de pasajeros por averías del vehículo).
- C. Proporcionar conocimientos y asistencia, a partir de la experiencia adquirida, a todos aquellos que intervienen en el proyecto y gestión de nuevos equipos o instalaciones.
- D. El fin último del servicio de mantenimiento es determinar el momento en que debe cesar la vida útil de la máquina (por obsolescencia, por pérdida de rendimiento, por suponer un riesgo para los trabajadores, etc)

A continuación se describen de manera resumida, los tipos de mantenimiento fundamentales, indicándose sus características principales.

2.2.1. Mantenimiento Correctivo.

En esta modalidad de mantenimiento, el trabajo del técnico queda reducido a la reparación cuando sobreviene el fallo a la máquina, las inversiones previas son mínimas pero las desventajas son importantes como imprevisión de la avería o un alto costo por paradas improductivas. Sólo se recomienda la adopción de este tipo de mantenimiento en los siguientes casos:

- Si los costes indirectos del fallo son mínimos y los requerimientos de seguridad lo permiten.
- Si la empresa está constituida por máquinas en la que los paros eventuales no son críticos para la producción.
- Si la empresa adopta una política de renovación frecuente del material.

2.2.2. Mantenimiento Preventivo o Sistemático.

Este método de mantenimiento consiste en efectuar las intervenciones en los equipos antes de que se produzca la avería y a intervalos fijos previamente determinados. Los principales inconvenientes que presenta este tipo de mantenimiento son las paradas necesarias para realizar las revisiones y las pérdidas debidas a la sustitución de piezas que aún no han llegado al final de su vida útil.

2.2.3. Mantenimiento Predictivo.

Es una variante del mantenimiento preventivo pero que permite predecir el estado y grado de fiabilidad de una máquina sin necesidad de pararla un largo periodo de tiempo. Mediante el mantenimiento predictivo es posible ajustar con mayor precisión el ciclo de vida real de los componentes susceptibles de cambio o renovación. La mayor desventaja de esta modalidad de mantenimiento es el coste de los equipos empleados en el diagnóstico y la elevada formación requerida por el personal. Algunas de las técnicas empleadas [4] son: análisis de vibraciones, termografía y análisis de lubricante.

2.2.4. Mantenimiento Modificativo.

Incluye este tipo de mantenimiento las diferentes tareas complementarias de las tareas del mantenimiento [5], siendo principalmente:

- Mantenimiento de instalaciones accesorias (líneas eléctricas, climatización, teléfonos, saneamiento, etc).
- Acople de accesorios, instalación de nuevos equipos o la realización de modificaciones en las máquinas para su mejora, modernización o adecuación a nuevas demandas.
- Renovación o reconstrucción de equipos, realizando revisiones completas de las instalaciones y procediendo a la renovación de algunos de los elementos o a la retirada total del grupo, en estos casos se estudia la posibilidad de la reutilización de componentes aún en buen estado.
- Participación en programas de investigación, asesoría técnica, puesta punto de maquinaria y comprobación de prestaciones de equipos según contrato.

2.2.5. Mantenimiento Productivo Total (TPM) ^(a).

Este modo de mantenimiento iniciado en Japón, aglutina las funciones de mantenimiento y producción, con el objetivo de la constitución de una estructura empresarial que obtenga la máxima eficiencia del sistema de producción (*eficiencia global*). En el modelo TPM la responsabilidad de la vigilancia y el mantenimiento básico de primer nivel corresponde a los operadores de cada una de las máquinas. Se busca englobar no solo a los departamentos de producción y mantenimiento, sino al resto de los departamentos de la empresa como serían investigación y desarrollo, ventas o administración; donde colaboren todos los miembros.

Se crea en el entorno de trabajo mecanismos para prevenir las diferentes pérdidas, alcanzándose un nivel óptimo de operación, con la prácticamente nula existencia de accidentes, defectos en los productos, averías o fallos ^[6].

2.2.6. Mantenimiento Proactivo.

Esta modalidad de mantenimiento se centra en realizar una serie de actuaciones sobre los equipos que eviten el fallo de los mismos. El mantenimiento proactivo emplea la información suministrada por las técnicas de predictivo, actuando sobre las variables de entrada al sistema para evitar el fallo de la máquina. El conocimiento obtenido sobre el funcionamiento del equipo y la detección de los principales problemas detectados mediante la metodología proactiva son aplicados en la fase de diseño de nuevas máquinas, eliminando de este modo la causa del fallo desde el origen.

2.2.7. Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM) ^(b).

Las nuevas exigencias de calidad y la búsqueda continua de una reducción de costos por fallos han provocado la aparición de nuevas formas de trabajo en el área del mantenimiento ^[7], destacando el mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM) que se define como el proceso usado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier sistema dentro de su contexto de operación. Los puntos fundamentales del RCM son los siguientes.

- Determinación de las funciones a cumplir por el sistema así como la selección de mecanismos de protección óptimos que eviten fallos. Se optimizarán las funciones de los diferentes elementos para evitar operaciones redundantes innecesarias pero sin poner el peligro la seguridad del equipo.
- Identificación de las circunstancias y hechos que dan lugar a un fallo así como las consecuencias que la aparición de los mismos tienen sobre el normal funcionamiento del equipo.

^a siglas del nombre en inglés *Total Productive Maintenance (TPM)*.

^b siglas del nombre en inglés *Reliability-Centered Maintenance (RCM)*.

- Establecer claramente las causas de los diferentes fallos y no confundirlas con síntomas. A continuación se deberán evaluar las consecuencias de estos fallos; con el conocimiento del sistema, el RCM busca tanto la prevención de los fallos como evitar o reducir las consecuencias de los mismos cuando éstos tienen lugar.
- Finalmente se selecciona el plan de mantenimiento a aplicar en función de las particularidades del sistema con el que se está trabajando, optimizándose las tareas realizadas y llevando a cabo un mantenimiento más efectivo.

2.2.8. Mantenimiento Asistido por Ordenador (MAO).

El empleo de la informática es indispensable en la aplicación de los diferentes tipos de mantenimiento anteriormente mencionados, especialmente en empresas de donde la cantidad de datos e información manipulada es elevada. Los sistemas de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) son sistemas informáticos capaces de gestionar el mantenimiento basándose en una serie de datos de entrada (elementos a mantener, operaciones realizadas, repuestos de almacén, etc.) y que proporcionará una serie de datos de salida como ratios de gestión, información de incidencias o datos sobre averías.

El objetivo principal de un sistema GMAO es proporcionar al departamento de mantenimiento una información fiable e inmediata de: stock de piezas para realizar reparaciones, datos históricos de las máquinas o de las tareas programadas un día determinado; permitiendo así una optimización de las tareas de mantenimiento [2]. Las principales características de este sistema son:

- Es un software de gestión estándar o desarrollado a medida.
- Requiere de una infraestructura informática para su correcto funcionamiento: redes de comunicaciones, ordenadores, software básico y contiene una base de datos encargada de recoger toda la información relacionada con el mantenimiento.
- Proporciona al personal de mantenimiento todo el soporte necesario para llevar el control de las tareas y tomar decisiones para establecer cambios de actuación.

2.3. Aceites Lubricantes.

2.3.1. Definición.

Un lubricante es toda sustancia que pueda utilizarse para reducir el rozamiento entre piezas y mecanismos en movimiento. Los lubricantes cumplen una serie de funciones durante su trabajo [8,9,10]:

- Reducción de la fricción y desgaste; separando las superficies en movimiento.
- Controlar la temperatura; absorbiendo y posteriormente disipando el calor generado por la máquina.
- Prevención de la corrosión.
- Control de la contaminación; manteniendo los contaminantes en suspensión y transportándolos hasta los filtros.
- Transmisión de potencia; en el caso de aceites hidráulicos.

2.3.2. Aceites Base.

Los principales constituyentes de un lubricante son los denominados aceites base, los cuales se clasifican en tres grupos según su origen: minerales, sintéticos y vegetales. Los **aceites base minerales** proceden de la destilación del petróleo en las refinerías, donde según el crudo de origen, se subdividen en:

- **Parafínicos:** contienen gran cantidad de cadenas de alcanos ramificados, baja densidad ($0,880 \div 0,890 \text{ g/cm}^3$), reducida variación de viscosidad con la temperatura o índice de viscosidad elevado ($\cong 100$), baja volatilidad y bajo poder disolvente (tendencia a la formación de lodos).
- **Nafténicos:** contienen cadenas de alcanos de estructuras cíclicas y policíclicas, presentan propiedades contrarias a los parafínicos conforme más cortas son las cadenas fijadas a los ciclos. Poseen una densidad elevada ($>0,900 \text{ g/cm}^3$), bajo índice de viscosidad ($40 \div 60$), considerable volatilidad y un gran poder disolvente.
- **Aromáticos:** están compuestos por cadenas no saturadas y anillos aromáticos, tienen una densidad superior a parafínicos o nafténicos y su índice de viscosidad es muy bajo, llegando incluso a valores negativos. Forman fácilmente emulsiones con el agua y tienen tendencia a la oxidación, provocando la formación de productos resinosos o asfálticos, acompañados de derivados corrosivos.

Los **aceites base sintéticos** son obtenidos a partir de diferentes fluidos de síntesis orgánica que se mezclan para obtener aceites lubricantes de prestaciones

superiores a las bases minerales tradicionales. Los principales compuestos empleados en la formulación de aceites sintéticos son los siguientes:

- **Hidrocarburos sintéticos:** son compuestos orgánicos obtenidos a partir de monóxido de carbono e hidrógeno mediante el proceso Fisher-Tropsch, por lo tanto no proceden del petróleo. Al ser compuestos totalmente sintéticos contienen rangos de cadenas de hidrocarburos perfectamente definidos.
- **Polialfaolefinas (PAO).** Son hidrocarburos puros de parafinas ramificadas, con nulo contenido de azufre, fósforo, ceras o metales. La viscosidad viene determinada por las ramificaciones. Las principales desventajas son su bajo poder solvente de aditivos, limitada resistencia a la oxidación, además de tender a disolver sellos y manguitos de goma.
- **Diésteres.** Proceden de la reacción de di-ácidos orgánicos con alcoholes. Presentan una excelente fluidez a bajas temperaturas y bajos puntos de congelamiento, alto índice de viscosidad, excelente resistencia al corte y elevada estabilidad térmica. La principal desventaja es su alto poder disolvente, alterando sellos, pinturas y recubrimientos de los elementos lubricados. Se tornan inestables con la presencia de agua dando lugar a compuestos ácidos.
- **Poliol-ésteres.** Son generados a partir de la reacción de mono-ácidos de cadenas de 5 a 10 carbonos con poli-alcoholes como los glicoles. Sus prestaciones mejoran las de los diésteres, además algunas variedades son biodegradables. La principal desventaja es el alto poder disolvente, tendiendo a alterar sellos, pinturas y acabados con mayor intensidad que los diésteres.
- **Ésteres fosfatados:** Son obtenidos a partir de reacciones de fenoles sustituidos con ácido fosfórico. Tienen una excelente estabilidad térmica y resistencia fuego. Dado que su densidad es superior a la del agua, ante una posible contaminación, ésta flotaría sobre el lubricante. Son incompatibles con aceites minerales. Tienen un bajo índice de viscosidad. Están siendo sustituidos por otros compuestos dada su elevada toxicidad.
- **Poliglicoles (PAG).** Son sintetizados a partir de la adición de óxido de etileno a iniciadores que contienen oxígeno como serían un alcohol, un glicol o un éter. Su naturaleza polar les confiere buenas propiedades lubricantes. Tienen una baja generación de lodos, ya que sus productos de descomposición por altas temperaturas son gaseosos. Son biodegradables. Actualmente son los principales componentes de los líquidos de frenos de los automóviles.
- **Siliconas.** Son fluidos específicos formados por cadenas de átomos de de silicio y oxígeno con cadenas ramificadas. Tienen un elevado índice

de viscosidad, superior a 300, son químicamente inertes y no tóxicos. Presentan una buena fluidez a bajas temperaturas, baja volatilidad, resistencia elevada al fuego y reducida afinidad al agua. No suelen ser miscibles con otros fluidos derivados del petróleo.

En la tabla 2.1 se muestran las propiedades físicas fundamentales de los principales componentes de los aceites sintéticos, comparándose con aceites minerales.

Tipo de compuesto		Viscosidad a 100°C (cSt)	Densidad Relativa	Índice de Viscosidad	Punto de Inflamación (°C)	Punto de congelación (°C)
Aceite sintético	Polialfaolefina	18,12	0,870	126	221	- 79
	Diéster	19,6	0,955	176	232	- 51
	Poliol éster	15,0	0,975	135	232	- 51
	Poliglicol	50	1,01	150	177	- 55
	Éster fosfórico	6,7	1,02	90	220	- 80
Aceite Mineral	Fabricante 1	7,8	0,842	98	156	- 15
	Fabricante 2	19	0,860	103	200	- 15
	Fabricante 3	30	0,870	105	208	- 9

Tabla 2.1. Propiedades físicas típicas de lubricantes sintéticos y minerales.

En último lugar se reseñan los aceites base de origen vegetal que son obtenidos a partir de procesos de refinado de semillas de soja, girasol, maíz o canola. Su principal ventaja es la elevada **biodegradabilidad** que presentan, haciéndolos idóneos para uso en motores de dos tiempos, o zonas de engrase abierto. Las mayores desventajas que presentan frente a los de origen mineral son su elevado coste y su baja resistencia a la oxidación.

2.3.3. Aditivos.

Los aditivos son los compuestos químicos añadidos a los aceites base, mejorando sus propiedades, seleccionándose en función del uso final del lubricante. La cantidad adicionada de estos elementos no suele superar el 5% del conjunto. Los grupos principales de aditivos existentes en el mercado son:

- **Reguladores del punto de congelación:** se encargan de reducir el punto de congelación del aceite dificultando la cristalización de las parafinas. Su

estructura química está compuesta por largas cadenas de poliacrilatos y polimetacrilatos.

- **Modificadores de viscosidad:** aumentan el índice de viscosidad (capacidad de mantener la viscosidad de un aceite con el aumento de temperatura) de los lubricantes. En la figura 2.1 se muestra su comportamiento, a altas temperaturas, las cadenas de polímero se solvatan, rodeándose de moléculas de aceite base, haciendo que aumente la viscosidad del lubricante; a bajas temperaturas, los polímeros están menos solvatados, no interfiriendo en el flujo de aceite. Los modificadores de la viscosidad han dado lugar a los aceites denominados multigrados. Los principales polímeros empleados son copolímeros de olefinas, polimetacrilatos, copolímeros de estireno-butadieno y poliisopreno hidrogenado.

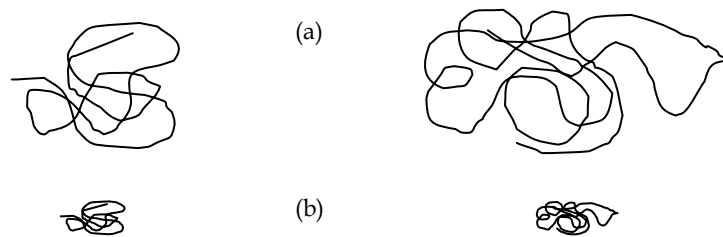


Figura 2.1. Modificadores de la viscosidad en altas (a) y bajas (b) temperaturas.

- **Detergentes o dispersantes:** la principal función de estos aditivos es minimizar los depósitos en las partes calientes del motor, principalmente pistones y segmentos. Mantienen la carbonilla, lodos y demás insolubles en suspensión en el aceite, evitando su aglutinación y deposición. La estructura más común de los detergentes es la de sulfonatos unidos mediante metales divalentes como calcio o magnesio, los cuales además presentan buenas propiedades antioxidantes e inhibidoras de corrosión. Las moléculas de los dispersantes presentan una doble polaridad, el extremo polar, generalmente formado por poliaminas se une a la partícula mientras que el extremo apolar, compuesto por poliisobutileno, se orienta hacia el seno del lubricante. Las partes polar y apolar están unidas por un puente de ácido succínico.
- **Antioxidantes:** se encargan de evitar que el aceite, en presencia de aire y a altas temperaturas, se oxide, tornándose ácido y formando lodos o barnices, todos estos fenómenos provocan además un oscurecimiento del aceite. Los antioxidantes se encargan de neutralizar los radicales libres, principales responsables de la degradación. La mayoría de los aceites base ya contienen en su composición ciertos antioxidantes naturales, no obstante, su concentración

es menor a la recomendada, por ello se añaden nuevos aditivos como son las aminas, fenoles sustituidos o el cinc dialquilditiofosfato ZDDP.

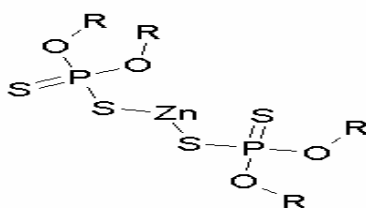


Figura 2.2. Estructura del dialquilditiofosfato de cinc (ZDDP).

- **Antidesgaste:** estos tipos de aditivos protegen del desgaste por abrasión a los cojinetes sujetos a grandes cargas, suelen ser compuestos multifuncionales que también protegen de fenómenos corrosivos. Su modo de protección se basa en la creación de una fina película que recubre los elementos en contacto adheriéndose a ellos con cierta fuerza. El aditivo más utilizado para este propósito es el ZDDP ya comentado en otros apartados, demostrando su multifuncionalidad.
- **Inhibidores de corrosión y herrumbre:** los inhibidores de la corrosión protegen a los cojinetes de base cobre, estaño o plomo; suelen ser detergentes básicos y compuestos protectores de imidazol, benzotriazol y ZDDP. Los inhibidores de herrumbre forman una superficie polar adherente sobre las superficies de acero, que repele el agua e impide la corrosión del hierro; en lubricantes para MCI se suelen emplear sulfonatos mientras que en aceites industriales del tipo R&O^(c) (herrumbre y oxidación) se emplean derivados de ácidos fosfóricos y ácidos grasos de cadenas largas.

2.4. Parámetros para la Determinación de la Degradación del Lubricante.

2.4.1. Viscosidad.

La viscosidad es la resistencia (o frotamiento interno) existente entre las moléculas de un fluido al deslizarse entre sí. Los aceites minerales y las mezclas de aceites minerales son fluidos newtonianos, donde el esfuerzo cortante, τ , es proporcional al gradiente de velocidades, obteniéndose el valor de la viscosidad absoluta, μ , según la ecuación 2.1:

^c Siglas del término en inglés *Rust* (herrumbre) y *Oxidation* (oxidación).

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dz}} \quad (\text{ec. 2.1})$$

La viscosidad absoluta, tiene como unidad en el sistema cegesimal el Poise (P) mientras que en el sistema internacional se expresa en Pouiseville (PI). En la práctica, la viscosidad absoluta se determina a partir de la viscosidad cinemática, ν , y la densidad, ρ , las cuales son más sencillas de determinar experimentalmente.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{ec. 2.2})$$

La unidad de la viscosidad cinemática en el sistema cegesimal es el Stoke (St), en el SI se expresa en m^2/s , equivalente a 10^4 St, o dicho de otro modo, 1 cSt equivale $1 \text{ mm}^2/\text{s}$.

La viscosidad es la propiedad física más importante que define a un aceite lubricante, determinando el establecimiento de la capa de lubricación. Si se emplea un aceite excesivamente viscoso para los requerimientos de trabajo, las pérdidas mecánicas aumentan debido a un mayor rozamiento. La selección de un lubricante de una viscosidad más baja de la requerida puede dar lugar a desgaste en las piezas por pérdida de la capa de lubricación. Los lubricantes son seleccionados siguiendo la curva de Stribeck mostrada en la figura 2.3, donde son considerados los parámetros de velocidad (N), viscosidad del lubricante (μ) y la carga aplicada (P).

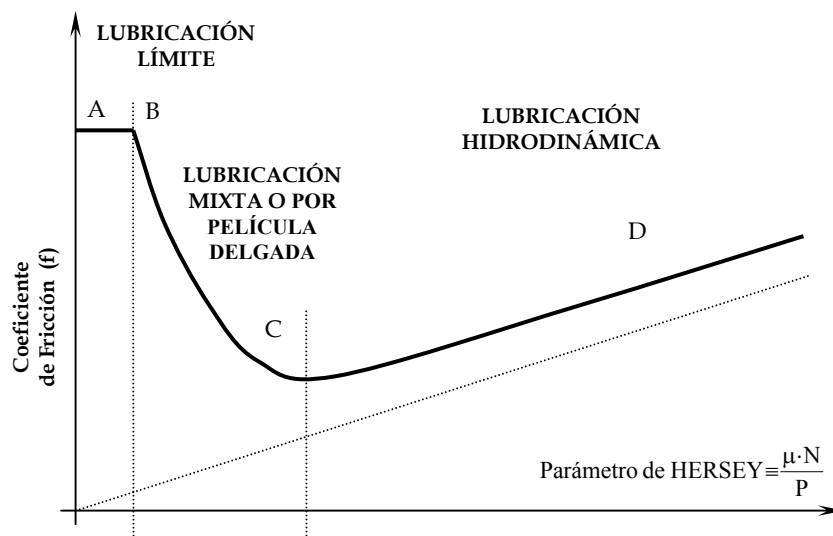


Figura 2.3. Curva de Stribeck.

La zona de trabajo ideal de los puntos lubricados de una instalación deberá situarse en la zona de mínimo frotamiento (alrededor del punto C), debido a que es necesario tener márgenes de seguridad en previsión de holguras o sobrecargas temporales, la zona real de trabajo se extiende a lo largo del segmento CD.

Otro de los parámetros de selección de un tipo de lubricante en su viscosidad a una temperatura de trabajo determinada, siendo este criterio empleado en la clasificación de aceites según SAE ^(d) para aceites de motor y engranajes, mientras que la clasificación ISO define los grados de viscosidad de aceites hidráulicos. Ambas clasificaciones y las equivalencias entre ellas se muestran en el Anexo A.

La viscosidad cinemática se determina por distintos métodos, clasificándose habitualmente según el tipo de equipo de laboratorio empleado en el ensayo:

1. Mediante la medida del tiempo de circulación del aceite a través de un capilar, pertenecen a este grupo los viscosímetros de Ostwald o Ubbelohde. El valor de la viscosidad cinemática del fluido se calcula directamente, multiplicando el tiempo tardado en fluir por la constante de calibración del aparato.

^d Siglas de la Sociedad de Ingenieros de Automoción, en inglés *Society of Automotive Engineers*.

2. Mediante la medida del tiempo de vaciado de un recipiente de volumen fijo, el cual tiene un orificio de diámetro perfectamente conocido, en este grupo se incluyen los viscosímetros de Saybolt, Redwood y Engler.
3. Mediante el tiempo de desplazamiento de un objeto sólido a través del aceite, principio que utilizan los viscosímetros de caída de bolas. Para la determinación de la viscosidad, se mide el tiempo que tarda una bola en caer desde un extremo hasta la base de un tubo lleno del aceite analizado.
4. Mediante el cizallamiento que se produce en el aceite contenido entre dos superficies, sometidas a un movimiento relativo, a este grupo pertenecen los viscosímetros de Mac Michel.

Los distintos viscosímetros tienen en común el hecho de que la temperatura del ensayo debe de ser perfectamente conocida, homogénea y constante a lo largo de todo el proceso, ya que la viscosidad depende en gran medida de la temperatura. Las temperaturas más empleadas en estos ensayos son 40°C y 100°C^(e), que son utilizadas en el cálculo del índice de viscosidad.

La viscosidad cinemática puede ser alterada por distintos factores, tal como muestra la tabla 2.2, por ello, realizando un seguimiento de la evolución de su valor es posible detectar anomalías en el funcionamiento del motor.

	Descenso de Viscosidad	Aumento de Viscosidad
Cambios en la estructura del lubricante	Ruptura de las moléculas. Degradación de los aditivos modificadores del IV.	Polimerizaciones. Oxidación. Pérdidas por evaporación. Formación de lodos y lacas.
Contaminación	Combustible. Disolventes. Mezcla de aceite (de viscosidad inferior).	Agua (emulsiones). Espumas. Insolubles. Mezcla con aceite de viscosidad superior.

Tabla 2.2. Parámetros que alteran el valor de la viscosidad.

2.4.2. Densidad.

La densidad es la relación existente entre la masa de lubricante y el volumen ocupado, medido a una temperatura constante. La densidad varía en función de la naturaleza del lubricante, los aceites de base parafínica tienen menor densidad que

^e Estos valores en grados Celsius equivalen a los valores en grados Fahrenheit 212 F y 210 F.

los de tipo aromático o nafténico. En el mantenimiento de instalaciones no se suele realizar un seguimiento de la densidad del lubricante debido al elevado volumen de aceite requerido para realizar la determinación (100 ml aproximadamente) y a la poca información que da su medida. La variación de la densidad de un aceite vendría dada por una degradación por el uso del mismo (la pérdida de compuestos volátiles daría lugar a un aumento en la densidad) o por la entrada de contaminantes, que puede dar lugar tanto a un aumento como a una disminución de densidad.

Existe una escala específica para definir la densidad de lubricantes, denominada densidad API ^(f), la cifra dada por este parámetro se obtiene a partir de la ecuación 2.3.

$$API = \frac{141,5}{\rho} - 131,5 \quad (\text{ec. 2.3})$$

A partir de esta ecuación los aceites de grado API por encima de 10 tendrán una densidad superior al agua y los de grado por debajo de 10 una densidad menor a la unidad. Por tanto, a mayor grado API menor será la densidad del aceite.

2.4.3. Punto de Inflamación.

El punto de inflamación de un aceite es la temperatura mínima a la cual, el aceite desprende la cantidad suficiente de vapores para inflamarse, momentáneamente, al serle aplicada una llama directa.

Los lubricantes están compuestos por una amplia gama de especies moleculares, por ello cuando, son calentados, las fracciones más volátiles pasan al aire que rodea la superficie del aceite que está siendo calentado, esta concentración de volátiles aumenta con la temperatura, llegando a un punto en el cual, al ser aplicada una llama directa, estos vapores se inflaman durante un instante, no propagándose la combustión hasta el resto de muestra líquida.

Existen tres ensayos estandarizados para determinar el punto de inflamación de lubricantes:

- **Punto de inflamación en vaso abierto (Cleveland)**, este método emplea un recipiente metálico que es llenado de lubricante, el aceite se calienta de manera escalonada y periódicamente se pasa una pequeña llama sobre su superficie. Este proceso continúa hasta que un pequeño destello, aparece sobre la muestra al pasar la llama de prueba, la temperatura del líquido en ese momento será el punto de inflamación en vaso (o copa) abierto.

^f Siglas del Instituto Americano del Petróleo, en inglés *American Petroleum Institute*.

- **Punto de inflamación en vaso cerrado (Pensky-Martens)**, en este ensayo, la muestra es confinada en un recipiente cerrado, en cuyo interior la llama de prueba es introducida según un cierto intervalo. El recipiente se calienta siguiendo un proceso fijado y adicionalmente se puede agitar la muestra para homogeneizarla durante el desarrollo del ensayo.
- **Ensayo en copa cerrada reducido**, es un ensayo similar al de Pensky-Martens pero donde se emplea un volumen muy inferior de muestra en el análisis.

El punto de inflamación de un lubricante puede ser afectado por diversos parámetros, tal y como muestra la tabla 2.3. Estas variaciones en el valor del punto de inflamación son empleadas para estimar la procedencia de contaminantes del motor.

	Disminución del punto de inflamación	Aumento del punto de inflamación
Cambios en la estructura del lubricante	Craqueo térmico.	Polimerizaciones.
Contaminación	Combustibles. Añadido de aceite de distintas propiedades.	Agua. Residuos carbonosos. Glicoles. Mezcla con aceite de distintas propiedades.
Pérdidas del lubricante	-----	Evaporación térmica. Deshidratación por vacío.

Tabla 2.3. Factores que modifican el punto de inflamación de un lubricante.

El ensayo más preciso para la determinación de contaminación por combustible es el de vaso cerrado, ya que es más sensible para porcentajes bajos de contaminante en el lubricante que el método de vaso abierto, tal y como pone de manifiesto la figura 2.4.

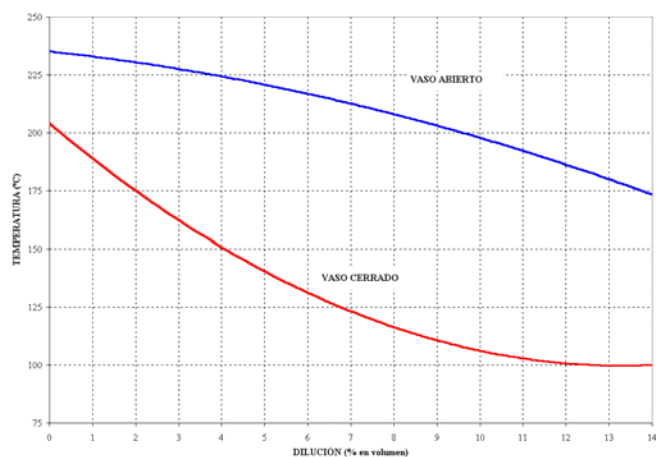


Figura 2.4. Determinación de la contaminación por combustible de un aceite lubricante mediante el punto de inflamación.

2.4.4. Detergencia.

La detergencia de un lubricante es la capacidad que tiene para evitar o reducir la formación de depósitos carbonosos en el motor (alojamientos de los segmentos, falda de los pistones, guías y vástagos de las válvulas) y manteniendo en suspensión estos depósitos.

A la detergencia de un aceite nuevo se le asigna un valor de 1 (100 %), con el uso de dicho lubricante en el motor, este valor va disminuyendo paulatinamente, no obstante, una disminución rápida de la detergencia puede ser provocada por los siguientes factores:

- Contaminación del lubricante con combustible o agua.
- Trabajo a temperaturas por encima de las recomendadas.
- Exceso de materiales insolubles en el lubricante.

El equipo analítico empleado en los laboratorios especializados para la cuantificación de la detergencia es un equipo fotométrico, el cual calcula el área de una mancha de lubricante sobre un papel absorbente, determinando posteriormente mediante patrones internos la detergencia de la muestra.

2.4.5. Color.

El control del color de los lubricantes industriales como herramienta de diagnóstico se fundamenta en la comparativa de la tonalidad del lubricante usado

frente al nuevo. Con el uso, debido a fenómenos oxidativos el color inicial amarillo claro se va tornando a anaranjado llegando incluso a colores marronáceos, cuanto mayor es la coloración del lubricante más elevado es este deterioro químico del aceite. Esta comparación en aceites para MCI y en particular para motores Diesel no es utilizada ya que la presencia de materia carbonosa en suspensión enmascara a cualquier coloración debida a la oxidación del aceite.

Es posible detectar mediante la observación de las propiedades del lubricante si existe una contaminación de agua. Es un método aplicable a todos los tipos de lubricantes, observándose que el aceite adopta una coloración más blanquecina de lo normal. En aceites industriales se observará que la muestra no es transparente y en aceites de cárter se observa cómo el aceite adopta coloraciones grisáceas.

La distinta coloración dada por los fabricantes a algunos tipos de aceites, con colores que pueden ser azules o rojos, permitirían detectar mezclas accidentales de aceites, no obstante, esta posibilidad se menciona como mera curiosidad, dado que el número de aceites coloreados es muy reducido.

2.4.6. Espumación.

Es importante evaluar la tendencia a formar espumas de los aceites lubricantes, unas bajas propiedades antiespumantes pueden dar lugar a graves problemas en mecanismos sometidos a condiciones de alta agitación del fluido como engranajes de alta velocidad, bombas de gran volumen y lubricación por salpicadura. La presencia de espumas aumenta las pérdidas por sobrepresiones, el riesgo de cavitaciones y el riesgo de fallos mecánicos.

2.4.7. Desemulsibilidad.

La entrada de agua de refrigeración al circuito de lubricación de instalaciones industriales es una posible contaminación que puede dar lugar a corrosiones y si esta concentración es muy elevada a fallos graves de lubricación. El parámetro de desemulsibilidad cuantifica cómo de rápido es capaz el aceite lubricante de separar esa agua que haya podido penetrar en el circuito. Es importante que no se generen emulsiones aceite-agua sino que el aceite sea capaz de separar ambas fases y permita que el agua de contaminación sedimente en el fondo de los depósitos de lubricantes.

2.4.8. Oxidación del Aceite. RBOT ^(g) y TAN ^(h).

El lubricante reacciona continuamente con el oxígeno atmosférico, dando lugar a productos de oxidación ácidos, estos procesos degradativos son más rápidos a altas temperaturas, además, las partículas de desgaste y otros contaminantes presentes en el lubricante, pueden actuar como catalizadores, acelerando dichos procesos. Los productos de oxidación, ácidos orgánicos, degradan las prestaciones del lubricante llegando a generar lodos y lacas que forman depósitos en los conductos de aceite y sobre los elementos lubricados, además estos compuestos pueden llegar a saturar los filtros.

El parámetro denominado número ácido total o TAN el cual cuantifica tanto la cantidad de ácidos orgánicos existentes en el lubricante como los ácidos fuertes inorgánicos, expresándose en miligramos de KOH por gramo de aceite. El parámetro medido por el ensayo RBOT evalúa también el grado de oxidación del lubricante pero en este caso cuantifica el tiempo en que el aceite sometido a condiciones que favorecen los fenómenos oxidativos consume un volumen de oxígeno determinado, ese tiempo permite estimar cómo de resistente sería el aceite a un deterioro oxidativo. El empleo de lubricantes de base sintética o de aditivos antioxidantes incrementa dichos tiempos.

2.4.9. Reserva Alcalina. TBN ⁽ⁱ⁾.

La reserva alcalina de un lubricante o TBN informa sobre su capacidad de neutralizar productos ácidos (principalmente ácido sulfúrico y ácido nítrico) procedentes de la combustión y de la oxidación del aceite a temperaturas elevadas. El TBN se expresa en miligramos de hidróxido potásico (KOH), por gramo de aceite analizado.

A la hora de realizar un mantenimiento predictivo de motores Diesel, es recomendable analizar la evolución del TBN, ya que si se controla el TAN, cuando éste aumenta de manera clara es porque no se dispone de una reserva en el aceite que proteja al motor, por tanto la detección sería tardía.

El contenido de azufre en los combustibles es el principal factor considerado para determinar el valor del TBN contenido en un lubricante, tal como muestra la figura 2.5.

^g Siglas correspondientes a la denominación en inglés del ensayo: *Rotating Bomb Oxidation Test* (RBOT).

^h Siglas correspondientes a la denominación en inglés del ensayo: *Total Acid Number* (TAN).

ⁱ Siglas correspondientes a la denominación en inglés del ensayo: *Total Basic Number* (TBN).

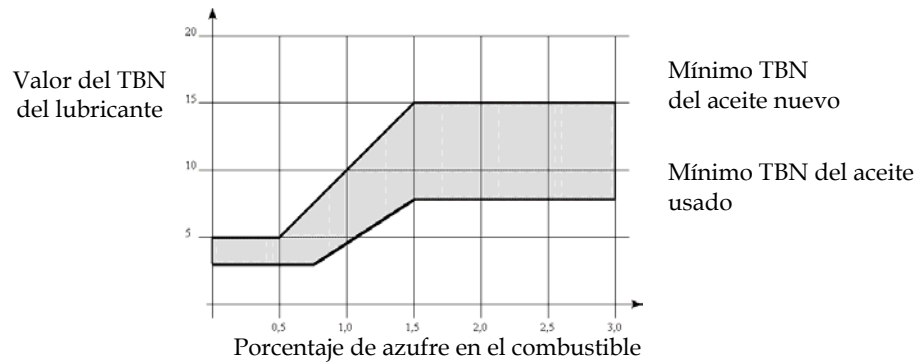


Figura 2.5. TBN recomendado en función del contenido de azufre en el combustible.

La reserva alcalina de un lubricante de MCI A puede verse reducida por distintos factores:

- Reacción con productos ácidos de combustión.
- Dilución por combustible.
- Dilución por agua.
- Degradación térmica.
- Adición de lubricante de TBN inferior.

De igual modo, también existen factores que pueden provocar un incremento en el valor del TBN:

- Pérdida de compuestos volátiles y consecuente concentración del lubricante.
- Adición de lubricante de TBN superior.

La medida del TBN se realiza mediante valoración potenciométrica, donde se añaden pequeños volúmenes de ácido hasta que es neutralizado el contenido alcalino del aceite.

En último lugar se debe señalar que dado el bajo contenido de azufre existente en los gasóleos de automoción ^(j) la reserva alcalina de los aceites de automoción prácticamente no sufre variación durante su uso. En estudios realizados ^[11] se comprueba ese comportamiento, el exceso de reserva que contienen los aceites viene dado por el tipo de aditivos empleados, algunos de los cuales no son multifuncionales y además de mejorar el TBN se encargan de reducir

^j Inferior al 0,005 % a partir de enero de 2005 según normativa de Comunidad Económica Europea)

el desgaste del motor, por ello es imposible reducir su contenido. El empleo de la medida de la reserva alcalina sí es un método útil para determinar

2.4.10. Espectrometría Infrarroja.

El método de análisis de lubricante mediante la observación del espectro infrarrojo de la muestra es una técnica empleada por la totalidad de las empresas de diagnóstico presentes en el mercado. La técnica es, simple, económica y muy rápida, sobretodo después del empleo de la transformada de Fourier en el tratamiento de espectros.

El espectro infrarrojo no da una información exacta de la composición del aceite, pero permite comparar distintos espectros, realizando los siguientes análisis:

- **Comparación de los lubricantes:** el espectro IR de un lubricante es único para cada tipo de aceite. Esta característica se emplea para detectar mezcla de aceites o errores a la hora de completar las hojas de datos.
- **Determinación de contaminación:** los aceites lubricantes de motor pueden ser contaminados por agua, glicol o combustible. La introducción de estas sustancias provoca un cambio en determinadas bandas del espectro infrarrojo del lubricante, siendo posible detectar esta contaminación e incluso cuantificar de una manera relativa.
- **Determinación de la degradación:** de modo similar a la forma de trabajo para la detección de contaminantes, es posible estimar la degradación del aceite, en este caso, se cuantifica el contenido de aditivos antioxidantes en el aceite y la evolución de grupos carbonilos (C=O) procedentes de fenómenos oxidativos.

2.5. Determinación de la Contaminación del Lubricante.

2.5.1. Presencia de Agua.

La contaminación por agua del lubricante es uno de los problemas más graves que puede sufrir un mecanismo lubricado, ya que puede dar lugar a las siguientes situaciones:

- a) Pérdida de las propiedades viscosas del lubricante, generando espumas y lodos, que pueden llegar a saturar los filtros y a obstruir los canales de lubricación.
- b) Degradación por corrosión de los elementos metálicos al actuar el agua como electrolito.
- c) Aceleración de los fenómenos oxidativos del lubricante al ser el agua una fuente adicional de oxígeno.

La entrada de agua al sistema puede deberse a un mal estado de juntas, que no son estancas y que dan lugar a la entrada de agua, el agua puede proceder tanto del ambiente de la máquina como de los circuitos de líquido refrigerante. En MCI A existe otra fuente de contaminación acuosa, como es el *blow-by* ^(k) que contiene vapor de agua. Para detectar la contaminación acuosa del lubricante se emplean principalmente los siguientes métodos:

- **Crepitación:** una gota de lubricante es dejada caer sobre una superficie metálica calentada a 130°C ($\pm 5,0^\circ\text{C}$), si existen contaminaciones de agua por encima del 0,1% se aprecia un burbujeo debido al vapor de agua que se desprende del aceite. Cuanto mayor es el porcentaje de humedad más brusco es el proceso y fácilmente identificable la contaminación
- **Destilación con xileno:** consistente en el arrastre por destilación del agua presente en lubricante mediante el disolvente, posteriormente se condensan los vapores y se mide el agua destilada, que queda en el fondo del tubo al ser inmisible en el xileno.
- **Valoración mediante reactivo de Karl Fischer:** este producto reacciona con el agua, se van adicionando pequeños volúmenes de reactivo hasta que se neutraliza totalmente el agua existente, midiendo la cantidad consumida se determina directamente el porcentaje de humedad en la muestra.
- **Viscosidad:** se aprecia un considerable aumento en la viscosidad del lubricante, debido a que el agua forma emulsiones que dificultan el paso del fluido a través del capilar, la otra razón es la formación de burbujas de vapor de agua (si el ensayo se realiza a 100°C) que tienden a subir, dificultando el paso del aceite.
- **Punto de inflamación:** un elevado porcentaje de agua provoca que el punto de inflamación tome valores superiores a los esperados.
- **Espectro infrarrojo:** la presencia de agua en el lubricante dará lugar a la aparición de picos de absorción correspondientes a grupos hidroxilo (-O-H), los cuales se detectan a las frecuencias 3.450, 1.640 y 770 cm^{-1} .

2.5.2. Dilución por Combustible.

La presencia de gasóleo en el lubricante, da lugar a una disminución de la viscosidad, pudiéndose producir situaciones de pérdida de la capa de lubricación y un *gripado* de los elementos metálicos en contacto. La contaminación es debida

^k El término *blow-by* es ampliamente empleado por los responsables de mantenimiento de motores, con esta expresión se hace referencia al paso de gases de combustión al cárter, estos gases contienen CO₂, vapor de agua, CO, NO_x y derivados del azufre, además de partículas de hollín. Todos estos elementos son contaminantes y además favorecen la degradación del lubricante.

principalmente a la entrada de combustible procedente de inyectores con fugas, los cuales gotean de manera continua, llegando el gasóleo hasta el cárter.

Las técnicas empleadas en el laboratorio para detectar el combustible son:

- **Cromatografía de gases:** es el método más exacto de determinación, los compuestos específicos del combustible aparecen como picos de concentración, cuanto mayor sea su porcentaje mayor será la concentración.
- **Espectrometría infrarroja:** es posible detectar la presencia de combustible en el aceite realizando comparaciones entre el espectro del lubricante nuevo, el espectro del combustible empleado por el motor y el aceite usado. La principal frecuencia de es 875 cm^{-1} .
- **Punto de inflamación:** es un método indirecto de análisis, ya que se cuantifica la disminución del punto de inflamación, directamente relacionada con el contenido de combustible en el lubricante.
- **Viscosidad cinemática:** la presencia de combustible en el aceite provoca una sensible disminución en la viscosidad cinemática. Este método ha sido tradicionalmente empleado para cuantificar la concentración de gasóleo; en la actualidad, no se recomienda su utilización, ya que con la aparición de los lubricantes multigrado, éstos tienden a hacerse ligeramente más fluidos por la degradación de sus aditivos mejoradores del índice de viscosidad, realizándose diagnósticos de contaminación por dilución cuando realmente lo que ocurre es que el aceite está degradado.

2.5.3. Contenido de Insolubles y Materia Carbonosa.

La materia insoluble presente en un lubricante se relaciona directamente con:

- Estado de degradación del lubricante.
- Eficacia de los filtros.
- Nivel de desgaste de los elementos.
- Cantidad de materia carbonosa procedente de la combustión.

Por ello es muy útil conocer su valor para la realización del diagnóstico del motor, así como seguir su evolución con el tiempo. Los métodos analíticos empleados para determinar los insolubles son:

- **Proceso de disolución con tolueno y pentano de una muestra de lubricante:** los insolubles en pentano representan el total de los productos insolubles presentes en el lubricante. Los insolubles en tolueno corresponden a los productos de procedentes de contaminación externa, corrosión y desgaste de los mecanismos lubricados y al carbón formado en una combustión incompleta del gasóleo o a una posible

coquización del lubricante. La diferencia de peso entre ambos tipos de insolubles representa la cantidad de compuestos procedentes de la degradación del lubricante como son asfaltos, resinas, barnices o lodos.

- **Filtrado mediante membranas:** se hace pasar la muestra por una membrana de tamaño de poro determinado empleando un disolvente para facilitar el proceso, la diferencia de pesada de la membrana una vez evaporado el disolvente dará el porcentaje de materia insoluble existente en el lubricante.
- **Fotómetro:** es el mismo equipo empleado para determinar la detergencia del lubricante, es capaz de estimar tanto el porcentaje de insolubles con el residuo carbonoso presente en el aceite.

2.5.4. Niveles de Nitración y Oxidación.

Los productos de nitración se forman durante el proceso de combustión en los motores de combustión interna, se forman por la presencia de un exceso de oxígeno, por la reacción del aceite con óxido de nitrógeno (NO, NO₂, N₂O₄). Estos productos son muy ácidos formando depósitos sólidos en las zonas de combustión y acelerando la oxidación del aceite. Una excesiva presencia de estos productos en lubricante puede deberse a:

- Exceso de gases que pasan al cárter (*blow-by*).
- Deficiente ventilación del cárter.
- Mala mezcla aire-combustible.
- Baja temperatura de trabajo.

A elevadas temperaturas, el aceite en contacto con el oxígeno del aire se oxida dando lugar a compuestos con grupos carbonilo (C=O) como ésteres, cetonas y ácidos carboxílicos. Estos productos o bien se disuelven en el aceite o bien permanecen suspendidos en el lubricante debido a la acción de los aditivos dispersantes. Los ácidos carboxílicos contribuyen a la acidificación del aceite y al consumo de la reserva alcalina. La detección de unos valores elevados de oxidación puede deberse a: sobrecalentamientos o elevadas temperaturas de trabajo del motor, elevado *blow-by* y a un excesivo tiempo en servicio del lubricante.

Ambos parámetros son medidos mediante el espectrómetro infrarrojo, centrándose en una determinada frecuencia para cada parámetro: oxidación, 1.740 cm⁻¹ y nitración 1.630 cm⁻¹.

2.5.5. Presencia de Glicoles.

El circuito de refrigeración de los MCIA emplea principalmente etilenglicol o propilenglicol como aditivo anticongelante, diluido un 40 % en agua, por ello si

se produce una fuga de agua de refrigeración hacia el interior del cárter también se introducirán estos compuestos.

El empleo del espectrómetro infrarrojo permite cuantificar el contenido de estos aditivos en el lubricante, analizando las frecuencias características de 3.370 cm^{-1} , 1.085 cm^{-1} , 1.035 cm^{-1} y 885 cm^{-1} . Si se encuentran glicoles en el aceite y además se ha detectado agua se puede saber con certeza que la procedencia de la contaminación es el circuito de refrigeración y no la entrada de agua a través del *blow-by* o por humedad del ambiente, las cuales no contienen glicoles en su composición. Por otro lado, es posible detectar glicoles en el lubricante y no detectarse presencia de agua, en este caso la contaminación puede deberse a dos motivos:

1. Entrada de agua procedente del circuito de refrigeración, el agua se ha evaporado debido a las altas temperaturas del motor pero trazas de glicoles aún han quedado retenidas en el aceite.
2. Mezcla de aceites, siendo uno de ellos un aceite sintético, los cuales contienen poliglicoles como componentes del aceite base.

2.5.6. Mezcla de Lubricantes.

Es importante realizar una correcta gestión de los aceites existentes en la planta y evitar la mezcla accidental de ellos, ya que algunos tipos de aceites pueden llegar a ser totalmente incompatibles. Incluso para aceites de diferentes marcas que sí que serían teóricamente miscibles, es importante reseñar que el resultado es un aceite de prestaciones no conocidas,

Para la detección de una mezcla accidental de aceites la técnica de análisis empleada es la espectrometría infrarroja, la cual es capaz de obtener un espectro de los diferentes enlaces orgánicos existentes en el aceite. Cada lubricante posee un espectro específico, por tanto en el momento en que aparezcan picos de otros aceites es posible detectar esa contaminación.

2.6. Estudio del Proceso de Toma de Muestras.

El análisis del lubricante usado como herramienta de diagnóstico es una técnica que requiere que la muestra de aceite extraída sea representativa del total del aceite contenido en la máquina, por tanto, si inicialmente este muestreo se realiza de manera inexacta, el resto de resultados obtenidos a partir del análisis de este aceite probablemente sean total o parcialmente erróneos. A continuación se describirán los principales aspectos a considerar durante el muestreo.

2.6.1. Condiciones de Muestreo.

El punto de toma de muestras deberá ser seleccionado considerando los factores siguientes:

- Muestreo en un conducto donde el lubricante esté en continuo trasiego, de manera que no haya un remanso, donde puedan quedar retenidos sedimentos. Si no es posible realizar la extracción desde un conducto de fluido, o en el caso de que la máquina no disponga de los mismos, el lubricante se deberá muestrear desde el depósito principal de aceite.
- Si solamente se selecciona un punto de muestreo éste deberá ser anterior al dispositivo de filtrado, recogiendo el total de las partículas de contaminación y desgaste generadas. Sería recomendable la toma antes y después del dispositivo de filtrado, de manera que se compruebe el correcto funcionamiento de éste, reteniendo las partículas de mayor tamaño; también es recomendable cuando se sospecha que el material filtrante está deteriorado y se comienza a desprender, contaminando el lubricante con restos de fibras o gomas.

Una vez seleccionado el punto, el aceite debe ser extraído preferiblemente con la máquina en funcionamiento y a la temperatura normal de trabajo, de manera que se asegure una homogeneización del lubricante; de igual modo, al ser el fluido menos viscoso por temperatura, el muestreo se ve facilitado. Si no es posible obtener la muestra con la máquina funcionando, deberá ser tomada inmediatamente después de la parada, ya que con el aceite en reposo, las partículas de desgaste y el resto de contaminantes tienden a sedimentar. La velocidad de sedimentación, U_t , de las partículas en el seno de un fluido viene regulada por la ecuación 2.4:

$$U_t = \frac{g \cdot D_p^2 \cdot (\rho_p - \rho_{act})}{18 \cdot \mu_{act}} \quad (ec\ 2.4)$$

Donde:

g = aceleración gravitatoria.
 D_p = diámetro de la partícula.
 ρ_p = densidad de la partícula.

ρ_{act} = densidad del lubricante.
 μ_{act} = viscosidad absoluta del lubricante.

A partir de la ecuación 2.4 se ha trazado la gráfica de la figura 2.6 que representa el tiempo que emplearía una partícula esférica en descender una altura de 10 centímetros dentro del seno de un lubricante. Se han graficado los tiempos de caída de los principales metales que componen las partículas de contaminación y

desgaste. En los cálculos, se ha considerado un aceite lubricante mineral típico de viscosidad cinemática 14 cSt a 100°C y de una densidad de 880 kg/m³.

La gráfica pone de manifiesto la lógica influencia que tiene la composición de las partículas en el tiempo de caída. Principalmente es reseñable que en menos de un minuto todas las partículas de más de 200 micrómetros han descendido 10 centímetros, por tanto es crítica la correcta selección del punto de muestra ya que una vez parada la agitación forzada del lubricante en el seno del fluido las partículas de tamaños elevados sedimentan a gran velocidad.

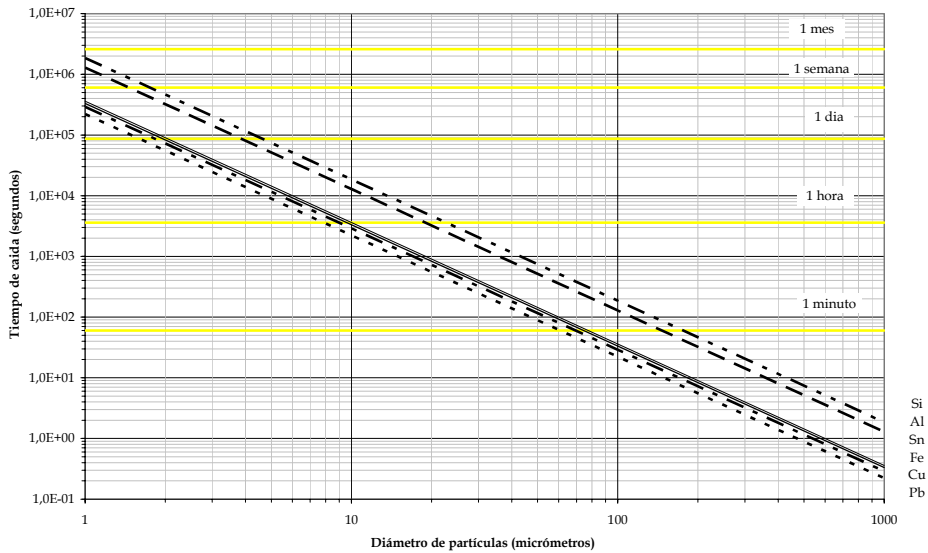


Figura 2.6. Velocidad de las partículas de diferentes metales dentro de un fluido lubricante.

En la gráfica 2.7 se ha evaluado la influencia de la viscosidad del aceite lubricante sobre la velocidad de caída de partículas de acero de densidad 7.855 kg/m³. Se puede inferir que para cualquier viscosidad del lubricante las partículas de menos de 10 micrómetros (que son los tamaños de partículas capaces de ser analizados por las técnicas espectrométricas) tardan más de una hora en sedimentar 10 centímetros, es por este motivo por el que suele exigirse que el muestreo de aceite se realice con la máquina en marcha o como máximo 60 minutos después de haber detenido la agitación del aceite.

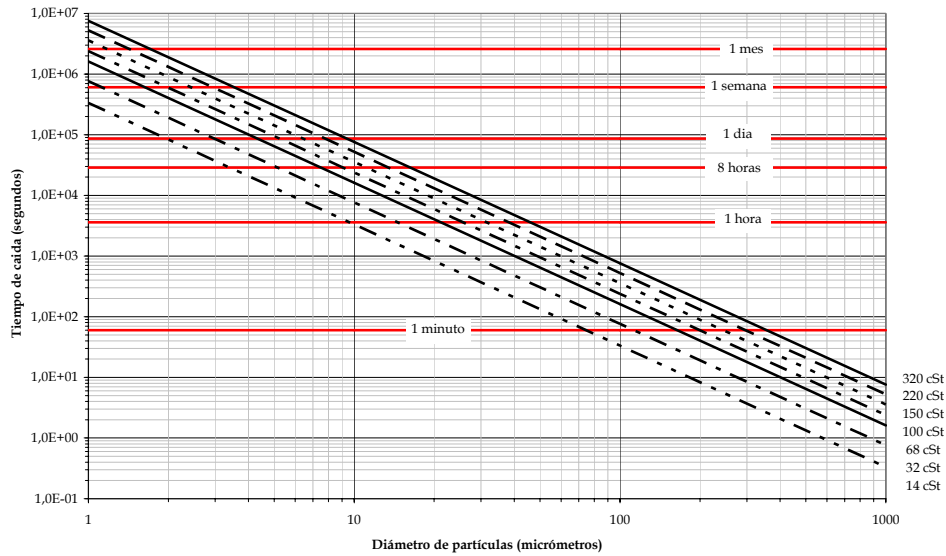


Figura 2.7. Velocidad de las partículas de hierro dentro de diferentes fluidos lubricantes.

2.6.2. Volumen de Muestra.

El volumen de muestra extraído se define principalmente por el tipo de análisis y las determinaciones que posteriormente se deberán realizar sobre la muestra, en la tabla 2.4 se detalla el volumen aproximado empleado para los análisis que habitualmente se realizan.

Genéricamente, las empresas especializadas en el análisis suelen extraer unos 80 ml de aceite para el análisis de aceites de MCI y cerca de un litro para mecanismos industriales de gran volumen donde se requiere la realización de un mayor número de ensayos.

Determinación	Volumen mínimo	Determinación	Volumen mínimo
Agua	5 ml	Recuento de partículas	50 ml
Metales (ICP)	5 ml	Aditivación (IR-FT)	5 ml
Carbón, insolubles, detergencia	1 ml	Viscosidad Cinemática	5 ml
TBN / TAN	2 ml	Espumación	200 ml
Dilución	5 ml	Desemulsibilidad	40 ml

Tabla 2.4. Volumen de aceite empleado en cada determinación [12].

2.6.3. Características de los Recipientes.

Los recipientes para la toma de muestras deberán de cumplir los siguientes requisitos:

- Grado de limpieza superior al grado de limpieza exigido al lubricante nuevo, de este modo se asegura que las partículas que pueda contener el recipiente no influirán en el diagnóstico.
- Realizados en un material ligero, resistente a posibles golpes durante su manipulación o transporte y que no reaccione químicamente con el aceite lubricante contenido. Con un cierre hermético que evite la fuga de fluido durante el trayecto desde la máquina al laboratorio de análisis.
- Transparente para permitir la detección visual de: partículas de gran tamaño en el aceite, la presencia de dos fases de líquido, contaminación con agua, sedimentos o sobrenadantes en el aceite.

Los envases empleados por las principales empresas especializadas en el análisis de lubricantes son de plástico, específicamente polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (PE-HD). El único inconveniente que presentan estos recipientes es una cierta reactividad con el lubricante que da lugar a una cierta difusión a través de las paredes, no obstante dado que el tiempo de residencia de la muestra dentro de la botella antes de ser analizada no suele ser superior a los 7 días estos efectos difusivos son despreciables. En casos específicos donde se desea evitar totalmente esta difusión, los recipientes deberán ser de aluminio (siendo el recipiente totalmente opaco y presentando el riesgo de una mayor contaminación de partículas metálicas generadas durante su fabricación) o vidrio (donde el recipiente es más pesado y frágil).

2.6.4. Dispositivos de Toma de Muestras.

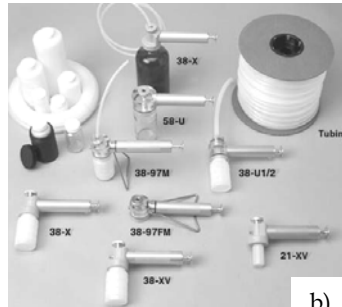
Los dispositivos empleados para la extracción del lubricante se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Equipos fijos instalados en el circuito de lubricante, que han sido previamente instalados en los conductos y que permiten al operador realizar la extracción directa del aceite. El muestreo se realiza con la instalación en condiciones normales de funcionamiento, es rápido y fiable.
- Equipos ajenos a la instalación, que sólo se introducen en el circuito para el muestreo; en este grupo se incluyen pequeñas bombas manuales o jeringas de plástico que permitan la extracción indirecta del lubricante. Estos dispositivos (mostrados en la figura 2.8) deben ser empleados cuando no es viable la instalación de equipos fijos, ya que el muestreo es

menos fiable y su empleo genera un mayor número de residuos (tubos, jeringas).



a)



b)

Figura 2.8. Equipos de toma de muestras. Acople directo a la línea (a) y bombas manuales de aspiración (b).

2.7. Referencias Bibliográficas.

-
- 1 Varios Autores. *Méthodes Rapides d'Analyse des Huilles Usagées*. Technip. 1971.
 - 2 Macián Martínez, V.; Tormos Martínez, B.; Olmeda González, P. *Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. 2000.
 - 3 Monchy, F. *Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial*. Masson, S.A. 1990.
 - 4 Collacot, R. A. *Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring* Chapman and Hall. 1982.
 - 5 Morrow, L. C. *Manual de Mantenimiento Industrial*. McGraw-Hill. 1984.
 - 6 Boucly, F. *Gestión del Mantenimiento*. AENOR. 1999.
 - 7 Moubray, J. *Reliability-Centered Maintenance*. Industrial Press Inc. 1997.
 - 8 Schilling, A. *Los Aceites para Motores y la Lubricación de los Motores*. Ediciones Interciencia. 1968.
 - 9 Caines, A.; Haycok, R. *Automotive Lubricants Reference Book*. Society of Automotive Engineers, Inc. 1996.
 - 10 Bartz, W. J. *Engine Oils and Automotive Lubrication*. Marcel Dekker. 1992.
 - 11 Macián, V.; Tormos, B.; Olmeda, P.; Montoro, L. *Valoración del nivel de reserva alcalina (TBN) de los lubricantes actuales para motores Diesel de automoción*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Cádiz. 2002.
 - 12 *The Lubrication Engineers Manual*. Association of Iron and Steel Engineers 1996.

CAPÍTULO 3.

TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE METALES EN ACEITES LUBRICANTES.

Índice

3.1. Introducción.	43.
3.2. El Desgaste Mecánico .	43.
3.3. Tipos de Partículas de Desgaste.	54.
3.4. Técnicas de Evaluación Cualitativa de Metales.	62.
3.5. Técnicas de Medida Cuantitativa de Metales.	69.
3.6. Referencias Bibliográficas.	72.

3.1. Introducción.

A lo largo del presente capítulo se realizará un estudio detallado de los diferentes tipos de desgaste mecánico que tienen lugar en MCIA y mecanismos lubricados, para posteriormente describir los principales tipos de partículas generadas y sus características morfológicas. En último lugar, se presentarán las técnicas de análisis empleadas para cuantificar estas partículas que se encuentran en el aceite lubricante.

3.2. El Desgaste Mecánico.

El desgaste mecánico se origina cuando dos o más cuerpos están en contacto y existe entre ellos un movimiento relativo; no obstante, también existen otras formas de desgaste donde intervienen fenómenos físico-químicos que generan pérdidas de material en las piezas. El desgaste es en líneas generales un fenómeno a evitar en los mecanismos, únicamente se podría decir que durante el rodaje de mecanismos es recomendable que ocurra un cierto desgaste mecánico, en el aspecto en que se reducen las irregularidades superficiales iniciales de las piezas en contacto.

Existen múltiples clasificaciones de los tipos de desgaste, habiéndose seleccionado la establecida por Ayel ^[1,2] donde los principales fenómenos de desgaste se subdividen en dos grupos según la importancia de los mismos, tal y como se representa en la tabla 3.1.

Desgaste primario	Desgaste secundario
Desgaste por abrasión. Desgaste por erosión. Desgaste por adhesión y deslizamiento. Desgaste por fatiga. Desgaste por corrosión.	Desgaste por vibración. Desgaste por cavitación. Desgaste por fenómenos eléctricos

Tabla 3.1. Clasificación de los diferentes tipos de desgaste.

También se ha establecido para el caso particular de los motores de combustión alternativa (MCIA) qué tipos de desgaste son susceptibles de sufrir los principales elementos del motor (tabla 3.2).

Elemento	Desgaste abrasivo	Desgaste erosivo	Desgaste adhesivo	Desgaste por fatiga	Desgaste corrosivo
Camisas, segmentos, pistones.	X		X		X
Levas, empujadores, balancines.	X		X	X	X
Vástago-guía de válvula	X		X		
Apoyo asiento de válvula	X	X			
Engranajes de distribución	X		X	X	
Muñones	X	X		X	X
Cojinetes	X	X			X
Bomba de aceite	X		X	X	
Bomba de combustible	X		X	X	

Tabla 3.2. Tipos de desgaste que se presentan en las diferentes partes del motor [3].

3.2.1. Desgaste por Abrasión.

El desgaste abrasivo tiene lugar cuando partículas o superficies duras son arrastradas o presionadas sobre otra superficie sólida. [1,2,4] Generalmente se distinguen dos tipos principales de contacto en el desgaste abrasivo:

- **Desgaste por asperezas duras** ^(a): tiene lugar cuando un cuerpo se desliza sobre otra superficie de menor dureza, dando lugar al desprendimiento de partículas [5,6]. Este fenómeno ocurriría en procesos como el limado, esmerilado o el rectificado.

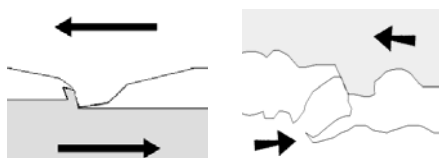


Figura 3.1. Desgaste abrasivo entre dos cuerpos.

^a En inglés: *two-body wear*.

- **Desgaste por partículas duras** ^(b): este tipo de desgaste tiene lugar cuando la partícula abrasiva es retenida entre dos superficies dañando los elementos en contacto. En otras ocasiones las partículas duras quedan incrustadas sobre la superficie de menor dureza ^[7]. La partícula puede proceder tanto del exterior del sistema lubricado (principalmente polvo ambiental) como del interior, perteneciendo a fragmentos de desgaste de otro elemento de mayor dureza.

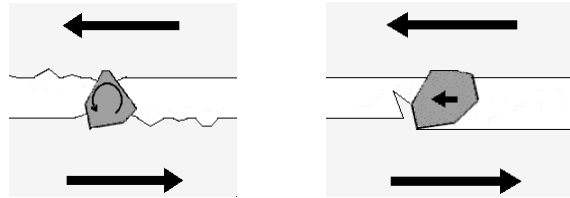


Figura 3.2. Desgaste abrasivo entre tres cuerpos.

Las asperezas duras y los granos de abrasivos pueden asimilarse a herramientas de corte elementales con ángulos de corte negativo, que producen sobre las superficies de fricción un rayado característico con la consiguiente formación de microvirutas. La velocidad a la cual las superficies se desgastan por efecto de la abrasión depende de los siguientes factores ^[4]:

- **Morfología y dureza:** cuanto mayor es la diferencia de durezas de las dos superficies en contacto más graves son los fenómenos abrasivos; la morfología de la partícula abrasiva determina el volumen de material desprendido.
- **Temperatura:** el desgaste crece con el aumento de temperatura de las superficies, no obstante se ha demostrado que en metales como aluminio o cobre no se aprecia un aumento significativo en el desgaste cuando se aplican incrementos de temperatura de hasta 500°C.
- **Carga y velocidad de contacto:** el aumento del desgaste es directamente proporcional a la carga y a la velocidad, además, si durante el desgaste se generan partículas abrasivas el desprendimiento de material es superior.
- **Corrosión:** se ha encontrado una relación directa entre desgaste abrasivo y ambientes corrosivos, especialmente en entornos de bajo

^b En inglés: *three-body wear*.

pH. El desgaste abrasivo genera superficies limpias que rápidamente se corroen, y posteriormente la abrasión elimina la capa de corrosión que actuaba como aislante.

El desgaste abrasivo se puede evitar ^[3,4] tomando las siguientes medidas:

- Evitando la entrada desde el exterior de material abrasivo a piezas y mecanismos (rodamientos estancos, juntas eficaces, etc).
- Filtrado de los fluidos (aceite, aire y combustible) susceptibles de transportar contaminantes abrasivos.
- Adecuada mecanización de las superficies de los elementos en contacto, eliminando las asperezas agudas que pueden dar lugar a abrasiones.
- Para neutralizar las partículas abrasivas al nivel de las superficies de fricción se prevén rayados en cruz sobre las superficies para retener los granos abrasivos.
- Los cojinetes de motor se recubren con capas muy delgadas de metal blanco (plomo, estaño, aluminio) de 20 μm a 30 μm de espesor que permiten la incrustación de partículas de dimensiones superiores al espesor de la película de lubricante sin dañar a las superficies mecánicas.

3.2.2. Desgaste por Adhesión.

El desgaste adhesivo se debe al cizallamiento por tracción de las microsoldaduras que se generan cuando dos superficies entran en contacto directo metal contra metal, debido a una excesiva temperatura de trabajo o a una insuficiente lubricación ^[8]. Cuando estas dos superficies en contacto directo se hallan en movimiento relativo, la energía térmica disipada por fricción, junto con las elevadas presiones puntuales existentes pueden producir el flujo plástico localizado de los metales y soldar las asperezas en contacto, el posterior cizallamiento por fricción de dichas microsoldaduras constituye el desgaste adhesivo, este proceso viene representado en las figuras 3.3 y 3.4. Las microsoldaduras pueden ser de dos tipos ^[3]:

- Soldaduras calientes: soldaduras metalúrgicas acompañadas de interdifusión y recristalización de los materiales de la interfase.
- Soldaduras frías: uniones debidas a la adhesión de los materiales a temperaturas que pueden ser relativamente bajas.

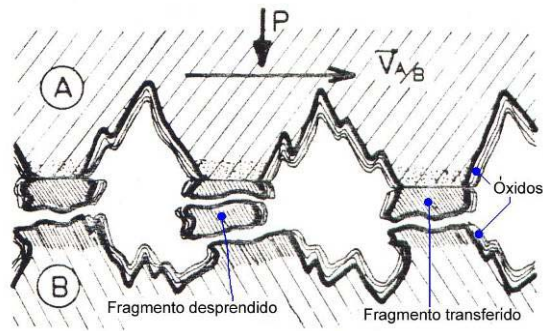


Figura 3.3. Esquema del desgaste adhesivo por soldadura. [9].

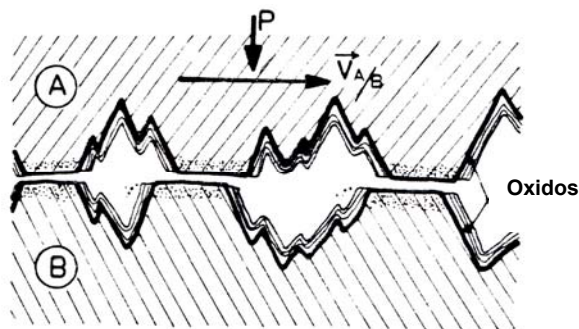


Figura 3.4. Esquema del desgaste adhesivo por cizallamiento.

Este tipo de desgaste puede generar los siguientes fallos en los elementos mecánicos en contacto [2]:

- **Rayado fino** ^(c): es la formación de rayas suaves en la dirección del deslizamiento; es un daño menor producido por adhesión y/o abrasión.
- **Microgripado** ^(d): es un daño localizado, producido por la soldadura microscópica en fase sólida de asperezas antagonistas de las superficies deslizantes, no provoca la detención brusca del movimiento de las piezas.

^c En inglés: *scratching*.

^d En inglés: *scuffing* o *scoring*.

- **Gripado generalizado** ^(e): es una avería global originada por la soldadura total de las piezas en contacto, que provoca el bloqueo del mecanismo correspondiente.

3.2.3. Desgaste por Corrosión.

El desgaste corrosivo ^[54] corresponde a un levantamiento por fricción mecánica de los productos de reacción formados por el ataque químico de los agentes corrosivos del entorno (como gases de combustión en el caso de los motores térmicos) o productos de degradación del lubricante (ácidos resultantes de procesos de oxidación, hidrólisis de aditivos, etc). En la primera fase de este desgaste las superficies son sometidas a un *ataque corrosivo*, que es más o menos agresivo en función de la formación de una capa de óxidos coherente y que proteja la superficie de ataques (figura 3.5).

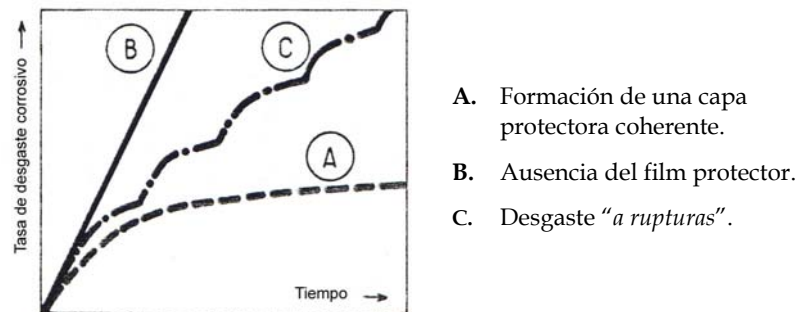


Figura 3.5. Diagrama desgaste corrosivo frente al tiempo.

En la segunda fase del desgaste corrosivo los productos de corrosión son desprendidos por fricción, en la mayoría de los casos estos óxidos son más duros y más frágiles que las superficies originales.

Se debe comentar que algunos tipos de compuestos presentan una elevada resistencia al cizallamiento (cloruros, sulfuros y fosfatos metálicos u organometálicos), siendo excelentes lubricantes límites dadas sus bajas tasas de desgaste. Este tipo de ataque corrosivo es el empleado en los aditivos lubricantes de extrema presión (EP).

^e En inglés: *seizure*.

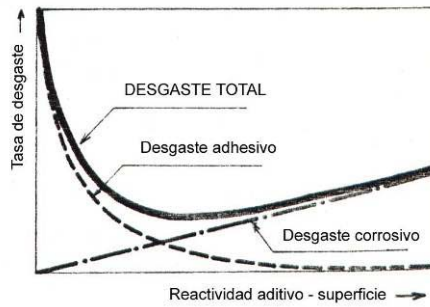


Figura 3.6. Equilibrio entre desgaste corrosivo y desgaste adhesivo.

Para prevenir los efectos de un desgaste corrosivo en la instalación se pueden adoptar las siguientes medidas [4,8]:

- Adecuada selección de materiales, donde el proyectista debe seleccionar el material más adecuado al tipo de sustancias puestas en contacto, o en función del fluido trasegado, también deberá considerarse la sinergia entre diferentes mecanismos de desgaste.
- Tratamientos superficiales, en ocasiones se recubren los elementos metálicos con materiales poliméricos de gran resistencia frente al ataque químico. En otros casos simplemente se recurre a dotar de un mayor grosor las paredes de piezas susceptibles de sufrir ataque químico.

3.2.4. Desgaste por Erosión.

El **desgaste erosivo por partículas** ^(f) se define como la pérdida de material como consecuencia de repetidos impactos de pequeñas partículas en suspensión en un medio líquido o gaseoso, sobre la superficie del metal sometido a desgaste, en este desgaste las partículas golpean y rebotan sobre la superficie [2], mientras que en el desgaste abrasivo se produce por el deslizamiento sobre la superficie debido a la aplicación de una fuerza externa.

^f En inglés: *solid particle erosion*.

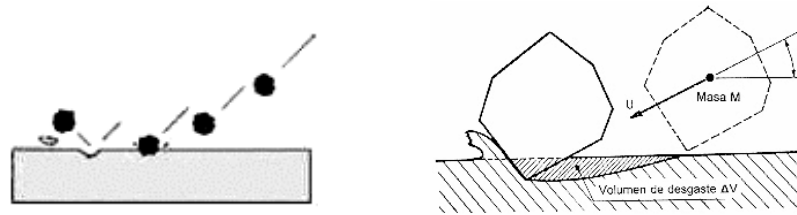


Figura 3.7. Efecto del desgaste erosivo.

El **desgaste erosivo por líquidos** ^(g) está producido por el impacto de líquidos a gran velocidad sobre superficies, como álabes de turbinas. La duración del impacto es muy pequeña y produce una muy breve y violenta compresión pulsatoria que se transmite al material originando grietas en los componentes frágiles y deformaciones plásticas en superficies blandas.

3.2.5. Desgaste por Fatiga.

La fatiga mecánica superficial se produce entre dos superficies en movimiento de rodadura pura y deslizamiento combinado, con lubricación y sometidas a una carga que produzca esfuerzos hertzianos. En ocasiones se presenta entre superficies en deslizamiento puro con cargas cíclicas importantes, como en el caso de cojinetes. Se manifiesta con la aparición de grietas o cavidades sobre la superficie del metal.

En la figura 3.8 se muestra esquemáticamente la formación de una grieta de fatiga, se observa que se desarrolla en "V" con su vértice dirigido en el sentido de la fuerza, el desprendimiento de partículas de desgaste por ruptura se produce a partir del ángulo de la "V" debido a los esfuerzos de flexión a los que se haya sometida; cuando el deterioro es mayor se desprenden gruesas laminillas de metal, fenómeno denominado *descamado*.

^g En inglés: *liquid impingement erosion*.

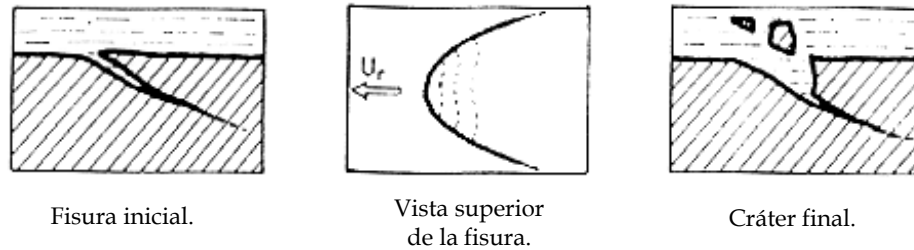


Figura 3.8. Evolución del desgaste por fatiga.

La fatiga termomecánica afecta a las superficies duras de materiales frágiles (cerámicas, carburos, nitruros, etc) con una resistencia a la tracción menor que a la compresión y sometidas a elevados gradientes térmicos. Este desgaste afecta sobretodo a las superficies en deslizamiento puro, con velocidad elevada y lubricadas o no. El deterioro producido se presenta en forma de grietas repartidas uniformemente, en dirección perpendicular a la dirección del deslizamiento.

3.2.6. Desgaste por Cavitación.

Se define cavitación como la continua nucleación, crecimiento y colapso violento de burbujas de gas en el seno de un líquido. En la práctica, la cavitación puede aparecer en todo líquido en el cual se generen cambios de presión por vibraciones en el flujo o cambios e irregularidades en las conducciones [1]. El proceso de cavitación se puede resumir en cuatro fases (figura 3.9):

- **Fase 1:** formación de burbujas de vapor en las regiones donde la presión es inferior a la presión de vapor del líquido.
- **Fase 2:** crecimiento de las burbujas de vapor, favorecido por las microburbujas de aire atrapado, por otros gases atrapados en el fluido y por las pequeñas impurezas transportadas por el fluido.
- **Fase 3:** compresión brusca de las burbujas al llegar el líquido a áreas de presión superior.
- **Fase 4:** las burbujas son totalmente inestables estallando de manera violenta en la mayoría de los casos. El colapso de las burbujas desencadena microproyecciones de fluido que inciden directamente sobre la pared del sólido que contiene al fluido.

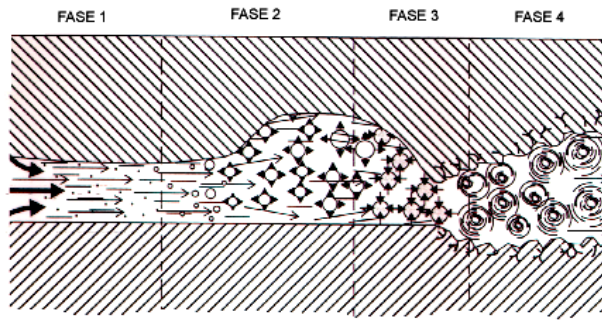


Figura 3.9. Etapas del desgaste por cavitación.

Las áreas sometidas a desgaste por cavitación presentan diminutos picados que se extienden progresivamente sobre la superficie, llegándose a desprender fragmentos de material de un tamaño considerable. Este tipo de desgaste se presenta en el circuito de refrigeración de los motores Diesel con altas solicitaciones térmicas, principalmente en la bomba del agua y en la cara exterior de las camisas. También se presenta en los cojinetes por el estallido de las burbujas de aire disuelto en el lubricante, el aceite pasa en primer lugar por la parte divergente de la película donde hay bajas presiones y posteriormente pasa a la zona convergente donde el gradiente de presiones es importante.

El desgaste por cavitación se puede evitar realizando una selección adecuada de materiales, los más resistentes a este tipo de desgaste son materiales con alta ductilidad y resistencia a la fatiga. En las estructuras heterogéneas la resistencia al desgaste por cavitación es baja, tal y como ocurre en las fundiciones perlíticas de grafito laminar, utilizadas en las camisas de motor o en los materiales antifricción de los cojinetes.

3.2.7. Desgaste por Vibración ^(h).

El desgaste por vibración se presenta cuando dos superficies cargadas y en contacto se someten a un movimiento vibratorio relativo de baja amplitud y alta frecuencia que puede ser de torsión, deslizamiento o flexión. El mecanismo de este tipo de desgaste es el siguiente ^[1, 4]:

- **Etapa 1:** iniciación y formación de la viruta de desgaste por contacto adhesivo, transferencia y cizallamiento de las uniones.
- **Etapa 2:** las virutas, sometidas a elevadas presiones y temperaturas, se oxidan al ser trituradas y aplastadas, produciendo partículas de menor tamaño y más reactivas, las cuales acaban oxidándose

^h En inglés: *Fretting Wear*.

completamente. Se debe destacar que la poca amplitud de las vibraciones no permite que las partículas de desgaste salgan del área de contacto.

- **Etapa 3:** las partículas de óxido acumuladas y comprimidas pueden dar lugar a aglomerados de alta dureza, produciendo el desgaste de las superficies por un doble mecanismo: abrasión y fatiga por martilleo. Las superficies sometidas a desgaste por vibración son muy sensibles a la fatiga ya que las zonas atacadas constituyen focos de agrietamiento intergranular.

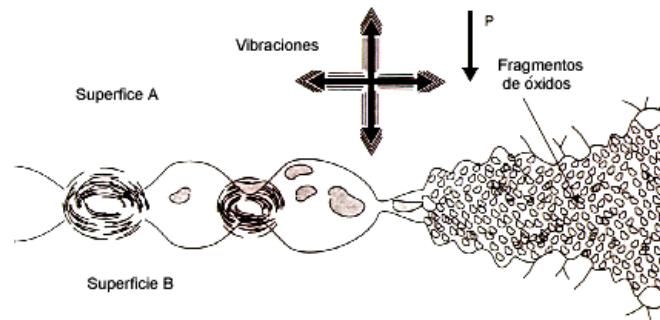


Figura 3.10. Proceso de desgaste por vibración.

3.2.8. Desgaste de Origen Eléctrico.

El **picado eléctrico** es una erosión provocada por chispas debidas a una descarga eléctrica. Se manifiesta por la formación de cavidades superficiales notablemente menores que las debidas a fatiga, se presenta por ejemplo en los electrodos de las bujías de los motores de encendido provocado.

La **corrosión galvánica** ^[3] es la producida entre dos superficies metálicas diferentes que forman un par galvánico; es simplemente un ataque electroquímico. En un motor térmico se puede presentar este tipo de desgaste, ya que posee pares galvánicos como el aluminio-acero además algunos aceites contienen ciertos aditivos que se comportan como electrolitos anhidros favoreciendo el proceso electroquímico. Se combate evitando los pares de materiales que forman pilas o protegiéndolas con un par más activo constituido por un metal no corrosible por el par que se desea proteger y por un electrodo consumible (o de sacrificio).

3.3. Tipos de Partículas de Desgaste.

En el presente apartado se realizará una descripción de las diferentes partículas presentes en el aceite de cualquier sistema lubricado, la forma de diferenciar unos tipos de otros, así como las causas de su presencia en el aceite.

3.3.1. Partículas de Desgaste Normal ⁽ⁱ⁾.

Estas partículas corresponden al desgaste normal que generan los cuerpos metálicos en contacto (desgaste adhesivo). Su forma es similar a diminutas *escamas* metálicas, de un tamaño nunca superior a los 15 micrómetros y entre los 0,15 y 1 µm de grosor. Su superficie es lisa y no suelen presentar colores de oxidación.

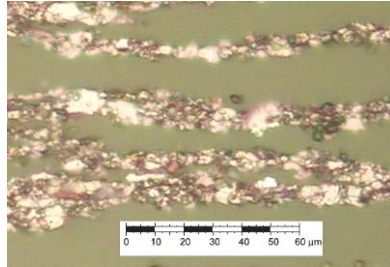


Figura 3.11. Partículas de desgaste normal alineadas por el efecto de campo magnético.

3.3.2. Partículas de Deslizamiento.

Las partículas de deslizamiento proceden del desgaste generado por fenómenos de adhesión y abrasión, principalmente a velocidades o cargas excesivas o a un fallo en la lubricación del elemento. Las partículas de deslizamiento presentan las siguientes características ^[10]:

- Estriaciones paralelas en la superficie, generalmente en la dirección de la dimensión mayor, además se observan claramente los bordes rectos y perfiles afilados.
- Ocasionalmente, se observan partículas alargadas acanaladas y semicirculares similares a diminutas tejas ^[11].
- Oxidación por sobrecalentamiento, habitualmente presentan colores que denotan las altas temperaturas generadas durante la formación de la partícula. Estos colores pueden ser de tonalidades azuladas o pajizas para aceros, verdi-grises para el caso de partículas de cobre, o tonalidades oscuras en aluminios.

ⁱ En inglés: *rubbing particles*.

En situaciones de desgaste severo por deslizamiento, se dan simultáneamente desgaste por corte debidas a asperezas duras, por lo que la presencia de partículas de los dos tipos se entremezcla.

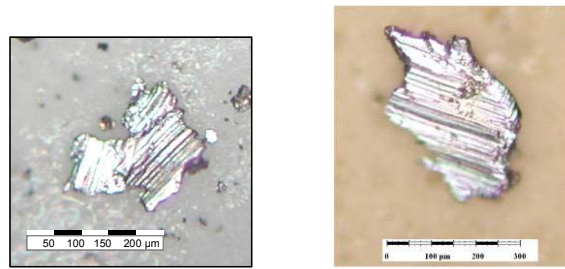


Figura 3.12. Partículas de deslizamiento.

3.3.3. Partículas de Corte.

Este tipo de partículas se debe a fenómenos de desgaste por corte, la presencia de las mismas es indicativa de fallos importantes en el funcionamiento de la máquina. Las partículas de corte tienen aspecto de virutas rectas, curvadas o incluso en forma de espiral, con una relación entre longitud y anchura elevada habitualmente de 20 ó 50:1 existen dos tipos principales:

- **Partículas debidas a asperezas duras ^(j)**: son partículas relativamente grandes, de 2 a 5 μm de anchura y una longitud superior a las 30 μm .
- **Partículas debidas a partículas duras ^(k)**: son partículas pequeñas, de 1 μm de anchura aproximadamente y de una longitud inferior a los 30 μm .

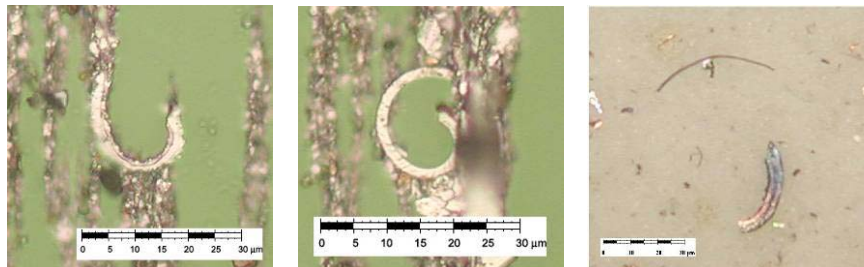


Figura 3.13. Partículas de corte.

^j En inglés: *two-body particles*.

^k En inglés: *three-body particles*.

3.3.4. Partículas de Fatiga.

Las partículas de fatiga tienen su origen en elementos con sobrecargas cíclicas principalmente, aunque también pueden aparecer por un montaje incorrecto de las piezas (falta de alineación o desequilibrado). Estas partículas son también típicas en cojinetes, así como en elementos con fricción por rodadura (rodamientos).

La aparición de microgrietas subsuperficiales que se van uniendo y agrandándose, progresando hasta la superficie, momento en el que se desprenden **fragmentos** de material dejando una picadura u hoyuelo en la superficie. Cuando estos fragmentos son aplastados entre las superficies en rodadura se originan las partículas **laminares**. Dentro de las microgrietas se generan **esferas** ^[12], las cuales aumentan de tamaño conforme la fatiga mecánica aumenta.

Características de las partículas de fatiga:

- **Fragmentos de fatiga** ⁽¹⁾: presentan una morfología equiaxial, con la superficie sin irregularidades pronunciadas, su relación dimensión mayor frente al grosor es inferior a 10:1 llegando incluso a 5:1.

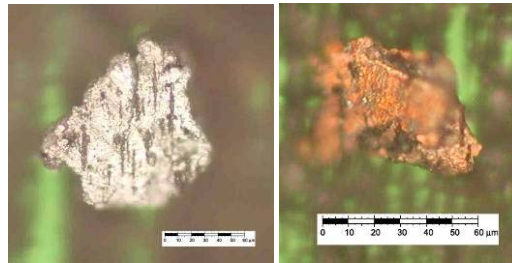


Figura 3.14. Fragmentos de fatiga.

- **Laminares**: presentan un aspecto aplanado, con la superficie suave (sin bordes rectos), en ocasiones presentan agujeros y bordes hendidos.

¹ En inglés: *chunk particles*.

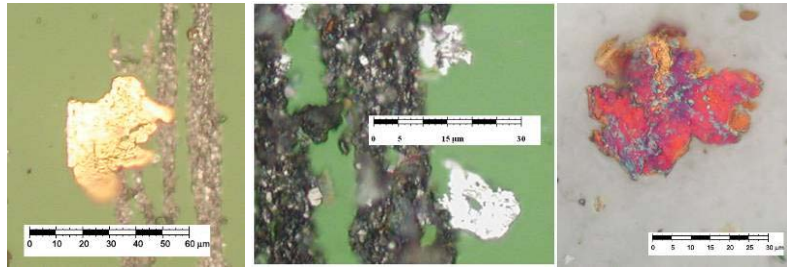


Figura 3.15. Partículas laminares.

- **Esferas:** si sus tamaños se encuentran entre los 1 y 10 micrómetros corresponden a un desgaste por fatiga de la maquinaria; no obstante, en ocasiones se detectan esferas ferrosas mayores de 30 μm , en este caso aparecen como consecuencia de entrada de contaminación desde el exterior debido a procesos de mecanizado.

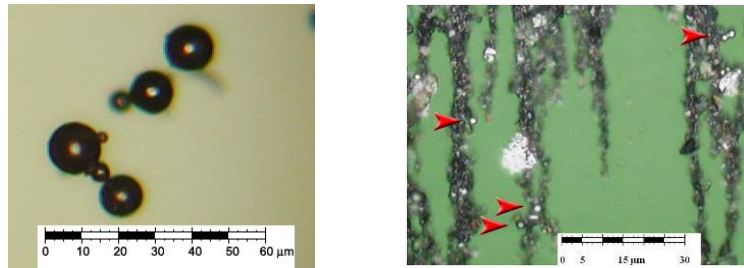


Figura 3.16. Esferas.

3.3.5. Óxidos Ferrosos.

Se diferencian cuatro tipos de óxidos:

- **Óxidos oscuros:** son partículas ferrosas de un color oscuro originadas por un sobrecalentamiento durante el funcionamiento de la máquina. Sobre las partículas se observan irisaciones y algunas áreas con colores de temple.



Figura 3.17. Óxido negro.

- **Óxidos rojos alfa:** tienen una tonalidad rojiza característica, son semitransparentes a la luz transmitida, responden con un color naranja brillante ante la luz polarizada, lo cual permite identificarlos fácilmente sobre el ferrograma. Su presencia indica una entrada de humedad en el lubricante, en algunos casos también penetran al circuito de lubricación como contaminación del exterior.

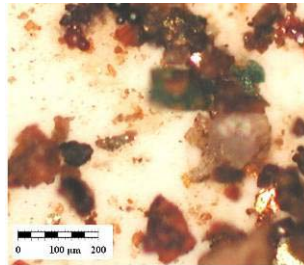


Figura 3.18. Óxidos rojos.

- **Óxidos beta:** son partículas lisas con bordes rectos, de aspecto muy similar a partículas de deslizamiento, con coloración grisácea y en algunos casos se observan irisaciones sobre su superficie. La principal característica que los diferencia es que son translúcidos, al menos en los bordes externos o en las áreas de menor espesor, presentando coloraciones parduscas con luz transmitida. Este tipo de partícula se genera principalmente por falta de lubricación en los mecanismos en contacto.

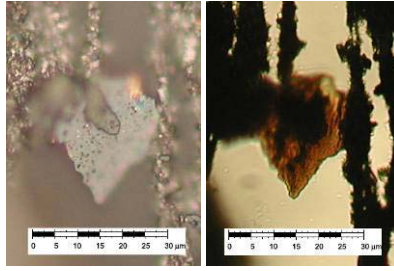


Figura 3.19. Óxido beta.

- **Partículas de corrosión:** estas partículas tienen un tamaño inferior a 1 micrómetro, suelen aparecer en elevadísimo número y son indicativas de una contaminación del lubricante por agua o compuestos químicos corrosivos.

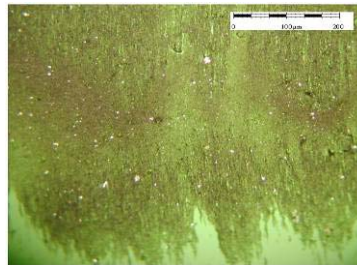


Figura 3.20. Partículas de corrosión.

3.3.6. Polvo Ambiental.

Las partículas de polvo en suspensión en la atmósfera pueden pasar al sistema de lubricación, sobretodo si no existe una correcta estanqueidad. Se pueden diferenciar dos tipos principales de partículas de polvo:

- **Polvo de silicatos:** son partículas brillantes, se asemejan a diminutos fragmentos de vidrio. Tienen una elevada dureza pudiendo llegar a rayar el acero.
- **Polvo calcáreo:** partículas traslúcidas con aspecto terroso, en algunas ocasiones presentan brillos, tienen un poder abrasivo inferior a los silicatos.

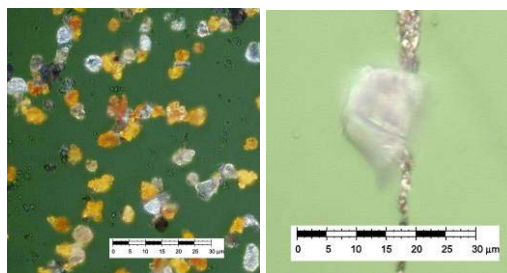


Figura 3.21. Partículas de polvo ambiental.

3.3.7. Fibras.

Las fibras suelen ser contaminantes exteriores que han penetrado al sistema de lubricación por falta de estanqueidad, no obstante, en ocasiones estas fibras pueden tener su origen en una degradación del material del filtro de aceite. ;

- **Fibras orgánicas:** son curvadas, con los extremos desgarrados, los tratamientos térmicos las suele carbonizar o fundir. Presentan colores brillantes que las hacen fácilmente identificables. Principalmente proceden de restos de tejidos de limpieza que entran al sistema como contaminantes. En este grupo también se han incluido las fibras de celulosa, que componen los papeles de limpieza y que se diferencian de las fibras sintéticas industriales por tener aspecto aplanado y rugoso.
- **Fibras de amianto (origen mineral):** son fibras rectas de una longitud variable, que puede oscilar entre 10 y más de 100 micrómetros, pero su grosor no supera 1 μm . Suelen tener los extremos puntiagudos y es frecuente encontrar fibras de mayor espesor formadas por haces de varias decenas de fibras. Responden a la luz polarizada mostrándose de un color blanco brillante.
- **Fibras de vidrio (origen mineral):** son fibras rectas de longitud variable, su grosor suele ser de 2 micrómetros o superior, responden a la luz polarizada presentando un color blanco brillante. Sus extremos suelen presentar un corte recto y limpio. Al igual que las fibras de amianto suelen proceder de restos de materiales aislantes térmicos que penetran con el aire del exterior.

Las fibras de origen orgánico suelen tener una baja dureza, su presencia en el sistema de lubricación suele conllevar problemas de saturación de filtros; las fibras de origen mineral, además de los mismos problemas en los filtros, pueden desencadenar desgastes abrasivos en los elementos lubricados al tener una elevada dureza.

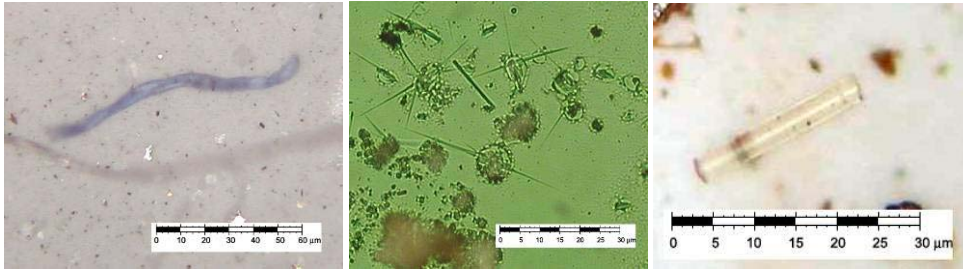


Figura 3.22. Fibras orgánicas, fibras de amianto y fibras de vidrio.

3.3.8. Polímeros de Fricción.

Los polímeros de fricción proceden de la polimerización de parte de las moléculas del lubricante, debido a las altas temperaturas, presiones de trabajo y procesos oxidativos. Su presencia en elevadas concentraciones aumenta la viscosidad del aceite y puede dar lugar a la saturación de los filtros.

Su aspecto es traslúcido y de forma irregular, similar a restos de adhesivos, tienen tonalidades que van desde el ámbar hasta ser totalmente transparentes. Los polímeros de mayor tamaño contienen embebidos en su interior partículas metálicas.

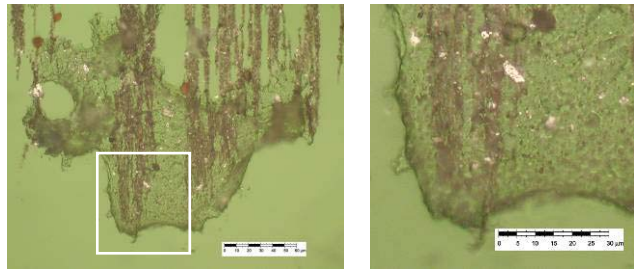


Figura 3.23. Polímeros de fricción.

3.3.9. Otros Contaminantes.

En este último grupo se comentan contaminantes minoritarios, pero que pueden encontrarse en los sistemas de lubricación.

- Restos biológicos: Es posible detectar en muestras de lubricantes granos de polen, fragmentos de vegetales o restos del exoesqueleto de insectos. Todos estos tipos de partículas son indicativos de fallos en los sellos, tapas o respiraderos de la instalación que permiten la entrada desde el

exterior de estos contaminantes. La presencia de restos biológicos suele ir asociada a la entrada de polvo mineral, fibras e incluso humedad al circuito.

- Aditivos antifricción: los aditivos que se añaden al aceite mejoran las propiedades lubricantes del mismo. El más utilizado es el disulfuro de molibdeno (MoS_2), sus partículas presentan un color gris azulado característico, su forma es similar a los fragmentos de fatiga.
- Pinturas: los restos de pinturas presentan una morfología similar a las partículas laminares, son fácilmente identificables por su coloración. La presencia de restos de pinturas no siempre es indicativo de entrada de contaminantes desde el exterior, ya que en ocasiones son elementos de la propia máquina los que los desprenden.
- Restos de sellos y adhesivos: proceden del deterioro de las juntas poliméricas de la máquina, su morfología es la de los fragmentos de fatiga, pero su coloración (negruzca, marrón) y aspecto superficial (rugoso, sin brillo metálico) los hace fácilmente reconocibles.

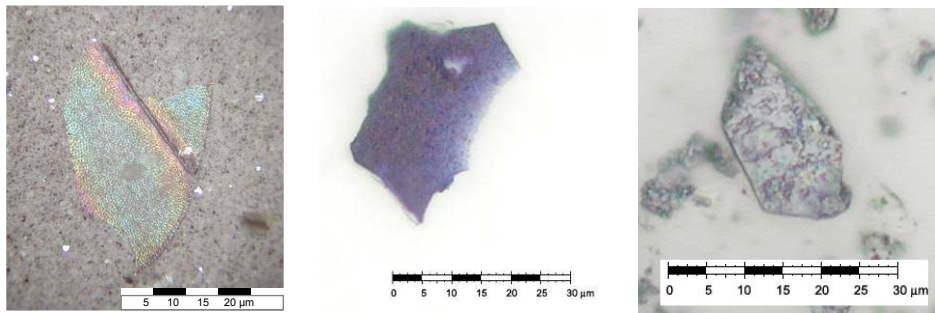


Figura 3.24. Ejemplos de restos biológicos, pinturas y aditivos antifricción.

3.4. Técnicas de Evaluación Cualitativa de Metales.

En el caso de máquinas que disponen de un lubricante en estado líquido, las partículas generadas por el desgaste mecánico y las partículas de contaminación que puedan introducirse en el sistema pasarán al seno del fluido; siendo retenidas por el sistema de filtrado del circuito o bien permaneciendo en suspensión en el aceite.

La ferrografía es una técnica de análisis que aísla e identifica las partículas presentes en el lubricante, para poder realizar un diagnóstico del motor en base a las mismas; se divide en dos grupos principales según la forma de análisis: lectura directa y analítica.

Además de las técnicas ferrográficas, se pueden emplear equipos contadores de partículas que clasifican por tamaños y concentraciones las diferentes partículas en suspensión que se encuentran en el aceite. En último lugar se comentan los colectores de partículas, que son instalados en los circuitos de lubricación y se encargan de retener las partículas ferrosas generadas por el equipo; el análisis visual de los colectores permite estimar la gravedad del desgaste.

3.4.1. Ferrografía de Lectura Directa.

Mediante esta técnica se calcula el número de partículas grandes y pequeñas presentes en el lubricante. Una mezcla de aceite lubricante y aceite fijador se vierte por un tubo precipitador a través de la zona de ensayo. En el tubo, una pequeña sección de cristal se apoya sobre un gran imán permanente. A medida que la muestra fluye a través del tubo, las partículas de desgaste precipitan según su tamaño relativo.

En el punto de entrada a la zona de ensayo se acumulan las partículas más grandes (L), de tamaño superior a las 5 micras, en un punto 5 milímetros hacia abajo desde el punto de entrada se concentran las partículas más pequeñas (S)^(m), de un tamaño de 1 micrómetro o 2 micrómetros. Estos puntos son los lugares más sensibles para detectar un cambio en la condición de desgaste de la máquina.

Durante el ensayo, el ferrógrafo cuantifica las partículas en estas clasificaciones de tamaño, separando partículas de hasta 800 micrómetros. A medida que la muestra de lubricante pasa libremente a través del tubo, todas las partículas de suciedad de carbón no deseadas, son barridas por la acción del flujo.

La zona de ensayo incluye también dos haces de luz, cada uno de los cuales está dirigido contra los dos puntos donde se depositan las partículas grandes y pequeñas. A medida que las partículas se precipitan, una medida en la reducción de la intensidad de la luz indica la cantidad de partículas deterioradas depositadas en cada lugar. El nivel de iluminación se percibe, amplía, traduce y visualiza bajo el control del circuito interno del ferrógrafo.

Si una muestra solamente contiene partículas pequeñas las medidas de los canales L y S pueden ser prácticamente iguales. Cuando las partículas entran en el tubo precipitador son influenciadas por el campo magnético; el vector de movimiento en la dirección del flujo es igual para todas las partículas (grandes o pequeñas) sin embargo, el vector de movimiento en dirección vertical es superior en las partículas grandes porque la fuerza de atracción del campo magnético es proporcional al volumen mientras que la resistencia al flujo en dirección horizontal es proporcional a la superficie.

^m Las letras L y S hacen referencia a las palabras inglesas *large* y *small* respectivamente.

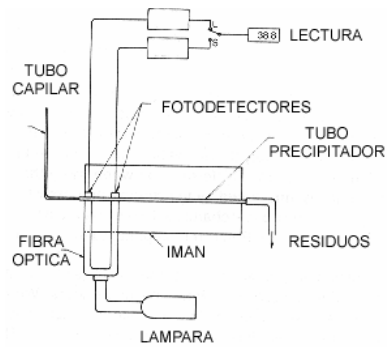


Figura 3.25. Esquema de funcionamiento y fotografía del ferrógrafo de lectura directa.

Las partículas de mayor tamaño se desplazan muy rápidamente hacia abajo, por ello todas las partículas de tamaño superior a 5 micrómetros se depositan en la posición del primer sensor. Las partículas de menor tamaño migran de manera más lenta a través del fluido, recorriendo más espacio antes de depositarse sobre el tubo de vidrio. Se debe reseñar que si las lecturas de L y S son similares esto sería indicativo de que solamente existen partículas pequeñas en el lubricante.

3.4.2. Ferrografía Analítica.

Esta técnica analiza de manera exhaustiva las partículas presentes en el lubricante, pudiendo inferir tanto el tipo de desgaste que está sufriendo el elemento lubricado, además de la composición metálica de las partículas, la cual está directamente relacionada con la zona específica que se está desgastando. Las partículas presentes en el lubricante se pueden aislar mediante las siguientes técnicas:

- **Ferrografía tradicional:** se realiza una separación magnética de las partículas, haciéndolas fluir por un plano inclinado.
- **Ferrógrafo rotatorio:** también se realiza una separación magnética, junto con el empleo de la fuerza centrífuga (en lugar de la fuerza gravitatoria) para realizar una ordenación de las partículas.
- **Filtrado con membranas:** las partículas quedan retenidas sobre un filtro de membrana de un tamaño de poro definido.



Figura 3.27. Ferrógrafo tradicional.



Figura 3.28. Ferrógrafo rotatorio.

3.4.2.1. Ferrógrafo Tradicional.

A través de esta técnica, las partículas son aisladas mediante el efecto de un campo magnético generado por un imán permanente. El proceso consiste básicamente en hacer fluir una muestra del aceite a analizar sobre un cubreobjetos de vidrio, el campo magnético hace que las partículas se orienten sobre el vidrio. Una vez terminado el ensayo, el cubreobjetos se puede llevar a un microscopio para el análisis en detalle de las diferentes partículas depositadas sobre él.

Las partículas depositadas sobre el cubreobjetos de vidrio adoptan la siguiente distribución:

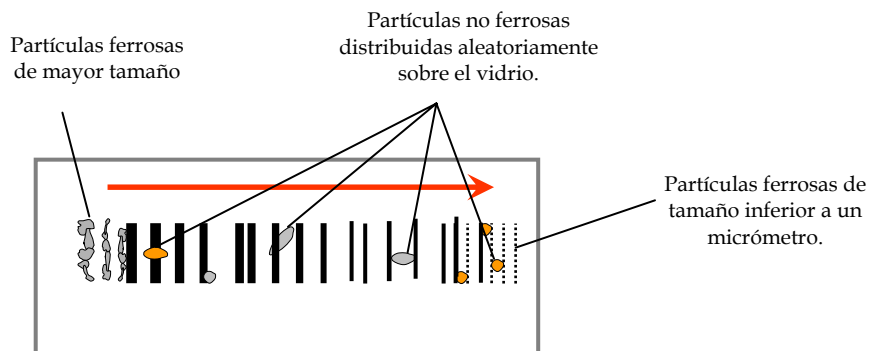


Figura 3.29. Ejemplo de un ferrograma tradicional.

3.4.2.2. Ferrógrafo Rotatorio.

Este ferrógrafo es una variante del ferrógrafo tradicional, con la misma base de funcionamiento para la separación magnética de las partículas, pero utilizando la fuerza centrífuga como forma de aislarlas. El equipo deja caer la muestra en el centro de un vidrio circular, en cuya base existe un imán permanente, las partículas se orientan formando círculos concéntricos en función del tipo de material que las compone.

3.4.2.3. Filtrado con Membranas.

El filtrado del aceite lubricante se realiza con membranas orgánicas de acetato (o nitrato) de celulosa con un diámetro medio de poro que puede oscilar desde los 0,45 micrómetros a los 8 μm . El tamaño de la membrana es también variable pudiéndose seleccionar membranas entre el rango de los 15 y 60 milímetros de diámetro; la selección de uno u otro tamaño viene definido por la cantidad de aceite a filtrar y el grado de contaminación de la muestra.

El proceso consiste básicamente en hacer circular la muestra de aceite a través de la membrana calibrada, empleando la aspiración por vacío para facilitar el flujo de lubricante.



Figura 3.30. Instrumental empleado en el filtrado con membranas.

3.4.2.4. Comparativa entre los Métodos.

A modo de resumen, se presenta una tabla comparando las ventajas e inconvenientes de métodos de separación magnéticos y mediante membranas:

	SEPARACIÓN MAGNÉTICA	SEPARACIÓN POR MEMBRANAS
VENTAJAS	<p>Ordenamiento de las partículas según composición. Posibilidad de observar con luz transmitida las muestras. Posibilidad de tratamientos térmicos de las partículas sobre el vidrio.</p>	<p>Método sencillo de realizar y sin necesidad de equipos costosos. Distribución homogénea de todas las partículas sobre la membrana.</p>
INCONVENIENTES	<p>El coste del equipo de análisis es elevado. Las partículas no ferromagnéticas no responden al campo magnético. En ocasiones se pierden partículas (incluso ferrosas) debido a arrastre del flujo.</p>	<p>El análisis con luz transmitida requiere de un acondicionamiento previo. Los tratamientos térmicos no son posibles. Si la concentración de partículas es muy elevada la membrana puede llegar a obstruirse.</p>

Tabla 3.3. Comparativa entre los métodos de separación.

3.4.3. Contadores de Partículas.

Son equipos específicamente diseñados para el recuento de las partículas en suspensión presentes en el aceite, clasifican las partículas por tamaños indicando la concentración de las mismas para cada tamaño. Estos equipos pueden realizar mediciones en el mismo circuito de lubricación o bien después de que sea extraída. La evaluación se realiza eliminando burbujas de aire para no ser evaluadas y con las máximas precauciones para evitar que precipiten las partículas de mayor tamaño Existen dos tipos de contadores:

- a) Equipos de recuento por oscurecimiento de luz: la muestra se hace circular a través de un conducto a una velocidad perfectamente definida, una fuente de luz blanca ilumina una sección de dicho conducto atravesado por el lubricante. Un fotodiodo situado en frente de la fuente se encarga de cuantificar el tamaño de la partícula en función de la luz absorbida por la misma. Los contadores equipados con luz blanca sólo pueden evaluar muestras de aceites hidráulicos o transmisiones, pero se muestran ineficaces para contar partículas en aceites usados procedentes de MCI/A debido a la opacidad de la muestra por la presencia de materia carbonosa en suspensión, para estos tipos de lubricantes se emplea como fuente de iluminación un haz láser.
- b) Equipos de recuento de luz dispersa: en este caso se fundamenta en la reflexión de la luz, en este caso la luz del foco y el fotodetector se encuentran formando un ángulo de 90 grados.

A nivel industrial el nivel de contaminación por partículas de un fluido lubricante se expresa según dos normas internacionales ISO 4406(99) o la NAS 1638. Estas normas asignan unos códigos numéricos al grado de contaminación del lubricante en función del tamaño y concentración de contaminantes en el aceite. Las tablas de límites de ambas normas se han adjuntado en el Anexo A de la tesis.

3.4.3.1. LaserNet Fines ⁽ⁿ⁾.

Se considera de interés tratar por separado este equipo de análisis ya que a parte de ser un contador de partículas por haz láser, dispone de un software de análisis de imágenes que establece el tipo de partícula en función de su morfología. Las partículas de tamaño superior a los 20 micrómetros son clasificadas dentro de seis grupos: corte, deslizamiento, fatiga, óxidos, fibras y gotas de agua.

El analizador sustituye al técnico humano encargado de la realización de análisis ferrográficos, realizando los ensayos en un tiempo muy inferior y sin depender de la apreciación subjetiva del operador. No obstante el equipo presenta también limitaciones:

- No se realiza una distinción entre partículas ferrosas y no ferrosas.
- Solamente considera las partículas de tamaños superiores a los 20 micrómetros, por tanto partículas críticas como las esferas de fatiga de tamaño no serían detectadas.
- El grupo de *óxidos* que tiene el analizador es demasiado amplio, pudiendo incluirse en él óxidos rojos, polvo mineral o polímeros de fricción, partículas que son indicativas de fenómenos de contaminación y desgaste totalmente diferentes.

3.4.4. Detectores de Partículas.

Estos tipos de sensores son introducidos en el circuito para dar una estimación de la concentración de partículas metálicas presentes en el aceite, se pueden clasificar principalmente en:

- a) Detectores magnéticos: capturan las partículas ferrosas mediante el empleo de un imán (que puede ser permanente o un electroimán), en función de la cantidad de partículas retenidas se genera una señal eléctrica proporcional a dicha concentración de partículas.
- b) Detectores de mallas: las partículas mayores que la luz del mallado son retenidas, provocando una señal eléctrica proporcional a la concentración y tamaño de las mismas presentes en el lubricante.

ⁿ Equipo de análisis desarrollado por la empresa *Spectro Inc.*

El empleo de estos dispositivos presenta una gran ventaja, la posibilidad de medir en todo momento la contaminación de la máquina sin la necesidad de extraer una muestra. No obstante, también presentan importantes limitaciones:

- Deben de ser situados en zonas de baja velocidad de flujo del lubricante, para evitar los arrastres de partículas.
- No se asegura la retención de todas las partículas; además, los detectores magnéticos sólo retienen fragmentos ferrosos y las mallas sí que pueden evaluar otros metales como cobre o aluminio, pero no consideran las partículas de polvo mineral o todas aquellas que estén por debajo del tamaño de malla.

3.5. Técnicas de Medida Cuantitativa de Metales.

Hasta este punto han sido comentadas técnicas de análisis que estimaban la cantidad de partículas metálicas presentes en el lubricante sin dar un valor exacto de la concentración en gramos por litro de metal en el aceite analizado. En este apartado se describen los principales equipos de análisis que permiten la evaluación exacta de dichas concentraciones.

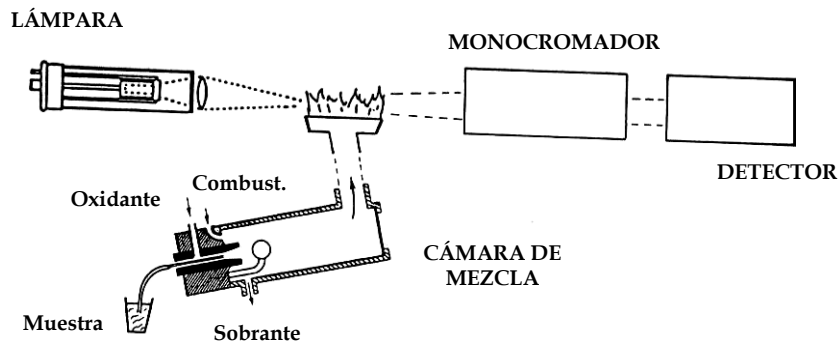


Figura 3.31. Esquema del espectrómetro de absorción de masas.

3.5.1. Espectrometría de Absorción de Masas.

Esta técnica consiste básicamente en excitar los átomos metálicos presentes en el lubricante y favorecer la absorción de energía en forma de luz de una determinada longitud de onda. La figura 3.31 presenta un esquema del funcionamiento del equipo, donde la muestra es aspirada junto al combustible y al gas oxidante hacia la llama, en el quemador se genera una atmósfera de alta temperatura. La llama es sometida a un haz de luz específico para cada elemento metálico, de manera que el monocromador y el detector se encargan de cuantificar la concentración de metal asociado a la luz absorbida por la muestra.

La principal desventaja de este método es el tiempo de ensayo, requiriendo unos 5 minutos por cada elemento metálico analizado, ya que es necesario cambiar de lámpara en función del metal a cuantificar.

3.5.2. Espectrometría de Emisión.

En las técnicas espectrométricas de emisión es la energía desprendida por los átomos metálicos al ser excitados la que es cuantificada. En el análisis de aceites lubricantes se utilizan dos variantes de esta técnica:

- Espectrómetro de rotrodo (RDE).
- Espectrometría de emisión de plasma (ICP-OES).

3.5.2.1. Rotrodo (RDE).

La fuente de excitación es generada por un arco eléctrico de alta intensidad de corriente. El lubricante es llevado por una rueda de grafito hacia un electrodo de alta intensidad, de manera que el aceite depositado sobre la rueda se volatiliza debido a la descarga eléctrica generada. El arco eléctrico sobre el aceite hace que se volatilice el aceite y las partículas existentes en él, generando una excitación luminosa con longitudes de onda asociadas a los elementos metálicos presentes en la muestra. Esta luz es posteriormente analizada a través de redes de difracción y tubos fotomultiplicadores, cuantificándose la concentración de elementos del lubricante.

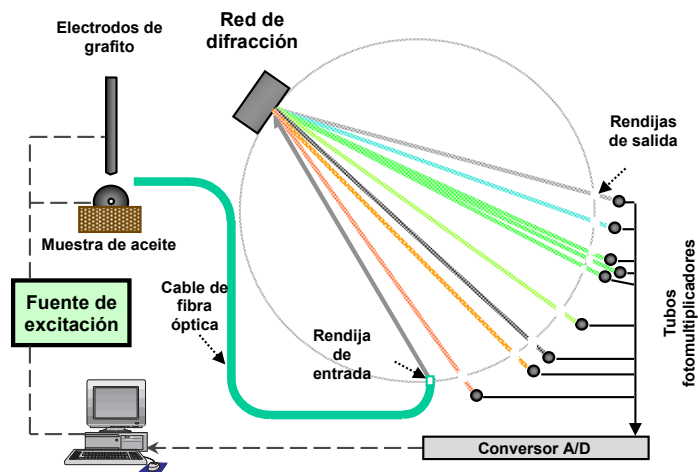


Figura 3.32. Esquema del espectrómetro por rotrodo.

3.5.2.2. Espectrómetro de Emisión de Plasma (ICP-OES).

En este caso la fuente de excitación se obtiene a partir de un plasma de argón ionizado mediante radiofrecuencias. El plasma alcanza temperaturas de hasta 10.000 K. Se pueden cuantificar simultáneamente un gran número de metales, lo cual da lugar a ensayos muy rápidos.

En el capítulo 5 de la presente Tesis se describe con mayor detalle el funcionamiento de este tipo de espectrómetros, ya que es el tipo más utilizado en el diagnóstico de maquinaria a partir del análisis de aceite usado.

3.5.3. Fluorescencia de Rayos X (XRF).

Esta técnica consiste en introducir una pequeña cantidad de lubricante en un contenedor especial que es irradiado con rayos X. La radiación hace que los electrones en los átomos suban a niveles de mayor energía, cuando estos electrones vuelven a su estado original emiten también radiación X específica para cada elemento, esta emisión de energía es denominada fluorescencia. Analizando la energía emitida es posible determinar qué metales están presentes en el aceite lubricante y en qué concentraciones.

Las principales ventajas que tiene este método frente a las anteriores técnicas de análisis son:

- Las muestras pueden ser analizadas en forma de líquido o sólido.
- Se pueden evaluar elevadas concentraciones de metales y bajas concentraciones de otros dentro de la misma muestra.
- Es una técnica totalmente no destructiva.

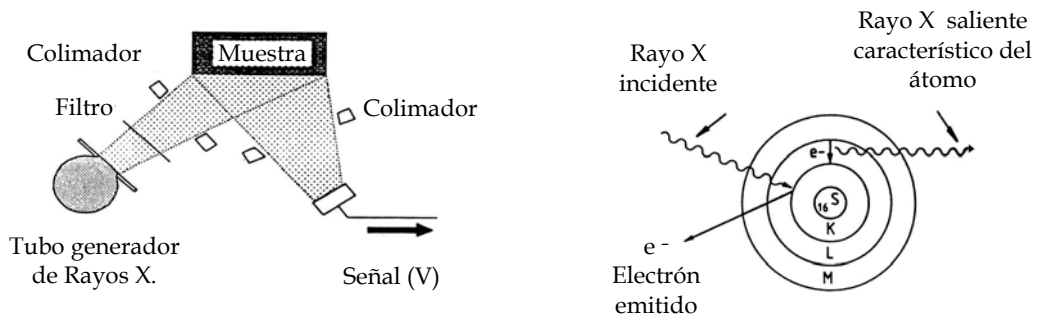


Figura 3.33. Esquema del espectrómetro XRF.

3.6. Referencias Bibliográficas.

-
- 1 Ayel, J. *Les Différentes Formes Tribologiques d'Usure des Surfaces Métalliques (Première Partie)*. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. Vol 31, no 3, pp 503-534. 1976.
 - 2 Ayel, J. *Les Différentes Formes Tribologiques d'Usure des Surfaces Métalliques (Deuxième Partie)*. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. Vol 31, no 4, pp 703-727. 1976.
 - 3 Fygueroa Salgado, S. J. *Diagnóstico de Motores de Encendido por Compresión de Automoción Mediante Análisis del Lubricante*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. 1993.
 - 4 ASM Handbook. Volume 18. *Friction, Lubrication and Wear Technology*. ASM International. 1992.
 - 5 Hamblin, M. G.; Stachowiack, G. W. *Description of Abrasive Particle Shape and Its Relation to Two-Body Abrasive Wear*. *Tribology Transactions* vol 39, 4, (pp 803-810). 1996.
 - 6 Trezona, R.I.; Allsopp, D.N.; Hutchings, I. M. *Transitions Between Two-Body and Three-Body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test*. *Wear* 225-229 (pp 205-214). 1999.
 - 7 Stachowiack, G. W; Stachowiack, G. B. *The Effects of Particle Characteristics on Three-Body Abrasive Wear*. *Wear* 249 (pp 201-207). 2001.
 - 8 Jones, M. H.; Scott, D. *Industrial Tribology. The Practical Aspects of Friction, Lubrication and Wear*. Elsevier Science LTD. 1991.
 - 9 Verlinden, A. *Laboratories at Work: Used Oil analysis at Wear Check, Belgium*. *Tribotest Journal* 1-4, pp 331-346. 1995.
 - 10 Anderson, D. P. *Wear Particle Atlas (revised)*. Predict technologies. 1991.
 - 11 Rao, B. K. N. *Handbook of Condition Monitoring*. Elsevier Science LTD. 1996.
 - 12 Balogh, I. *The Formation of Spherical Particles under Abrasive Conditions*. *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, Vol. 46, No. 1 (pp. 29-35). 2002.

REVISIÓN DE LA FERROGRAFÍA ANALÍTICA.

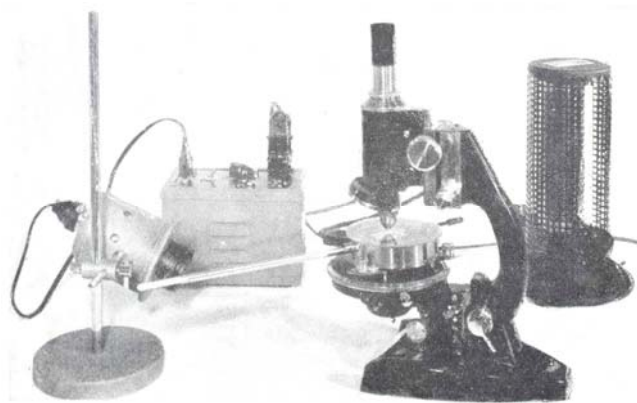


Figura 4.0. *Microscopio para el análisis del lubricante, Institute Français du Pétrole, 1971 ^[1].*

Índice

4.1. Introducción.	75.
4.2. Método Combinado de Separación de Partículas.	75.
4.3. Observación mediante Microscopía Óptica.	79.
4.4. Observación mediante Microscopía Electrónica.	86.
4.5. Valoración de las Muestras.	87.
4.6. Análisis Informático de Imágenes.	96.
4.7. Referencias Bibliográficas.	102.

4.1. Introducción.

Este capítulo presenta los trabajos realizados para obtener un proceso de separación de partículas, que combine la ferrografía tradicional, mediante campo magnético, con la separación de partículas mediante filtrado con membranas. Después de realizar la descripción de este método se comentan los tratamientos realizados sobre las partículas para facilitar su análisis y las técnicas micrográficas empleadas para su óptima visualización. En el último capítulo se relatarán los métodos de análisis de imágenes empleados para determinar de manera automática el tamaño y tipo de partículas presentes en el aceite.

4.2. Método combinado de separación de partículas.

4.2.1. Objetivo.

El objetivo de este método es fusionar en un mismo ensayo las técnicas de ferrografía analítica [2,3,4,5,6,7,8] y el filtrado con membranas para una separación óptima de todas las partículas presentes en el lubricante, facilitando el posterior estudio de las mismas.

Uno de los obstáculos para realizar una correcta separación de las partículas es la elevada viscosidad del lubricante a la temperatura de trabajo en el laboratorio (aproximadamente 25 °C), en estas condiciones el aceite ofrece una elevada resistencia al movimiento dentro de su seno, dificultando la retención de las partículas ferrosas por el campo magnético aplicado al fluido. Tampoco es recomendable reducir en exceso la viscosidad, ya que en ese caso la velocidad del aceite al fluir sobre el cubreobjetos de vidrio es elevada y provoca fenómenos de arrastre de partículas ferrosas, pasando parte de ellas a la membrana.

Después de la realización de diferentes pruebas con variaciones en las proporciones de aceite y disolvente, se ha considerado, de manera general, que un volumen de aceite usado de 5 ml es el idóneo para obtener resultados representativos, junto a un volumen de 0 a 3 ml de disolvente. La cantidad de aceite lubricante no se puede modificar ya que el posterior diagnóstico se realiza en función de las partículas presentes en dicho volumen de muestra; sí es posible modificar la cantidad de disolvente en función de la viscosidad cinemática del aceite analizado.

El disolvente orgánico seleccionado para la realización de las diluciones ha sido el heptano ^(a), debido a su baja toxicidad, su volatilidad moderada, su total miscibilidad con el aceite y su coste. El único inconveniente detectado ha sido la presencia de algunas partículas metálicas en el disolvente (esferas, partículas de corte o partículas de deslizamiento); pese a su reducido número, su presencia en la

^a Marca Panreac, calidad PA, en botellas de vidrio de 1.000 ml, se ha comprobado que la presencia de partículas de contaminación es superior en los bidones de 5 litros debido a los procesos

muestra podría dar lugar a diagnósticos erróneos. Estos contaminantes son eliminados del disolvente mediante un filtrado previo, empleando un filtro de membrana ^(b) de 0,45 micrómetros de diámetro de poro.

4.2.2. Descripción del montaje.

Los diferentes ensayos realizados para la obtención del diseño final del equipo de análisis vienen reflejados en el Anexo C de la presente tesis. El dispositivo de separación de partículas (fig. 4.1) está compuesto por los siguientes elementos:

- **Bomba peristáltica** ^(c): suministra un caudal constante de la mezcla aceite-disolvente durante la realización del ensayo. En el diseño del proceso realizado, la bomba aspira el fluido llenando una pipeta de polipropileno, quedando retenido en su interior para ser posteriormente impulsado. Este proceso evita que el aceite llegue hasta la bomba, en esta zona donde el tubo polimérico es aplastado por los cabezales para generar el flujo de aspiración-impulsión se podrían producir pérdidas de partículas al quedar éstas embebidas o depositadas en la superficie del tubo. El caudal generado por este equipo es constante y sin las limitaciones de otros equipos que regulan el caudal a través de capilares.

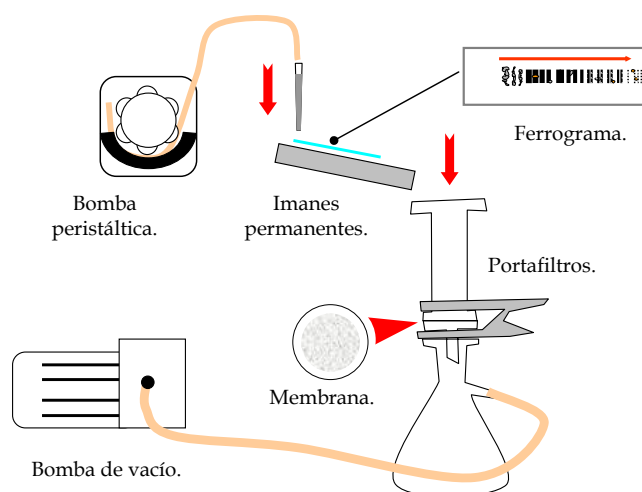


Figura 4.1. Esquema del equipo de separación.

^b Membrana de acetato de celulosa marca Albet,

^c Bomba peristáltica Gilson.

- **Imanes permanentes:** se han dispuesto dos imanes permanentes de ferrita que generan un campo magnético suficiente para retener las partículas ferromagnéticas. El campo generado es capaz de atraer las partículas de tamaños superiores a los 0,5 micrómetros.
- **Cubreobjetos de vidrio:** la mezcla de aceite y disolvente se hace fluir sobre un cubreobjetos de vidrio ^(d), dado su espesor mínimo, el apantallamiento sobre el campo magnético es prácticamente nulo. Las razones para la selección del vidrio como sustrato en lugar de otros materiales como los plásticos son las siguientes:
 1. Es un material totalmente transparente permitiendo la posterior observación de las partículas en el microscopio mediante luz transmitida
 2. Una vez realizada la separación magnética, el vidrio puede ser calentado por encima de los 330°C sin que sufra alteraciones estructurales que dificulten el posterior análisis visual de las partículas.
 3. Es lo suficientemente rígido para ser manipulado sin que se deteriore así como para soportar el flujo de aceite sin deformarse por la carga aplicada sobre él.
 4. El vidrio no es alterado químicamente por el disolvente y los diferentes tipos de lubricantes empleados en el proceso, tampoco envejece con el tiempo, manteniendo sus propiedades ópticas y su estabilidad estructural por tiempo indefinido.
- **Filtro de membrana:** una vez que el aceite ha atravesado el campo magnético es filtrado a través de un filtro membrana ^(e), de manera que las partículas no ferromagnéticas quedan retenidas sobre él. La membrana polimérica es de 25 mm de diámetro; han sido seleccionadas estas dimensiones porque permite ser observada con más facilidad en el microscopio al poderse colocar sobre los cubreobjetos de vidrio estándar de 54x26 mm. El tamaño de poro seleccionado es de 0,8 micrómetros para aceites hidráulicos, turbinas y para el control de calidad de los lubricantes nuevos, las membranas de 3,0 µm se recomiendan para los aceites de MCI y las de diámetros de 8,0 µm son empleadas en aceites procedentes de transmisiones, reductores y diferenciales.
- **Accesorios de filtrado:** la membrana se sitúa en un portafiltros ^(f) de manera que recoge el fluido que va a ser filtrado y sustenta a la membrana para que no se deforme por la presión de aspiración ejercida. El

^d Marca Menzel-Glaser de 60x24 mm y 200 micrómetros de espesor.

^e Marca Albet de nitrato de celulosa, blanca no estéril, de 25 mm de diámetro.

^f Marca Afora, fabricado en vidrio Pirex.

portafiltros está situado sobre un matraz de vidrio quitasatos que se irá llenando del aceite filtrado. La presión de aspiración requerida es generada por una bomba de vacío, alcanzando una depresión de 450 milibares. Después de cada proceso se realiza una limpieza exhaustiva del material para evitar la contaminación de las muestras; se debe reseñar que de manera sistemática se realizan ensayos para comprobar que el grado de limpieza del material es adecuado y no genera contaminación cruzada.

4.2.3. Proceso Operativo.

Una vez que han sido descritos los principales elementos que forman parte del montaje se comenta detalladamente el funcionamiento del proceso:

1. Se agita el recipiente de toma de muestras en un baño de ultrasonidos ^(g) durante 15 minutos, a una temperatura de 50 °C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) a fin de favorecer la homogeneización del lubricante.
2. Inmediatamente después de haber terminado la agitación se extraen 5 ml del recipiente, y se mezclan con el disolvente.
3. La mezcla se aspira mediante la bomba peristáltica, quedando toda la muestra dentro de la pipeta de 10 ml, y no alcanzando en ningún momento el tubo de la bomba. Se debe reseñar que la pipeta se deberá reemplazar por una nueva cada vez que se ensaye un lubricante distinto, el tubo de la bomba solamente se reemplazará cuando se observe que ha sufrido un deterioro por el uso, ya que por él sólo circula el heptano limpio empleado para el lavado de la muestra.
4. Se sitúa el tubo sobre el cubreobjetos de vidrio y se comienza a impulsar el aceite, a una velocidad de 0,5 ml/min.
5. El aceite va fluyendo sobre el cubreobjetos de vidrio, las partículas quedan retenidas por el campo magnético, y en último lugar el aceite es llevado hasta el filtro de membrana, adicionalmente se añade 1 ml de disolvente para favorecer el paso del aceite a través del filtro.
6. Una vez que la mezcla de aceite y disolvente ha sido vertida totalmente, se realiza un lavado con 1 ml de heptano para eliminar los restos de lubricante o carbonilla (en el caso de aceites de MCIA) que hayan quedado sobre el vidrio. La velocidad de giro de la bomba se reduce hasta los 0,2 ml/minuto para que el flujo de lavado sea suave y se evite al máximo el arrastre accidental de partículas.
7. Terminado el proceso, se dispone de dos sustratos para su posterior análisis microscópico, el cubreobjetos de vidrio y el filtro de membrana.

^g Baño de ultrasonidos marca Branson modelo 1510.

4.2.4. Ventajas del Método Combinado de Separación.

La principal ventaja obtenida mediante este método analítico es la realización de una separación de las partículas en ferrosas y no ferrosas, durante el mismo ensayo; garantizándose que todas las partículas no ferrosas de tamaño superior al poro de la membrana quedan retenidas sobre la misma, pudiéndose realizar posteriormente su análisis microscópico. Las partículas ferrosas son retenidas por el imán, comprobándose que sobre el vidrio quedan incluso partículas de tamaños inferiores a los 0,5 micrómetros.

4.3. Observación mediante Microscopía Óptica.

Las partículas aisladas deben ser visualizadas para clasificarlas y determinar el desgaste del motor. Para la observación, tanto de las membranas como del cubreobjetos de vidrio, se emplea principalmente la microscopía óptica. Se describen en este apartado las técnicas de análisis y los tratamientos previos empleados para facilitar la identificación de las partículas por parte del observador.

4.3.1. Tratamiento Térmico.

Esta técnica permite al observador estimar la composición de las partículas depositadas sobre el vidrio en función de los cambios morfológicos y cromáticos que sufren al ser calentadas [2,9,10]. En la tabla 4.1 se muestra el efecto de la temperatura sobre los diferentes tipos de partículas. Estos tratamientos sólo pueden ser aplicados sobre los sustratos de vidrio, en ningún caso sobre las membranas de nitrato de celulosa, las cuales se degradan a temperaturas inferiores a los 100°C.

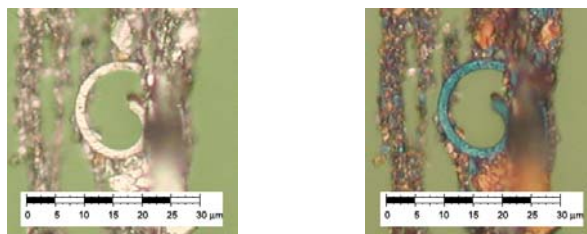


Figura 4.2 Efectos del tratamiento térmico sobre partículas ferrosas.

El proceso analítico seguido en la realización de la tesis consiste en el calentamiento inicial del equipo calefactor^h hasta los 330°C (±5°C) midiendo la temperatura mediante un termómetro infrarrojo. Posteriormente se sitúa el cubreobjetos sobre la placa metálica durante 90 segundos y finalmente, una vez enfriado el cubreobjetos se realiza su observación al microscopio.

MATERIAL	TEMPERATURA DEL ENSAYO			
	330°C	400°C	480°C	540°C
Aceros al carbono y aceros de baja aleación	Azul	Gris brillante	---	---
Aceros de media aleación	Pajizo o bronce	Bronce y algunas zonas azuladas poco definidas	---	---
Aceros aleados con níquel	Sin cambios	Sin cambios	Bronce con un color azulado en bastantes partículas.	Todas las partículas azules o gris azuladas.
Aceros inoxidables	Sin cambios	Generalmente sin cambios, leve amarilleado en algunas partículas.	Pajizo o bronce con ligero color azulado en algunas partículas.	La mayoría de las partículas continúan con color pajizo o bronce; algunas partículas muestran un azul poco definido.
Plomo, estaño	Aparecen tonalidades azuladas.	El color blanco inicial es sustituido totalmente por tonos azul claro.	Las partículas adoptan colores azul oscuro en toda su superficie.	El color azul se mantiene, comienza a apreciarse fusiones de material.
Cobre, bronce	No se aprecian cambios significativos.	El cobre adopta coloraciones más rojizas.	Tonos rojos generalizados.	Los colores se oscurecen, llegando a tonos negros.
Partículas de origen orgánico	Carbonización, contracción o vaporización dependiendo del tipo de material.			

Tabla 4.1. Efecto del tratamiento térmico sobre diferentes materiales.

Se ha comprobado que el calentamiento a 330°C es en la mayoría de los casos suficiente para realizar la diferenciación. Para muestras (un número mínimo) donde el primer calentamiento no ha facilitado la diferenciación se ha procedido a someter a la muestra a temperaturas de 400°C, 480°C y 540°C, siendo el último calentamiento el que mayor información adicional ha proporcionado.

Debe reseñarse que este proceso de calentamiento no se realiza de manera sistemática, sino solamente en muestras donde existan dudas de la composición de

^h Equipo de calentamiento.

las partículas, en estos casos se recomienda el calentamiento inicial a 330°C y si no se consigue una diferenciación total se deberá pasar a la temperatura de 540°C.

Además del tratamiento térmico, para el caso de metales no ferromagnéticos y de un aspecto similar (brillo blanco metálico) que son los recogidos en la tabla 4.2, existe otra técnica de identificación consistente en hacer reaccionar las partículas con disoluciones de ácido clorhídrico (HCl) 0,1 N y sosa cáustica (NaOH) 0,1 N, a fin de facilitar su diferenciación. Para la realización de los ensayos de ataque químico se depositará el cubreobjetos sobre una placa calefactora a 90°C, añadiendo una gota de ácido o base sobre las partículas y dejando que la gota se evapore para posteriormente proceder a su análisis microscópico.

Se ha comprobado experimentalmente que el empleo de disoluciones ácidas o alcalinas es una técnica de difícil aplicación, y no se recomienda su uso por los siguientes motivos:

- La concentración de partículas no ferrosas depositadas sobre el ferrograma es reducida y predominan las reacciones paralelas del ácido con las partículas ferrosas depositadas sobre el ferrograma.
- Aunque se deposite la gota con la mayor suavidad, son inevitables los arrastres de partículas, dando lugar a errores de apreciación, ya que se puede considerar que una partícula se disuelto por el efecto del reactivo añadido, cuando realmente lo que ha ocurrido es un arrastre de la misma.
- Al haberse empleado disoluciones ácidas y alcalinas, aunque de muy baja concentración, hace que se desprendan vapores corrosivos incluso después de haberse realizado la evaporación sobre la plancha metálica. Estos vapores residuales no suponen ningún riesgo para el operador, pero sí pueden dañar a los objetivos de microscopio corroyéndolos.



Figura 4.3 Efectos del tratamiento térmico sobre un fragmento de cobre..

Metal	0,1 N HCl	0,1 N NaOH	Temperatura del Ensayo			
			330°C	400°C	480°C	540°C
Al	Sol.	Sol.	S. C.	S. C.	S. C.	S. C. (*)
Ag	Insol.	Insol.	S. C.	S. C.	S. C.	S. C.
Cr	Insol.	Insol.	S. C.	S. C.	S. C.	S. C.
Cd	Insol.	Insol.	Marrón.	---	---	---
Mg	Sol.	Insol.	S. C.	S. C.	S. C.	S. C.
Mo	Insol.	Insol.	S. C.	Marrón o pajizo con tonalidades morado oscuro.		---
Ti	Insol.	Insol.	S. C.	Marrón claro.	Marrón	Marrón oscuro.
Zn	Sol.	Insol.	S. C.	S. C.	Marrón	Marrón y azul.

Abreviaturas:

(*) : puede volverse brillante en algunos casos.

Sol: soluble. Insol: insoluble. S.C.: sin cambios.

Tabla 4.2. Efecto del tratamiento térmico y químico sobre diferentes metales.

4.3.2. Transparentado de la Membrana.

La membrana polimérica, una vez finalizado el proceso de filtrado, presenta una apariencia prácticamente opaca, dificultando el paso de luz a través de ella. Para reducir la opacidad del nitrato de celulosa se ha empleado un aceite de inmersiónⁱ que empapa la membrana, consiguiendo que el material polimérico (inicialmente blanco) se torne prácticamente transparente y permita el paso de la luz a través del mismo. El proceso de transparentado permite la obtención de imágenes con luz transmitida además de una mayor calidad en las realizadas con luz reflejada al eliminarse los brillos provocados por el fondo blanco de la membrana.

4.3.3. Fijado de las Muestras.

Para realizar una observación tanto del filtro como del cubreobjetos se debe emplear un segundo sustrato compatible con los soportes del microscopio, es por ello por lo que se emplean portaobjetos de vidrioⁱⁱ.

ⁱ Aceite de inmersión marca Euromex de índice de refracción 1,516.

^j Portaobjetos de vidrio Menzel-Glaser de 76x26 mm.

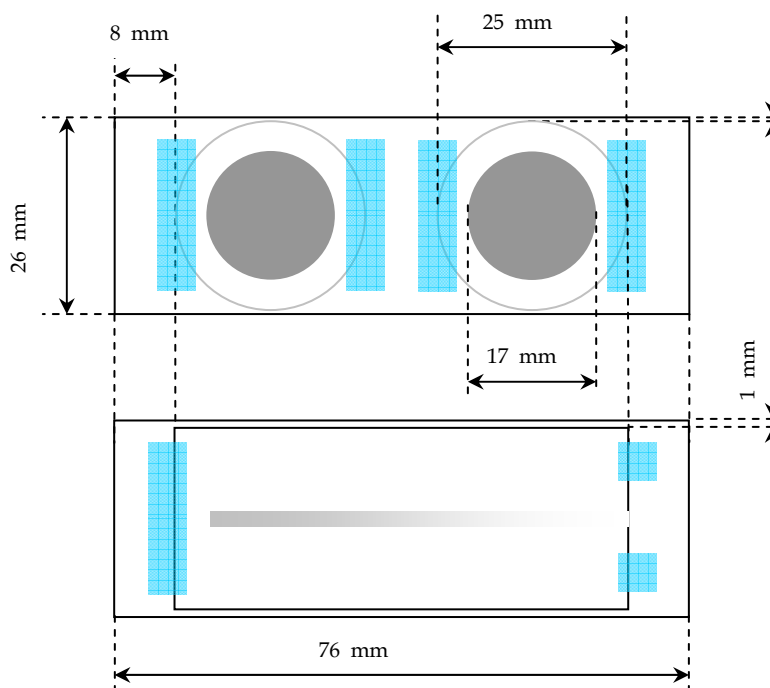


Figura 4.4. Disposición de la membrana y el cubreobjetos para el análisis microscópico.

En la figura 4.4 se presenta la disposición de los dos sustratos sobre el portaobjetos de vidrio, se debe reseñar que es importante que en todas las muestras analizadas se mantengan las mismas medidas, para que de este modo sea posible realizar comparaciones de los resultados obtenidos entre diferentes aceites. La fijación al portaobjetos se realiza mediante cinta adhesiva transparente.

4.3.4. Técnicas de Observación.

El tipo de microscopio óptico empleado en la observación [11] es bicromático (figura 4.5), el cual posee dos fuentes luminosas, una transmitida y otra reflejada que pueden ser empleadas por separado o simultáneamente; a continuación se detallan ambos tipos:

- **Luz transmitida:** la iluminación atraviesa la muestra, por tanto solamente se observa la silueta de las partículas si éstas son opacas, mientras que si son traslúcidas es posible detectar la luz que las atraviesa. Además con la luz transmitida es posible detectar fisuras y grietas internas en partículas opacas. Se puede iluminar con luz verde

para mejorar el contraste entre partículas y fondo o bien emplear luz blanca la cual adquiere una mayor intensidad luminosa al no interponerse el filtro entre la muestra y la fuente.

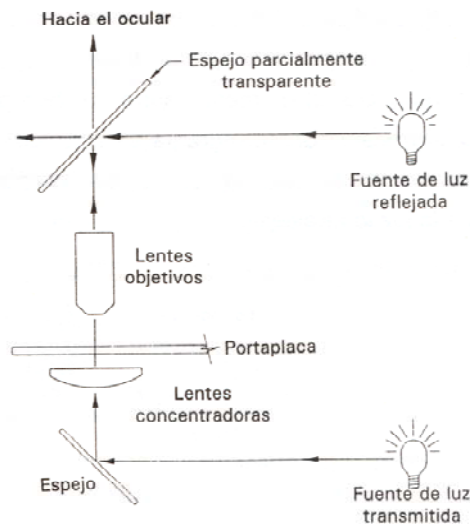


Figura 4.5. Trayectoria óptica en un microscopio bicromático.

- **Luz reflejada:** la iluminación incide sobre la muestra, de manera que el operador observa la muestra con sus colores reales. Se puede utilizar de manera simultánea con la iluminación transmitida, permitiendo obtener imágenes de mayor calidad. También se recurre al uso de filtros gamma que facilitan la observación de partículas metálicas lisas, ya que el filtro colorea de magenta las áreas que reflejan la luz. Los filtros gamma son principalmente empleados en el análisis de partículas sobre membranas
- **Luz polarizada:** La observación con luz polarizada es una herramienta eficaz para identificar partículas no metálicas como plásticos, óxidos o polvo, debido a que al poseer una estructura cristalina despolarizan la luz incidente. Se emplean dos polarizadores, uno situado entre la fuente luminosa y la muestra y el otro, desfasado 90° situado entre la muestra y el observador, tal como se aprecia en la figura 4.6. Los polarizadores presentan una mejor respuesta cuando se visualizan los cubreobjetos de vidrio ya que al ser completamente planos las partículas cristalinas aparecen brillantes sobre un fondo negro (el vidrio al ser amorfo no desvía la luz); cuando se trabaja con membranas poliméricas, al tener

éstas una superficie muy irregular, no se genera un fondo oscuro y por tanto no es tan sencilla la detección de cuerpos cristalinos.

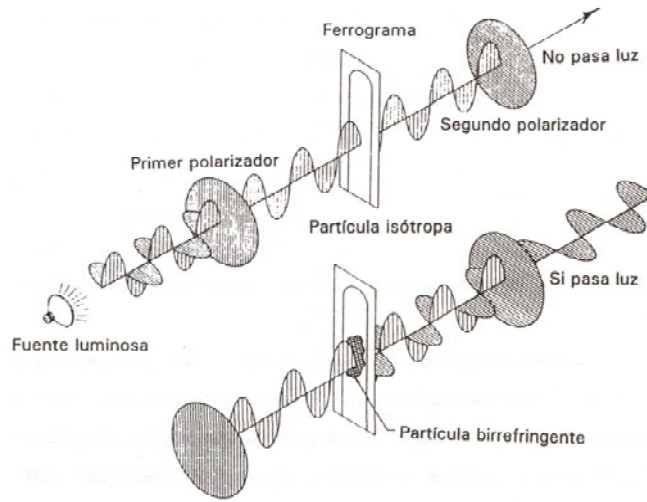


Figura 4.6. Disposición de los polarizadores.

4.3.5. Metodología General de Análisis.

Una vez realizada la separación magnética, el filtrado y el fijado de las muestras sobre el portaobjetos de vidrio se procede al análisis visual de las mismas:

- Cubreobjetos de vidrio.
 - a) La primera observación se realiza a 100 aumentos, observando de manera general los primeros milímetros del ferrograma, donde se concentran las partículas ferrosas de mayor tamaño. Pasando a aumentos mayores se identifica la morfología de las partículas allí aisladas.
 - b) A continuación se estudian las partículas situadas en el tramo final del ferrograma, donde se agrupan las partículas ferrosas de menor tamaño, una elevada presencia de estas partículas es indicativa de un desgaste corrosivo del mecanismo lubricado.
 - c) Después de analizarse las partículas ferrosas se procede al análisis de las partículas no ferrosas de mayor tamaño que ocasionalmente pudieran quedar depositadas a lo largo del ferrograma. Esta observación se realizará a 200 aumentos ya que solamente son importantes las partículas grandes, las de menor tamaño habrán sido arrastradas por el flujo y depositadas sobre la membrana polimérica.
 - d) El siguiente proceso es la detección de partículas de polvo mineral y óxidos rojos, empleando luz polarizada reflejada. Simplemente trabajando a 200 aumentos se pueden identificar con total claridad estos tipos de partículas.
- Membrana polimérica:
 - a) Se realiza una observación a 100 aumentos sobre la totalidad de la superficie de la membrana para detectar la presencia de las partículas de mayores tamaños.
 - b) Una vez realizado el estudio preliminar se realizan la cuantificación en detalle de los diferentes metales existentes sobre la membrana. Distinguiendo partículas de aluminio, cobre, polímeros de fricción, polvo mineral, metales antifricción y resto de partículas.

4.4. Observación mediante Microscopía Electrónica.

La microscopía electrónica permite un análisis con mayor detalle de los elementos separados, es posible trabajar con un mayor rango de aumentos, además de poder emplear el análisis de rayos X para determinar la composición química exacta de cada partícula.

El análisis es mucho más costoso que el realizado mediante microscopía óptica, pero se suele emplear para análisis de muestras de equipos críticos o en casos en los que existen dudas acerca de la naturaleza de las partículas.

4.4.1. Preparación Previa de las Muestras.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) requiere que la superficie a observar sea conductora, por tanto ya bien el vidrio o la membrana deben de ser recubiertos con una capa de metal conductor que permita el flujo de electrones.

Este recubrimiento es posible realizarlo empleando oro o grafito como metales conductores. El oro permite la obtención de imágenes de mayor calidad, pero por si se desea realizar un análisis de composición de la partícula, al recubrirse con oro aparecen una serie de picos de emisión debidos a los electrones de los átomos de oro que dificultan el análisis y pueden enmascarar a otros metales; por otro lado debe considerarse su elevado coste económico. Es por ello que se emplea el grafito, donde los picos asociados al carbono no ofrecen problemas de enmascaramiento y el coste es mucho menor.

Antes de realizar el recubrimiento se fotografía la muestra con el microscopio óptico de manera que se puedan comparar las imágenes con las del sistema óptico.

4.4.2. Metodología del Análisis.

Una vez preparada la muestra se introduce en el microscopio para proceder a su visualización, el trabajo se realiza en las siguientes etapas:

- Visualización global de la muestra, utilizando electrones retro-dispersados para localizar las partículas metálicas.
- Se puede pasar a más aumentos para localizar un área con un grupo de partículas para poder así aplicar el análisis espectrométrico del área y disponer de este modo de una estimación de los metales presentes en el aceite. Este proceso es más utilizado en el análisis de membranas, donde se diferencian con total claridad los diferentes metales que han quedado depositados sobre la membrana.
- Ampliación de la imagen hasta visualizar la partícula para posteriormente estudiar su composición mediante rayos X. Se realiza la toma de imágenes y se les asocia al análisis químico.

4.5. Valoración de las Muestras.

4.5.1. Análisis Sistemático.

La determinación exhaustiva de las partículas presentes en la muestra requiere de un largo tiempo de observación ^[12,13,14], siendo un trabajo largo y

tedioso, por ello se ha optado por proponer un método simplificado que obtiene conclusiones similares pero empleando un tiempo sensiblemente inferior.

El método se describirá para cada uno de los tipos de partículas evaluados, se debe reseñar que el método de análisis aquí descrito es mucho más fácil de aplicar en la práctica, ya que en las muestras reales estudiadas no existen tantos tipos de partículas de manera simultánea, apareciendo solamente dos o tres de los grupos descritos; mientras que el resto de tipos no se encuentran presentes en la muestra.

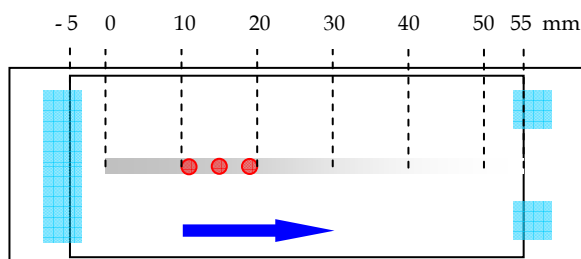


Figura 4.7. Área estudiada para la determinación de desgaste normal ferroso.

4.5.2. Criterios de Valoración.

4.5.2.1. Fricción Normal (Ferrosas).

Las partículas de fricción normal tienen tamaños por debajo de los 15 micrómetros, se realiza un estudio del ferrograma a partir de los primeros 10 mm, ya que antes se sedimentan partículas de mayor tamaño, esta área queda analizada con el estudio de 3 campos del microscopio a 100 aumentos, equivalentes a 6 milímetros de ferrograma. En la figura 4.7 se representa el ferrograma y la localización de los campos observados. Los criterios para evaluar la concentración relativa de partículas son los siguientes:

- **Bajo:** menos de 5 alineaciones por campo, no superan los 2 milímetros de longitud transversal, menos del 25% de superficie cubierta por partículas.
- **Medio:** entre 5 y 10 alineaciones por campo, entre el 25% y el 50% de la superficie de vidrio está cubierta por los metales. Algunas alineaciones superan los 2 milímetros de longitud transversal.
- **Alto:** más de 10 alineaciones por campo, la mayoría superando los 2 milímetros de longitud transversal y cubriendo más del 50% de la superficie del campo.

4.5.2.2. Fricción Normal (No ferrosas).

Para este tipo de partículas, el estudio requiere un análisis a 500 aumentos, ya que las partículas no ferrosas tienen un tamaño inferior a los 15 micrómetros y se distribuyen de manera homogénea sobre toda la membrana polimérica, siendo necesario un estudio de 9 campos, seleccionados tal y como muestra la figura 4.8.

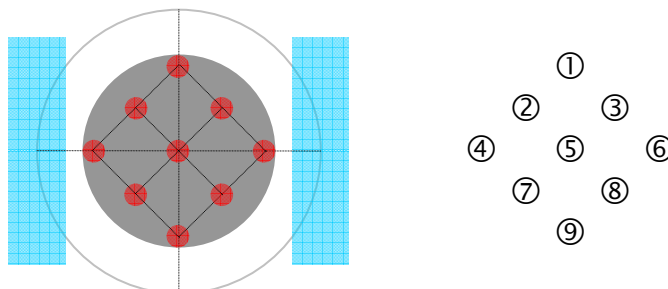


Figura 4.8. Áreas estudiadas para la determinación de desgaste sobre la membrana.

El aspecto de cada uno de los 9 campos se comparará con tres patrones de partículas (fig. 4.9) ya fijados y se asignará el contenido de metales según su semejanza con alguno de los tres patrones.

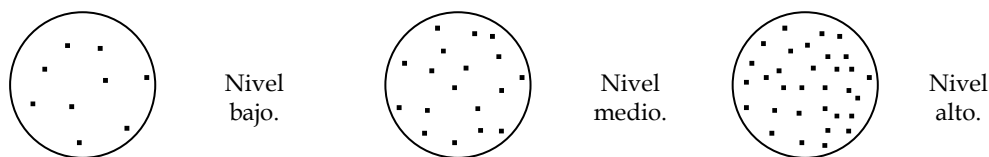


Figura 4.9. Patrones de valoración para el desgaste por fricción normal no ferrosa.

4.5.2.3. Partículas de deslizamiento, fragmentos, laminares de fatiga, óxidos oscuros, partículas de corte y esferas (Ferrosas).

Estos cuatro tipos de partículas se pueden estudiar de manera conjunta, ya que presentan características similares de retención por el campo magnético. Para su visualización se emplea el objetivo de 100 aumentos, centrándose en los primeros 5 campos (de 0 a 10 milímetros), donde quedan retenidas las partículas de estos tipos de tamaños superiores a los 15 micrómetros (ver figura 4.10).

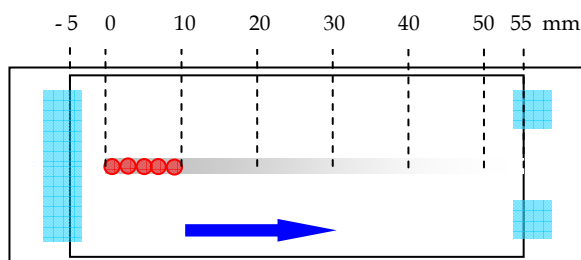


Figura 4.10. Área estudiada para la determinación de desgaste ferroso.

Para la evaluación de concentraciones relativas para cada uno de los tipos de partículas se emplean los siguientes criterios de valores para los 5 campos estudiados:

- Bajo: menos de 10 partículas en total.
- Medio: entre 10 y 20 partículas en total.
- Alto: más de 20 en total.

4.5.2.4. Partículas de deslizamiento, fragmentos y partículas laminares de fatiga y partículas de corte (No ferrosas).

Para el caso de partículas no ferrosas el estudio se deberá realizar sobre la membrana polimérica, realizando un estudio a 100 aumentos de 9 campos situados en la membrana (fig. 4.8). En la evaluación de concentraciones relativas se emplean los siguientes criterios de valores medios:

- Bajo: menos de 3 partículas por campo (< 27 en el total de los campos)
- Medio: entre 3 y 6 partículas en total.
- Alto: más de 6 partículas en total.

4.5.2.5. Desgaste corrosivo.

Son partículas ferrosas de tamaños inferiores a una micra, se observan tres campos situados en la zona final del ferrograma, tal y como muestra la figura 4.11. Para evaluar la presencia de estas partículas se emplea el objetivo de 100 aumentos, ya que pese a que cada partícula es de un tamaño inferior a un micrómetro, éstas forman agrupaciones visibles a menos aumentos.

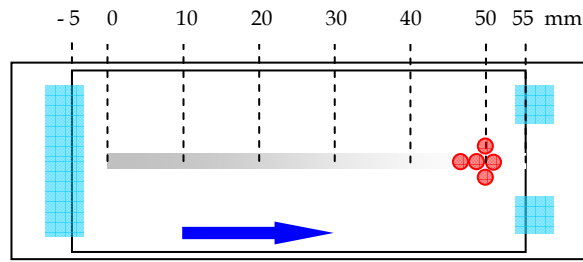


Figura 4.11. Área estudiada para la determinación de desgaste corrosivo.

- Bajo. Se detectan pequeñas alineaciones en la parte final, las alineaciones no llegan a los 20 micrómetros de espesor.
- Medio. Alineaciones por encima de los 20 micrómetros de espesor.
- Alto. Prácticamente no se distinguen las separaciones entre las alineaciones, apareciendo solamente un *manto* de partículas.

4.5.2.6. Óxidos Rojos, Polímeros de fricción, polvo mineral, fibras y otros contaminantes.

Se realiza un análisis de las partículas retenidas sobre el cubreobjetos de vidrio, estudiando 5 campos no consecutivos (fig. 4.12) a lo largo de todo el ferrograma ya que los óxidos rojos no tienen una elevada tendencia a ser retenidos por el campo magnético y suelen quedar depositados a lo largo de todo el ferrograma. La luz polarizada permite distinguir con claridad estas partículas.

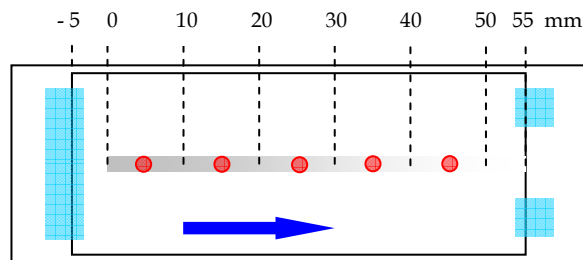


Figura 4.12. Áreas estudiadas para la determinación de óxidos, polímeros y polvo.

- Bajo. Menos de 30 partículas en total.
- Medio: entre 30 y 60 partículas.
- Alto: superior a 60 partículas.

Aunque la determinación de la contaminación de polvo y fibras se realiza sobre la membrana polimérica, es recomendable que cuando se realice el análisis de óxidos rojos con luz polarizada se preste atención a la presencia de estas partículas sobre el vidrio, ya que son fácilmente detectables al mostrar brillos blanquecinos sobre el fondo negro. No siempre son retenidas sobre el vidrio, pero cuando así ocurre suelen depositarse en los últimos tramos del ferrograma, próximos a la salida.

El estudio de los polímeros de fricción, polvo mineral, fibras y demás contaminantes se realiza sobre la membrana polimérica, analizando los 9 campos descritos en la figura 4.8 y evaluando en función del número de partículas detectadas el grado de contaminación de la muestra. Los valores estimativos de concentración para estos contaminantes son:

- Bajo. menos de 20 partículas en total.
- Medio: entre 20 y 60 partículas.
- Alto: superior a 60 partículas.

4.5.3. Realización del Informe de Evaluación.

Una vez que se ha realizado el análisis de cada una de las muestras se deben de realizar un informe ^[15,16] de los resultados obtenidos para posteriormente emitir un diagnóstico. Este informe recoge los diferentes tipos de partículas clasificados por tamaños y la concentración relativa de las mismas, en la tabla 4.3 se comentan los tipos de desgaste, las partículas evaluadas y la importancia dada a cada una de ellas asignándole un valor numérico (denominado peso relativo) comprendido entre 1 y 3. Para cada uno de los tamaños de deberá indicar la concentración relativa de cada una de las categorías anteriores, para ello también se han fijado cuatro niveles: nulo, bajo, medio y alto, con unos pesos relativos respectivamente de 0, 1, 2 y 3.

	Rango de Tamaños [μm]	Peso relativo		Rango de Tamaños [μm]	Peso relativo
Desgaste adhesivo ⁽¹⁾			Óxidos		
Fricción normal	1 ÷ 15	2	Corrosión química	< 1	2
Deslizamiento	> 15 y < 50	1	Óxidos Alfa	> 15 y < 50	1
Deslizamiento	\geq 50 y < 100	2	Óxidos Alfa	\geq 50 y < 100	2
Deslizamiento	> 100	3	Óxidos Alfa	> 100	3
Desgaste por fatiga ⁽¹⁾			Óxidos Oscuros	> 15 y < 50	1
Fragmentos	> 15 y < 50	1	Óxidos Oscuros	\geq 50 y < 100	2
Fragmentos	\geq 50 y < 100	2	Óxidos Oscuros	> 100	3
Fragmentos	> 100	3	Contaminantes		
Laminares	> 15 y < 50	1	Pol. de Fricción	> 5 y < 50	1
Laminares	\geq 50 y < 100	2	Pol. de Fricción	\geq 50 y < 100	2
Laminares	> 100	3	Pol. de Fricción	> 100	3
Esferas. ⁽²⁾	> 1 y < 15	1	Polvo mineral	> 5 y < 30	1
Esferas. ⁽²⁾	\geq 15 y < 50	2	Polvo mineral	\geq 30 y < 50	2
Esferas. ⁽²⁾	> 50	3	Polvo mineral	> 50	3
Desgaste abrasivo ⁽¹⁾			Fibras	> 5 y < 30	1
Entre 2 cuerpos	> 15 y < 50	1	Fibras	\geq 50 y < 100	2
Entre 2 cuerpos	\geq 50 y < 100	2	Fibras	> 100	3
Entre 2 cuerpos	> 100	3			
Entre 3 cuerpos	> 5 y < 15	1			
Entre 3 cuerpos	\geq 15 y < 50	2			
Entre 3 cuerpos	> 50	3			

(1) Se cuantificarán las partículas ferrosas y las no ferrosas en dos grupos independientes.

(2) Solamente se cuantifican las esferas ferrosas.

Tabla 4.3. Tipos de partículas analizadas en el proceso.

En último lugar se obtiene para los cinco principales grupos de partículas un valor numérico donde se evalúa la importancia del desgaste o contaminación sufrida por la máquina. Estos valores se calculan sumando el producto del

parámetro peso por la concentración, posteriormente este valor se compara con unos límites establecidos (tabla 4.4).

Valoración	Rango de evaluación	Código de color
Normal	$< 3 * (C_1 * C_2 * C_3)$	Verde
Alerta	$\geq 3 * (C_1 * C_2 * C_3)$ y $< 5 * (C_1 * C_2 * C_3)$	Naranja
Alarma	$\geq 5 * (C_1 * C_2 * C_3)$	Rojo

Tabla 4.4. Límites para la evaluación del estado del motor.

Los límites iniciales son modificados al ser multiplicados por otros factores adimensionales que dependen del tipo de máquina, de la forma de trabajo de la instalación y del grado de contaminación del ambiente que la rodea. En la tabla 4.5 se detallan dichos parámetros así como el valor asignado.

Tipo de máquina (coeficiente C1)		Tipo de entorno de trabajo (coeficiente C2)		Carga de trabajo de la máquina (coeficiente C3)	
MCIA	1,0	Ambiente normal	1,0	Uso normal, donde el equipo es sometido a cargas de trabajo similares a las de diseño.	1,0
Hidráulicos	1,0				
Turbinas	1,0				
Transmisiones	1,25	Ambiente sucio (canteras, minas, cementeras, obras públicas)	1,25	Uso en solicitaciones extremas por encima de la carga normal de diseño del equipo.	1,25
Reductores	1,25				

Tabla 4.5. Parámetros de corrección de los límites.

Una vez que han sido evaluados todos los tipos de partículas se construye una tabla de resultados similar al ejemplo mostrado en la figura 4.5, donde además se adjuntan imágenes de las partículas más significativas localizadas en el aceite.

Capítulo 4. Revisión de la Ferrografía Analítica.

Cliente: D			Código muestra:		
Equipo: D			M-109 XX52245		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite:			
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N	D			

		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		Fricción normal.		1 + 15	Medio	Rojos (humedad)	
		Fricción deslizante.		3 + 15	Medio	20 + 50	Bajo
				15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo
				50 + 100	Nulo	> 100	Nulo
				> 100	Nulo	20 + 50	Nulo
				> 100	Nulo	50 + 100	Nulo
				> 100	Nulo	> 100	Nulo
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Contaminantes.	
		Laminares.		15 + 50	Nulo	Polímeros de fricción.	
		Fragmentos.		50 + 100	Nulo	20 + 50	Bajo
		Esferas.		15 + 50	Nulo	50 + 100	Bajo
				50 + 100	Nulo	> 100	Nulo
				1 + 15	Nulo	20 + 50	Medio
				15 + 50	Nulo	50 + 100	Medio
				> 50	Nulo	> 100	Medio
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Fibras.	
		Entre dos cuerpos.		15 + 50	Nulo	20 + 50	Nulo
		Entre tres cuerpos.		50 + 100	Nulo	50 + 100	Bajo
				15 + 50	Nulo	> 100	Bajo
				50 + 100	Nulo		
				> 100	Nulo		

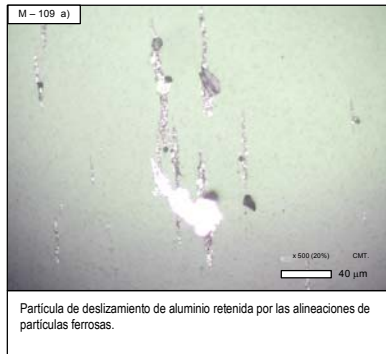


Figura 4.13. Ejemplo de hoja de resultados.

4.6. Análisis Informático de Imágenes.

En el presente apartado se describirá el proceso seguido para realizar un estudio en profundidad de las imágenes tomadas con el microscopio, de manera que un sistema informático [17] es capaz de analizarlas y evaluar la cantidad de partículas que hay presentes en la muestra así como determinar a qué tipos de desgaste básicos corresponden [18,19].

4.6.1. Adquisición.

Las imágenes pueden ser tomadas tanto con microscopía óptica como con electrónica, por tanto se han de diferenciar las micrografías realizadas mediante ambos métodos:

- **Microscopía óptica:** la definición de las imágenes es de 2.048x1.536 píxeles y son tomadas con una cámara digital ^(k) acoplada al propio microscopio. Las micrografías se realizan solamente con luz transmitida, de modo que las partículas se presentan de color negro sobre un fondo blanco-amarillo.
- **Microscopía electrónica:** las imágenes de una calidad de 512x368 píxeles son adquiridas directamente por el SEM, estas imágenes son en escalas de grises.

Se suele trabajar con 200 aumentos en ambos métodos ya que es un rango de aumentos que permite visualizar una superficie considerable de muestra y las partículas tienen una definición adecuada para ser analizadas morfológicamente.

4.6.2. Tratamiento.

El análisis de imágenes empleando herramientas informáticas es una técnica que viene siendo aplicado desde hace unas décadas en múltiples áreas de investigación como son la biología celular, metalografía o la agronomía; existiendo diferentes programas comerciales para su empleo.

Para la realización de la presente tesis doctoral se ha seleccionado el software de análisis Scion Image[®] 4.0.2 de la empresa Scion Corporation. Es un programa con una considerable potencia de cálculo en la identificación de regiones dentro de una imagen, además permite la creación de *macros* en lenguaje Pascal que ofrecen la posibilidad de automatizar el proceso de análisis además de la realización de cálculos con los datos obtenidos en el propio proceso.

El procedimiento de análisis se puede dividir en las siguientes etapas:

1. Si la imagen ha sido tomada con el microscopio óptico se deberá realizar una conversión de formato de imagen, ya que la cámara fotográfica

^k Cámara digital marca Olympus modelo 3030.

digital almacena las imágenes en el formato *.jpg*^l y el programa Scion trabaja con ficheros de extensión *.tif*^m. La conversión de *.jpg* a *.tif* se realiza mediante el software comercial Paint Shop Pro[®] 5.0 de Jasc Software. Además, para evitar las sombras en los bordes de la micrografía, se recorta la imagen original a un tamaño de 1.000 x 1.000 píxeles tal como viene representado en la figura 4.14. El cuadrado de selección se sitúa en el centro de la imagen original obteniéndose así una micrografía de menor tamaño pero de igual calidad de imagen y más homogénea al eliminarse las áreas con sombras.

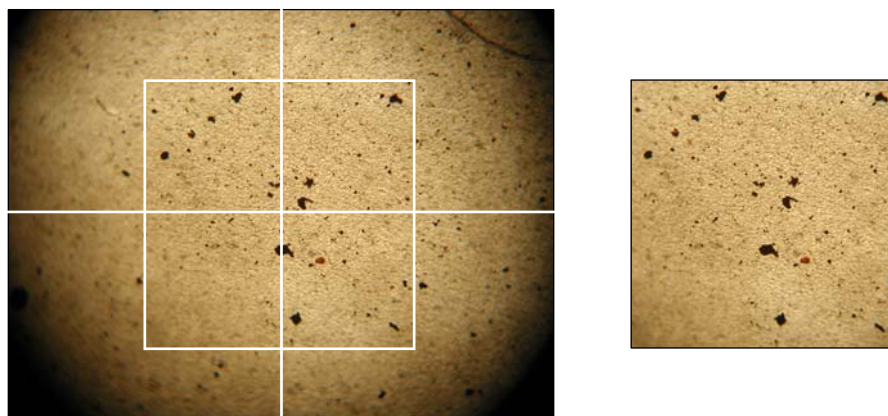


Figura 4.14. Micrografía recortada para el análisis.

2. Una vez se ha guardado la imagen recortada, el resto de modificaciones se realizan directamente con el programa Scion. En primer lugar se toma la imagen color y se transforma a escala de grises (0-255).
3. Selección de un *umbral de corte* ⁽ⁿ⁾ de la imagen, de manera que se colorean de blanco todos los píxeles por debajo del umbral seleccionado y de negro todos los píxeles de tono iguales o superiores a dicho tono de gris. El objetivo de este proceso es eliminar las interferencias debidas a la
4. Binarizado de la imagen anteriormente tratada, de este modo la fotografía inicial procedente del microscopio queda simplificada en un fondo blanco (ceros) y las partículas en negro (unos). Esta operación de binarizado no genera modificaciones en la imagen pero se debe realizar para que el programa realice el reconocimiento de formas correctamente.

^l Extensión de los ficheros gráficos del tipo *Joint Picture Expert Group*.

^m Extensión de los ficheros gráficos del tipo *Tagged Image File Format*.

ⁿ En inglés: *threshold*.

5. Análisis de partículas, donde el programa Scion realiza un recuento de todas las partículas existentes en la micrografía, dando información detallada sobre cerca de una veintena de propiedades de cada una de las partículas.

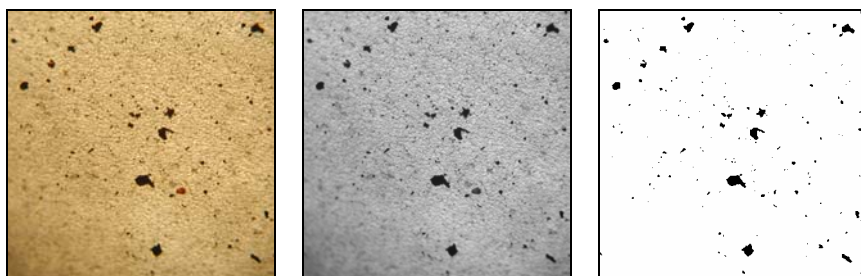


Figura 4.15. Imagen recortada (izquierda), convertida a escala de grises (centro) y después de haber sido definido un umbral (derecha).

4.6.3. Evaluación.

El software realiza el proceso de recuento de manera totalmente automática y además permite ser programado de manera que se pueda caracterizar la morfología de cada una de las partículas para realizar su posterior clasificación en tipos de desgaste [20]. Los parámetros evaluados de manera directa por el ordenador y que son empleados en cálculos posteriores son los siguientes:

- **Área de la partícula:** para cada una de las partículas aisladas por el programa se muestra la superficie en píxeles de la misma.
- **Densidad media:** expresa la suma del nivel de gris de cada uno de los píxeles de la partícula dividido entre el número de píxeles totales. Dado que el análisis se realiza en una escala de 256 niveles de grises (0 para el blanco y 255 para el negro), las partículas totalmente opacas presentarán valores de densidad iguales a 255, partículas con huecos internos como óxidos, el polvo mineral o las fibras tendrán densidades medias por debajo de 255.
- **Perímetro:** longitud del contorno de la partícula expresado en píxeles.
- **Ejes mayor y menor:** el programa realiza un ajuste de la morfología de la partícula a una elipse, las dimensiones de los ejes de dicha elipse equivalente vienen expresados en píxeles.

El programa informático dispone de una herramienta de escalado de la imagen de modo que si se conoce la equivalencia entre los píxeles y la distancia

real, cada uno de los parámetros anteriormente comentados son expresados automáticamente en micrómetros.

A partir de estos valores es posible determinar otros dos parámetros adimensionales: la esfericidad y la regularidad. La *esfericidad*, ϕ , definida según la ecuación 4.1 es un parámetro adimensional que determina si la partícula tiene una forma equiaxial a partir de la longitud de los ejes mayor, E, y menor, e; a los que se ha ajustado mediante el programa. Por ejemplo, una esfera tendría un valor máximo de esfericidad, igual a la unidad, mientras que una fibra tendría una esfericidad muy baja debido a que una dimensión (el largo) predominaría sobre la otra.

$$\Phi = \frac{e}{E} \quad (\text{ec. 4.1})$$

Dado que hay partículas que pueden tener una forma equiaxial pero sin embargo ser muy irregulares en su contorno, se ha definido un segundo parámetro también adimensional denominado *regularidad*, Γ , definido según la ecuación 4.2 y que compara el perímetro de un círculo de la misma área que la partícula analizada con el perímetro real de la partícula; de este modo, partículas con un contorno con numerosos entrantes y salientes tendrán un coeficiente de regularidad muy bajo mientras que cuerpos con perímetros homogéneos tendrían coeficientes próximos a la unidad.

$$\Gamma = \frac{P_{\text{equivalent}}}{P_{\text{real}}} \quad (\text{ec. 4.2})$$

Una vez calculadas estas variables para cada partícula, y en función de sus valores, es posible clasificarla dentro de los principales tipos de desgaste, tal y como muestra la tabla 4.6.

Tipo	Esfericidad	Regularidad	Densidad
Fragmentos de fatiga	0,80 ÷ 0,95	0,90	> 254,5
Esferas	> 0,95	> 0,90	> 254,5
Laminares	0,70 ÷ 0,95	< 0,70	175 ÷ 253
Óxidos	0,80 ÷ 0,95	> 0,90	< 175
Partículas de deslizamiento	0,40 ÷ 0,70	> 0,90	> 253
Partículas de corte	< 0,40	< 0,70	> 253
Fibras	< 0,40	> 0,90	< 175

Tabla 4.6. Valores de los parámetros para clasificar cada tipo de partículas.

En el Anexo B se muestran ejemplos de cálculos de superficies para diferentes morfologías de partículas y se comparan los resultados obtenidos. El código fuente total en lenguaje Pascal viene comentado en el mismo anexo.

4.6.4. Limitaciones de la Técnica.

El recuento de partículas mediante las herramientas informáticas permite realizar de manera prácticamente instantánea una multitud de cálculos, no obstante, se comentan las principales limitaciones detectadas durante el trabajo de validación experimental:

- a) En el proceso de eliminación del fondo de la micrografía para seleccionar solamente las partículas, se suele producir una pérdida de información referente a la forma real de la partícula, ya que se suprimen algunos de los píxeles del contorno al ser confundidos con la membrana. Se puede mitigar este problema empleando luz transmitida blanca y eliminando la fuente de luz reflejada, de manera que el contorno aparece con un alto contraste y muy definido, reduciéndose los píxeles mal evaluados.
- b) Durante el filtrado de aceites que se encuentran muy contaminados se ha comprobado que es habitual que varias partículas queden próximas o parcialmente superpuestas, de modo que el sistema automático de detección las considera como si fueran un mismo cuerpo, cometiendo por tanto errores en el proceso de análisis de los datos. Se pueden evitar las

superposiciones empleando un menor volumen de muestra de manera que se disminuya la probabilidad de que dos partículas estén muy próximas.

- c) El programa informático sólo reconoce las partículas opacas, mientras que las partículas traslúcidas como polímeros de fricción y polvo mineral no pueden ser cuantificadas con este método automático. Este problema es de difícil resolución, ya que para que fuera posible el reconocimiento de estas partículas se debería aumentar mucho la sensibilidad en la detección y cualquier irregularidad en la membrana también sería considerada como una partícula.

4.7. Referencias Bibliográficas.

- 1 Varios Autores. *Méthodes Rapides d'Analyse des Huilles Usagées*. Technip. 1971.
- 2 Anderson, D. P. *Wear Particle Atlas (revised)*. Predict technologies. 1991.
- 3 ASM Handbook. Volume 18. *Friction, Lubrication and Wear Technology*. ASM International. 1992.
- 4 Hunt, T. M. *Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids*. Elsevier. 1992..
- 5 Fodor, J.; Noeh, G. *Ferrography in Internal Combustion Engine Economy*. *Wear* 90 (pp 293-296). 1983.
- 6 Jones, M. H. *Ferrography Applied to Diesel Engine Oil Analysis*. *Wear*, Vol 56, Issue 1 (pp 93-103) 1979.
- 7 Scott, D.; Westcott V. C. *Predictive Maintenance by Ferrography*. *Wear*, Vol 44, Issue 1 (pp 173-182) 1977.
- 8 Suzuki, M.; Hosoya, T.; Nakamura, K.; Sone, Y. *Trouble Diagnosis of diesel Engine through Analysis of Wear Particles in Oil*. *Japanese Railway Engineering*, No. 132 (pp. 37-40). 1995.
- 9 Myshkin, N. K.; Kong, H.; Grigoriev, A. Ya.; Yoon, E.-S. *The Use of Colour in Wear Debris Analysis*. *Wear* 251 (pp. 1218-1226). 2001.
- 10 Myshkin, N. K.; Markova, L. V.; Semenyuk, M. S.; Kong, H.; Han, H.-G.; Yoon, E.-S. *Wear Monitoring Based on the Analysis of Lubricant Contamination by Optical Ferroanalyzer*. *Wear* 255 (pp. 1270-1275). 2003.
- 11 Roylance, B. J.; Hunt, T. M. *Wear Debris Analysis*. Coxmoor Publishing Company. 1999.
- 12 Yang, M. *Application of Ferrography in Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Automobile Mechanical Elements* SAE Technical Paper Series No. 881192. 1988.
- 13 Johnson, J. H.; Hubert, C. J. *An Overview of Recent Advances in Quantitative Ferrography as Applied To Diesel Engines*. *Wear* 90 (pp 199-219). 1983.
- 14 Verdegan, B. M.; Thibodeau, L.; Fallon, S. L. *Lubricating Oil Condition Monitoring Through Particle Size Analysis*. SAE Technical Paper Series No. 881824. 1988.
- 15 Hudnik, V.; Vizintin, J. *Key Parameters for the Reliable Prediction of Machine Failure Using Wear Particle Analysis*. *Tribology International*, Vol. 24, No.2 (pp 95-98). 1991.
- 16 Pocock, G.; Courtney, S. J. *Some Quantitative Aspects of Ferrography*. *Wear* 67 (pp. 287-301). 1981.
- 17 Stachowiack, G. W; Kirk, T. B.; Stachowiack, G. B. *Ferrography and Fractal Analysis of Contamination Particles in Unused Lubricating Oils*. *Tribology International*, Vol. 24, No.6 (pp 329-334). 1991.
- 18 Kirk, T. B.; Stachowiak, G. W. *Fractal Characterization of Wear Particles from Synovial Joints*. *Journal of Computer Assisted Microscopy*, Vol. 3, No. 4. (pp 157-170). 1991.
- 19 Dumitras, A.; Jerbi, A.; Kossentini, F.; Liew, D. *A Z-shape Nonlinear Transform for Image Segmentation and Classification in Intelligent Debris Anlysis*. IEEE 1998.
- 20 Peng, Z.; Kirk, T. B. *Wear Particle Classification in a Fuzzy Grey System*. *Wear* 225-229 (pp 1238-1274). 1999.

CAPÍTULO 5.

REVISIÓN DE LA ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN DE PLASMA.

Índice

5.1. Introducción.	105.
5.2. Descripción del Espectrómetro.	105.
5.3. Métodos de Preparación Previa de las Muestras.	111.
5.4. Descripción de los Ensayos Realizados.	112.
5.5. Referencias Bibliográficas.	122.

5.1. Introducción.

El presente capítulo describe el funcionamiento del espectrómetro de emisión de plasma, denominado por sus siglas en inglés ICP-OES ^(a) o simplemente ICP, así como los diferentes métodos de preparación previa de la muestra aplicables en la determinación de metales en aceites lubricantes usados.

En la segunda parte del capítulo se describe el proceso experimental seleccionado para la determinación del total de metales existentes en el aceite, trabajando con fases acuosas, comentándose en último lugar los resultados obtenidos.

5.2. Descripción del Espectrómetro de Emisión de Plasma.

El espectrómetro de emisión de plasma, es un equipo de análisis que creado a principios de 1970, ^[1,2,3,4] básicamente se puede definir como un sistema de análisis elemental por espectrometría con un plasma como fuente de excitación, constituido por los siguientes elementos:

- Sistema de alimentación de gas.
- Generador eléctrico.
- Plasma.
- Sistema de introducción de muestra.
- Sistema óptico.
- Sistema de tratamiento de señal.

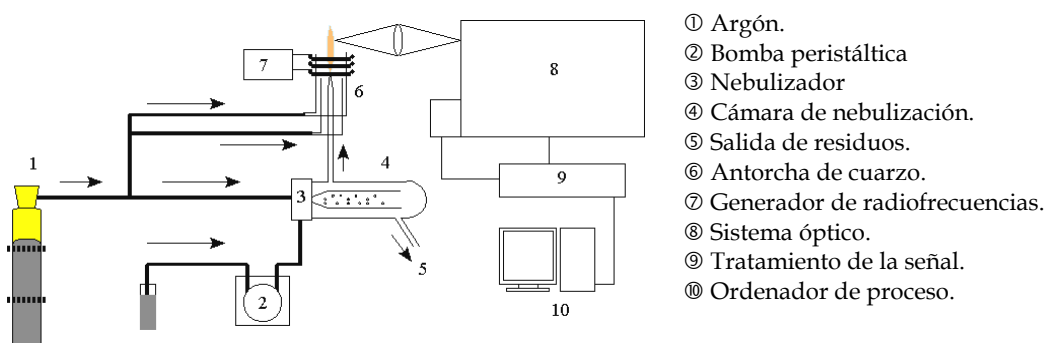


Figura 5.1. Esquema de un equipo ICP-OES.

^a Siglas del inglés *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry* (espectrometría de emisión óptica de plasma de acoplamiento inducido).

5.2.1. Sistema de Alimentación de Gas.

El gas empleado en el espectrómetro es el argón, ya que su elevado potencial de ionización (15,7 eV) permite disponer de suficiente energía para excitar las líneas más sensibles de la gran mayoría de elementos químicos. El sistema de gas cumple tres funciones fundamentales:

- Aporte de muestra en el proceso de nebulización.
- Generación del plasma.
- Refrigeración de las paredes de la antorcha.

La antorcha realizada en cristal de cuarzo es el lugar físico sobre el que se genera el plasma, está formada por tres tubos concéntricos; el tubo interno inyecta la muestra directamente hacia el plasma, el intermedio se encarga de aportar el argón necesario para la formación del plasma y por el conducto más externo circula el argón empleado como refrigeración de la antorcha.

5.2.2. Generador de Radiofrecuencias.

El generador aplica la energía necesaria para sustentar y confinar el plasma. La frecuencia de oscilación puede ser fija (osciladores con cristales piezoeléctricos) o variable en función de las condiciones de impedancia del plasma (osciladores libres); los osciladores libres son los instalados en los nuevos equipos dado que son más compactos, económicos y que permiten adaptarse a variaciones en el plasma. Se ha comprobado ^[5] que la frecuencia influye directamente en la forma adoptada por el plasma, siendo preferibles frecuencias por encima de los 25 MHz ya que tal y como muestra la figura 5.2 el plasma adopta una configuración toroidal que facilita la penetración del aerosol en el seno de la *llama*, las frecuencias de los equipos comerciales son de 27,12 MHz mientras que en aparatos más modernos se llega hasta los 40,68 MHz.

La potencia para el análisis de matrices orgánicas debe ser superior a los 2.000 W mientras que para matrices inorgánicas se requieren potencias inferiores, alrededor de los 1.500 W.

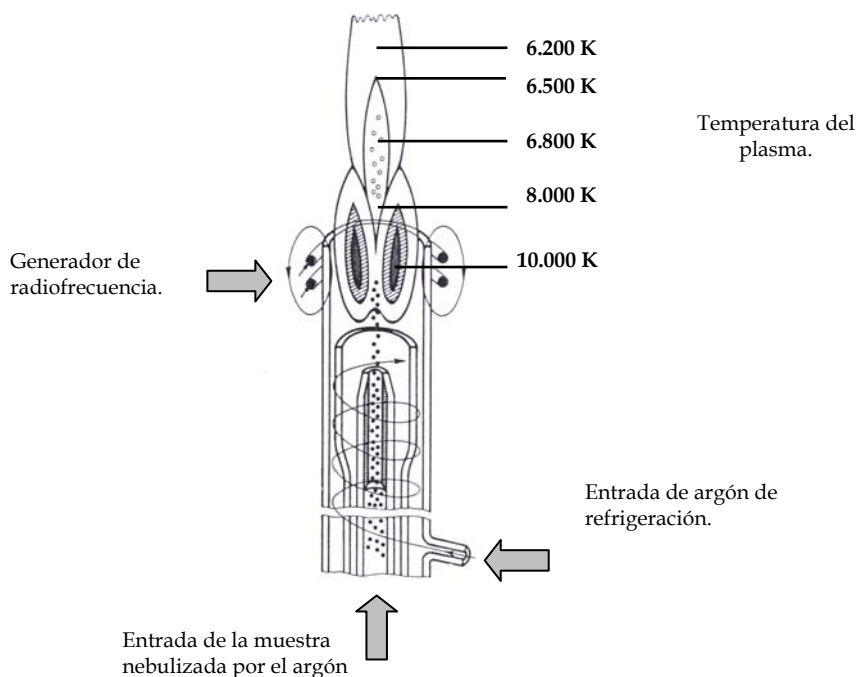


Figura 5.2. Detalle la antorcha y la forma del plasma..

5.2.3. El Plasma.

El plasma se obtiene por la acción de una corriente de alta frecuencia que genera un campo magnético oscilante hasta el que se lleva el gas argón que va a sustentar el plasma. Este campo magnético provoca la aparición de iones y electrones que se mueven siguiendo trayectorias anulares, acelerados por efecto de la alternancia de los campos magnéticos, produciéndose por el efecto Joule una liberación de energía calorífica que permite alcanzar temperaturas de hasta 10.000 K. El plasma que ha adoptado una configuración toroidal queda confinado en el campo magnético generando una fuerte intensidad luminosa radiante denominada comúnmente *llama*.

La muestra llega nebulizada junto con el argón en forma de finísimas gotas y al ascender por la antorcha es secada, evaporada y finalmente cada átomo pierde uno o más electrones al entrar en la zona de máxima temperatura del plasma. Al salir de esa zona los electrones vuelven a su estado original y emiten fotones de luz. Cada fotón tiene asociada una longitud de onda específica para cada elemento químico y salto electrónico producido.

5.2.4. Sistema de Introducción de Muestras.

Una bomba peristáltica introduce la muestra en el nebulizador, la cual empuja la disolución a través de los tubos mediante la presión ejercida por unos rodillos sobre el conducto que contiene el fluido. La muestra nunca entra en contacto con la bomba ya que ésta sólo manipula el exterior de los tubos. El material de los tubos debe ser compatible con los disolventes empleados, se suelen emplear tubos de Tygon para lubricante y disolventes orgánicos no halogenados.

El método más difundido de introducción de muestras al plasma es en forma de solución líquida a través de la nebulización ya que se obtienen resultados más reproducibles, es más fácil disponer de patrones de calibración y las muestras son más homogéneas [2]. Mediante la nebulización se forma un aerosol húmedo, finamente dividido, con un tamaño de partícula homogéneo y lo más reducido posible a fin de facilitar el tránsito de la muestra en el seno del plasma y conseguir una excitación homogénea y reproducible. Este objetivo se consigue mediante dos elementos:

- El nebulizador: transforma la solución líquida en un aerosol obteniéndose mediante un dispositivo neumático que por efecto Ventura aspira el líquido a través de un capilar pulverizándola por el impacto de un gas a presión (argón). En estos capilares tienen lugar problemas por obstrucción con sólidos, se trata de evitar este inconveniente empleando presiones de inyección superiores.
- La cámara de nebulización: tiene como objetivo separar del aerosol las gotas de mayor tamaño a fin de homogeneizar el aporte de muestra al plasma. El diámetro de las gotas que pasan al plasma no superan los 10 micrómetros de diámetro, del total de muestra que atraviesa el nebulizador solamente de un 1 a un 5% pasa al plasma, el resto de gotas son desechadas como residuo.

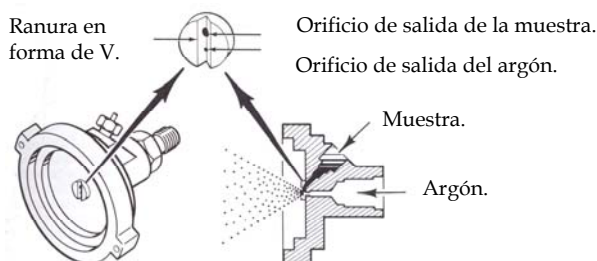


Figura 5.3. Detalle de un nebulizador en "V".

5.2.5. Sistema Óptico.

Los átomos de la muestra absorben energía en plasma pasando a un estado excitado desde el que vuelven a su estado fundamental, liberando dicha energía en forma de radiaciones electromagnéticas características de cada elemento presente. Por tanto tendremos desde el plasma una radiación luminosa policromática representativa de todos los elementos existentes en la muestra.

Para identificar y medir la presencia de estos elementos en la muestra se hace necesario un sistema que separe el haz policromático en las diferentes longitudes de onda que lo componen. Los elementos fundamentales de estos sistemas ópticos empleados en espectroscopia son los siguientes:

1. La rendija de entrada a través de la cual se introduce la radiación policromática al sistema.
2. La red de difracción que separa las radiaciones monocromáticas en función de sus longitudes de onda.
3. La rendija secundaria, a través de la cual se conducen las radiaciones monocromáticas al detector.

La red de difracción consiste en una superficie metálica pulida sobre la que se han mecanizado unos surcos paralelos (del orden de 2.000 líneas por milímetro) es el elemento más importante del sistema óptico.

5.2.6. Sistema de Detección y Tratamiento de la Señal.

La radiación monocromática que sale a través de las rendijas de salida (simultáneos) o en la única rendija de salida (secuenciales) es recogida por un tubo fotomultiplicador (fototubo) que transforma la señal óptica en impulsos eléctricos que son convenientemente amplificados y tratados para su identificación y cuantificación.

El sistema de cuantificación consiste en medir las intensidades de diferentes patrones de concentraciones conocidas para cada elemento a analizar, trazándose rectas de calibración. De este modo, para una muestra de concentración desconocida, basta con medir sus intensidades y mediante su recta de calibración es posible establecer su concentración. Una de las principales ventajas de esta técnica es su linealidad para un amplio rango de concentraciones, siendo posible realizar extrapolaciones para muestras con elevadas concentraciones disponiendo de patrones de concentraciones inferiores.

En los casos donde se requiere analizar elementos que emiten en longitudes de onda bajas, como por ejemplo el azufre (182 nm) o el fósforo (178,3 nm), al ser radiaciones electromagnéticas muy energéticas (ultravioleta lejano) estas radiación es serían absorbidas por el oxígeno o por el vapor de agua atmosférico antes de llegar al fototubo, siendo la señal muy débil. Para evitar estas interferencias se recurre a hacer vacío en todo el tanque óptico.

5.2.7. Modo de Trabajo del Espectrómetro.

El equipo funciona de forma automática, una vez se ha rellenado el muestreador, se van introduciendo las muestras de manera ordenada, empleando aproximadamente un minuto y medio por ensayo, donde se calcula de manera simultánea el contenido en metales del lubricante.

La introducción de muestra se realiza diluyendo el aceite con queroseno, con un ratio de dilución de 1:10, de este modo se evita que la elevada viscosidad del aceite usado afecte al proceso

Los patrones son preparados a partir de disoluciones de todos los metales analizados en fase orgánica, las cuales son preparadas a distintas concentraciones empleando para diluir aceites base típicos, posteriormente estas muestras son analizadas con el equipo, y con las medidas a diferentes concentraciones se traza una recta de calibrado, que será la que emplee el equipo para cuantificar los metales.

Las longitudes de onda para cada metal (tabla 5.1) han sido seleccionadas de manera que no se vean interferidas por las de otros elementos, minimizando el riesgo de solapamiento de picos. La sensibilidad del espectrómetro de plasma es muy superior a la demandada, ya que en el contenido de metales en el lubricante, se suele trabajar a niveles de ppm.

Metal	Longitud de onda (nm)	Límite de detección (ppb)	Metal	Longitud de onda (nm)	Límite de detección (ppb)
Ag	328,068	3,00	Mo	202,030	9,00
Al	396,152	7,50	Na	589,592	4,50
B	249,678	7,50	Ni	231,604	15,00
Ba	233,527	0,15	P	213,618	100,00
Ca	317,933	0,15	Pb	220,353	75,00
Cd	283,563	4,50	Si	251,611	9,00
Cr	283,563	1,80	Sn	189,926	42,00
Cu	324,754	3,00	Ti	334,941	0,75
Fe	259,940	1,40	V	292,402	9,00
Mg	285,213	0,15	Zn	213,856	3,00
Mn	260,569	0,60			

Tabla 5.1. Longitudes de onda y límites de detección para los diferentes metales.

5.3. Métodos de Preparación Previa de las Muestras.

La determinación de metales en aceites lubricantes mediante ICP-OES presenta una serie de dificultades operativas debido a su elevada viscosidad, y limitaciones de detección debido a que no es capaz de cuantificar partículas de tamaños superiores a las 5 micrómetros [6,7]. Es por ello por lo que se suele someter a la muestra a tratamientos que faciliten su posterior análisis.

5.3.1. Mezcla con Disolventes Orgánicos.

Debido a la elevada viscosidad cinemática del aceite lubricante, éste no se introduce directamente al nebulizador ya que daría problemas en el bombeo, pudiendo provocar además una obturación en los conductos. La viscosidad [8,9] se disminuye mezclando previamente el aceite con disolventes orgánicos como el xileno o el queroseno. La relación de dilución se suele situar en 1:10 y se realiza de manera automática, aspirando el aceite con una bomba peristáltica y también aspirando simultáneamente el disolvente, al mezclarse ambos fluidos el resultante es un líquido de viscosidad lo suficientemente baja para que se pueda trasegar sin ningún problema en el espectrómetro.

Este método es el más empleado a nivel industrial en el análisis de aceites lubricantes, obviamente el disolvente no es capaz de atacar las partículas metálicas de mayor tamaño para disolverlas, por tanto no permite una mayor recuperación de metal.

5.3.2. Mineralización.

La mineralización o calcinación consiste en someter al aceite lubricante a altas temperaturas en un horno mufla, de manera que la totalidad de la materia carbonosa de la muestra se carboniza, quedando en el crisol las cenizas y partículas metálicas; este resultante es disuelto mediante la adición de un ácido inorgánico fuerte y posteriormente analizado mediante espectrometría como cualquier disolución acuosa.

5.3.3. Ataque Ácido y Dilución con Compuestos Orgánicos.

Este método [10,11] consiste en hacer reaccionar una determinada cantidad de aceite (entre 1 y 5 gramos) junto a una mezcla de ácidos inorgánicos (HF, HNO₃ o HCl) u orgánicos (ácido acético glacial). El objetivo de este proceso es disolver las partículas metálicas de mayor tamaño. La mezcla resultante se diluye con disolventes orgánicos polares como la MIBK ^(b) o alcohol isopropílico y se introduce al espectrómetro. En estos procesos se suele realizar un aporte adicional de energía mediante microondas, ultrasonidos, presión o calor para facilitar el ataque de los ácidos [12].

^b Siglas en inglés de la Metil-isobutil-cetona (*Methyl-Isobutyl Ketone*).

5.3.4. Empleo de Emulsiones.

Otra técnica empleada por diferentes autores [13,14] es el empleo de emulsiones agua-aceite a través del empleo de tensoactivos y surfactantes como el Nemol a fin de evitar el empleo de disolventes orgánicos. Este método suele requerir de procesos ataque con ácidos para disolver las partículas metálicas grandes (mayores de 5 micrómetros).

5.4. Descripción de los Ensayos Realizados.

5.4.1. Selección del Proceso.

El espectrómetro ICP-OES empleado en los análisis es un equipo de la empresa Spectro Hispania, situado en las instalaciones del Departamento de Química de la Universidad Politécnica de Valencia.

En primer lugar se realizaron análisis con el método de dilución con disolventes orgánicos; obteniéndose unos resultados nada satisfactorios que finalmente hicieron que este proceso fuera descartado, los principales problemas hallados fueron:

- Formación de depósitos de carbonilla en el nebulizador y la antorcha, requiriendo una limpieza frecuente de dichos elementos. Esta continua contaminación del espectrómetro es más grave si se considera que el mismo equipo era empleado en otros trabajos de investigación, trabajando con muestras en fase acuosa.
- Los resultados de las medidas realizadas mostraron una baja sensibilidad al cambio de concentraciones metálicas en el aceite.

Ante estos resultados se optó por enviar las muestras a un laboratorio externo que realizara este tipo de determinaciones y realizar en la Universidad el análisis de la muestra después de ser digerida. El proceso de ataque ácido seleccionado se basa en diferentes artículos que describen técnicas similares, donde se ha optado por un proceso viable con los equipos e instalaciones disponibles.

El proceso seleccionado fue el siguiente:

1. Introducción de 40 ml de agua regia en un tubo digestor de vidrio. El agua regia se ha preparado mezclando 30 ml de ácido clorhídrico (HCl) al 35% de pureza con 10 ml de ácido nítrico (HNO₃) al 60% de pureza. Debido a la inestabilidad del agua regia ésta debe ser preparada inmediatamente antes de la realización del ensayo.
2. Toma de 1 ml de aceite lubricante, de manera que estos ensayos sean comparables con los realizados mediante ferrografía, y donde se emplea un volumen de muestra similar.

3. Toma de 1 gramo de aceite lubricante usado, se trabaja con masa de aceite y no con volúmenes dado que la medida de concentraciones de metales realizada por el laboratorio externo se expresa en gramos de metal por kilogramo de muestra. La masa es calculada por diferencia de pesada de la jeringa empleada para añadir el aceite.
4. Introducción del aceite dentro del tubo del digestor, evitando que el aceite toque las paredes del tubo, de manera que todo el aceite quede flotando sobre el agua regia.
5. Se conectan los condensadores a la boca del tubo para reducir al mínimo la salida de gases en el proceso de digestión.
6. Se comienza a calentar de manera progresiva el digestor hasta alcanzar los 200°C ($\pm 5,0$). La rampa de calentamiento del proceso se muestra en la figura 5.4, siendo la duración total del proceso de 150 minutos.

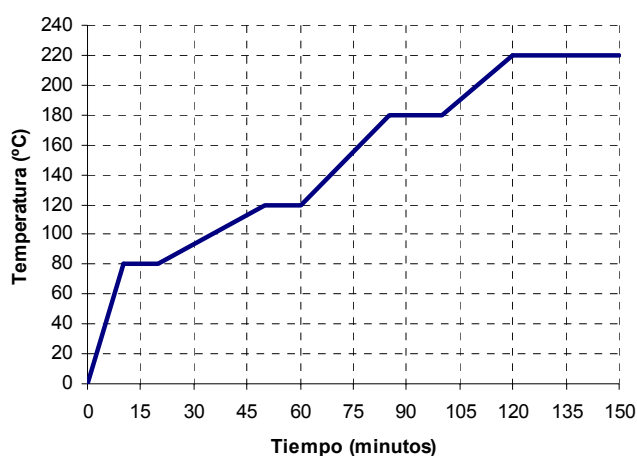


Figura 5.4. Proceso de calentamiento del digestor.

7. Una vez enfriados los tubos digestores, se debe separar decantando la fase orgánica que queda sin ser consumida totalmente por los ácidos, ya que no ha sido posible obtener una eliminación total de dicha fase.
8. La fase acuosa se afora con agua destilada hasta un volumen de 50 ml.
9. Las muestras son analizadas ya directamente por el espectrómetro.

Para comprobar la efectividad del método se han establecido dos procesos diferentes de comprobación: ataque directo del metal y ataque del metal en aceite lubricante nuevo.

5.4.2. Validación. Ataque Directo del Metal.

Se ha procedido a la aplicación del proceso de digestión sobre diferentes composiciones de polvos metálicos con el objetivo de conocer si la totalidad del metal adicionado ha sido disuelto por el agua regia y ha pasado a la fase acuosa. Los cuatro tipos de polvos metálicos analizados son los siguientes:

- **Polvo Fe.** Formado por partículas de hierro metálico.
- **Polvo Al.** Formado por partículas de aluminio metálico.
- **Polvo Cu.** Formado por partículas de cobre metálico.
- **Polvo Inox.** Formado por partículas de acero inoxidable. con un contenido de hierro del 66,8%, de cromo del 17% y de níquel del 13%.

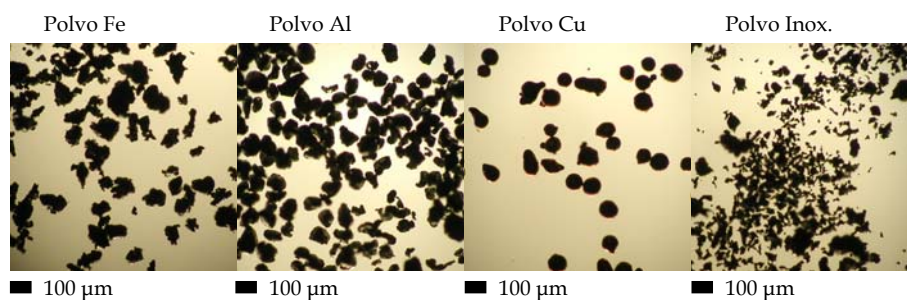


Figura 5.5. Detalle de los diferentes tipos de partículas (x100).

Los diferentes metales proceden de polvos metalúrgicos suministrados por la empresa Höganäs, los cuales han sido sometidos a un tamizado previo con un tamiz de luz de malla de 60 micrómetros, y dada la distribución de tamaños indicada por el fabricante, se garantiza que más del 70% de las partículas se encuentran comprendidas entre los 20 µm y 60 µm de diámetro. Estos mismos polvos metálicos serán empleados en los posteriores procesos de validación.

Los diferentes polvos metálicos son pesados y posteriormente introducidos a los tubos digestores para ser sometidos al proceso descrito en el apartado 5.2.1. Una vez enfriada la solución ácida se afora a 50 ml, con agua destilada y se realiza su análisis con el ICP.

Metal	Metal pesado [mg]	Conc. Teórica [ppm]	Conc. Medida [ppm]	Grado de recuperación
Fe	3,7	74,0	73,3	99,0%
Fe	5,5	110,0	105,7	96,1%
Fe	20,7	414,0	408,6	98,7%
Grado de recuperación medio para el hierro.				97,9 %
Cu	2,2	44,0	43,4	98,7%
Cu	4,4	88,0	86,1	97,8%
Cu	24,6	492,0	476,3	96,8%
Grado de recuperación medio para el cobre.				97,8 %
Al	2,6	52,0	51,7	99,4%
Al	7,7	154,0	149,1	96,8%
Al	24	480,0	468,5	97,6%
Grado de recuperación medio para el aluminio.				97,9 %
Fe _{INOX}	2,604	52,1	55,8	107,2%
Fe _{INOX}	4,809	96,2	101,8	105,8%
Fe _{INOX}	20,769	415,4	438,6	105,6%
Grado de recuperación medio para Fe en acero inoxidable.				106,2 %
Cr _{INOX}	0,663	13,3	13,0	98,0%
Cr _{INOX}	1,224	24,5	24,0	98,1%
Cr _{INOX}	5,278	105,6	103,9	98,4%
Grado de recuperación medio para Cr en acero inoxidable.				98,2 %
Ni _{INOX}	0,507	10,1	10,0	98,7%
Ni _{INOX}	0,936	18,7	18,4	98,5%
Ni _{INOX}	4,043	80,9	80,1	99,0%
Grado de recuperación medio para Ni en acero inoxidable.				98,7 %

Tabla 5.2. Resultados del ataque ácido sobre partículas (en seco).

Para comprobar la eficacia del proceso, se ha establecido un parámetro denominado grado de recuperación (GR), definido matemáticamente por la ecuación 5.1.

$$GR (\%) = \frac{\text{conc. de metal medido}}{\text{conc. de metal real}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

En los resultados mostrados en la tabla 5.2, se observa claramente que el método de digestión propuesto es capaz de disolver la totalidad de los diferentes tipos de metales. El hecho de no obtener grados de recuperación del 100% viene explicado por el hecho de que a la hora de pesar las partículas es posible que las mismas tengan una pequeña cantidad de óxidos.

También se ha observado una recuperación superior al 100% de hierro para el acero inoxidable, este comportamiento vendría dado por ligeras variaciones en la composición con respecto al balance metálico dado por el fabricante, el grado de recuperación de níquel y cromo es muy elevado, lo que indica que el agua regia ha disuelto totalmente las partículas de este acero inoxidable.

5.4.3. Validación. Ataque de metal en aceite nuevo.

En esta segunda fase se toman los metales y se dispersan en un volumen de lubricante de 1 ml. El lubricante nuevo empleado en estos ensayos corresponde a un aceite mineral multigrado (SAE 15W40) para uso en MCI Diesel, viscosidad cinemática a 100°C de 14,5 cSt y de densidad a 15°C de 888 kg/m³.

Los resultados obtenidos en esta serie de ensayos se muestran en la tabla 5.3, se ha observado que el proceso de digestión sigue siendo eficaz, a pesar de la presencia de una matriz orgánica de lubricante rodeando a las partículas y que teóricamente dificulta el contacto entre el ácido y el metal. Se considera que el porcentaje de recuperación ha disminuido debido a esta barrera que ofrece el lubricante y también debido a los procesos de separación entre la fase acuosa y la orgánica, ya que el aceite no se elimina totalmente y quedan restos sobrenadantes que deben ser eliminados para que no provoquen problemas de depósitos en la instalación del ICP.

Metal	Metal pesado [mg]	Conc. Teórica [ppm]	Conc. Medida [ppm]	Grado de recuperación
Fe	9,8	196,0	176,6	90,1 %
Fe	7,5	150,0	138,0	92,0 %
Fe	15,8	316,0	298,6	94,5 %
Grado de recuperación medio para el hierro.				92,2 %
Cu	2,8	56,0	53,0	94,7 %
Cu	1,8	36,0	33,9	94,2 %
Cu	11,3	226,0	199,3	88,2 %
Grado de recuperación medio para el cobre.				92,4 %
Al	10,6	212,0	202,2	95,4 %
Al	4,2	84,0	81,4	96,9 %
Al	32,6	652,0	599,8	92,0 %
Grado de recuperación medio para el aluminio.				94,8 %
Fe _{INOX}	8,548	171,0	158,8	92,9 %
Fe _{INOX}	5,075	101,5	94,1	92,7 %
Fe _{INOX}	14,291	285,8	271,5	95,0 %
Grado de recuperación medio para Fe en acero inoxidable.				93,5 %
Cr _{INOX}	2,176	43,5	40,5	93,1 %
Cr _{INOX}	1,292	25,8	23,8	92,0 %
Cr _{INOX}	3,638	72,8	68,9	94,7 %
Grado de recuperación medio para Cr en acero inoxidable.				93,3 %
Ni _{INOX}	1,664	33,3	30,5	91,5 %
Ni _{INOX}	0,936	18,7	16,9	90,3 %
Ni _{INOX}	4,043	80,9	76,6	94,7 %
Grado de recuperación medio para Ni en acero inoxidable.				92,2 %

Tabla 5.3. Resultados del ataque ácido sobre partículas (en aceite nuevo).

5.4.4. Validación. Ataque del Metal en Aceite Usado.

Durante la tercera fase se procedió a realizar la digestión ácida sobre muestras reales de distintos tipos de lubricantes procedentes de motores Diesel (tabla 5.4). En este caso, la concentración de metales no ha sido aditivada con polvos metálicos, conteniendo el aceite lubricante las partículas metálicas de desgaste generadas durante su funcionamiento normal. Todas las muestras corresponden a aceites extraídos durante los periodos de mantenimiento de cada uno de los motores, excepto la muestra M-00, que corresponde a un motor que ha sufrido un fallo catastrófico por montaje defectuoso de cojinetes.

El grado de recuperación de metal, se ha calculado comparando las medidas obtenidas después del tratamiento de ataque ácido (*columna D*), con las concentraciones de metales proporcionadas por la técnica de espectrometría de emisión de plasma convencional con introducción directa del lubricante (*columna S/D*). No se han evaluado los grados de recuperación para los metales que presentan una concentración por debajo de 1 ppm medida con el método convencional, al ser concentraciones muy bajas y próximas al límite de detección del aparato (la *columna E* define si la determinación ha sido evaluada o no en la comparativa).

	Concentración de metales dada por ICP (ppm)				
	Me.	S/D	E	D.	Recup.
M-1.	Al	2,8	<input checked="" type="checkbox"/>	0,3	9,6 %
	Cu	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	1,2	---
	Fe	14,5	<input checked="" type="checkbox"/>	2,0	12,9 %
	Cr	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	---
	Ni	17,4	<input checked="" type="checkbox"/>	2,0	11,5 %
M-2.	Al	2,8	<input checked="" type="checkbox"/>	0,2	7,7 %
	Cu	8,5	<input checked="" type="checkbox"/>	1,9	22,0 %
	Fe	7,7	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	17,9 %
	Cr	2,9	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	3,5 %
	Ni	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	---
M-3.	Al	1,5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,4	28,1 %
	Cu	0,9	<input checked="" type="checkbox"/>	0,8	---
	Fe	20,6	<input checked="" type="checkbox"/>	13,0	63,2 %
	Cr	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	1,0	---
	Ni	1,5	<input checked="" type="checkbox"/>	1,0	68,2 %
M-4.	Al	4,7	<input checked="" type="checkbox"/>	0,4	8,3 %
	Cu	42,7	<input checked="" type="checkbox"/>	2,0	4,8 %
	Fe	37,9	<input checked="" type="checkbox"/>	19,1	50,5 %
	Cr	0,7	<input checked="" type="checkbox"/>	0,6	---
	Ni	29,2	<input checked="" type="checkbox"/>	1,8	6,2 %
M-5.	Al	0,9	<input checked="" type="checkbox"/>	0,3	---
	Cu	0,6	<input checked="" type="checkbox"/>	1,1	---
	Fe	5,5	<input checked="" type="checkbox"/>	10,9	>100 %
	Cr	0,7	<input checked="" type="checkbox"/>	0,4	---
	Ni	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	1,1	---
M-6.	Al	4,6	<input checked="" type="checkbox"/>	0,4	8,7 %
	Cu	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	1,16	---
	Fe	42,2	<input checked="" type="checkbox"/>	3,9	9,2 %
	Cr	1,4	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	7,6 %
	Ni	61,0	<input checked="" type="checkbox"/>	5,5	9,0 %

Capítulo 5. Revisión de la Espectrometría de Emisión de Plasma.

M-7.	Al	0,8	<input checked="" type="checkbox"/>	0,3	---
	Cu	2,8	<input checked="" type="checkbox"/>	2,2	79,7 %
	Fe	4,4	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	30,9 %
	Cr	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	---
	Ni	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,4	---
M-8.	Al	3,6	<input checked="" type="checkbox"/>	0,7	18,7 %
	Cu	51,5	<input checked="" type="checkbox"/>	16,1	31,2 %
	Fe	29,1	<input checked="" type="checkbox"/>	4,2	14,6 %
	Cr	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	---
	Ni	24,2	<input checked="" type="checkbox"/>	3,0	12,5 %
M-9.	Al	9,3	<input checked="" type="checkbox"/>	1,1	11,9 %
	Cu	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	1,0	---
	Fe	27,5	<input checked="" type="checkbox"/>	11,8	42,8 %
	Cr	0,7	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	---
	Ni	53,1	<input checked="" type="checkbox"/>	7,7	14,5 %
M-10.	Al	13,1	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	11,0 %
	Cu	82,1	<input checked="" type="checkbox"/>	26,9	32,8 %
	Fe	118	<input checked="" type="checkbox"/>	49,2	41,8 %
	Cr	3,0	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	3,6 %
	Ni	0,9	<input checked="" type="checkbox"/>	0,6	---
M-11.	Al	2,4	<input checked="" type="checkbox"/>	0,4	14,4 %
	Cu	4,3	<input checked="" type="checkbox"/>	1,6	37,1 %
	Fe	4,6	<input checked="" type="checkbox"/>	2,7	59,8 %
	Cr	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	---
	Ni	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	---
M-00.	Al	2,1	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	66,0 %
	Cu	8,0	<input checked="" type="checkbox"/>	523	> 100 %
	Fe	17,9	<input checked="" type="checkbox"/>	1230	> 100 %
	Cr	1,5	<input checked="" type="checkbox"/>	1,8	> 100%
	Ni	0,5	<input checked="" type="checkbox"/>	6,8	---

Tabla 5.4. Resultados del ataque ácido sobre partículas (en aceite usado).

5.4.5. Conclusiones.

Los resultados obtenidos en el análisis de muestras reales de lubricante presentan un bajo nivel de recuperación de metales con el método propuesto, estando la mayor parte de los casos por debajo de la concentración de metal detectada mediante el método clásico. En las figuras 5.6 y 5.7 se comparan las concentraciones de metales obtenidas mediante los dos métodos, obteniéndose comportamientos similares para los cuatro metales.

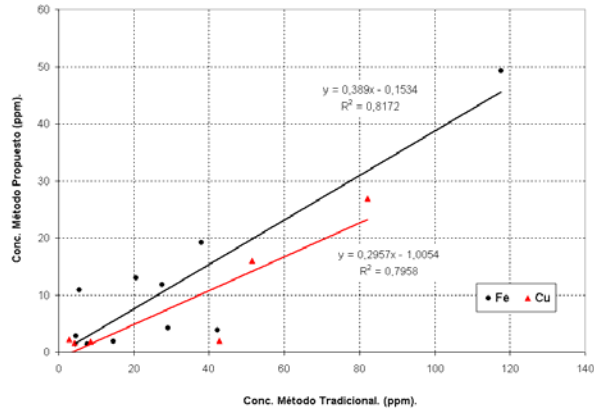


Figura 5.6. Concentraciones medidas de hierro y cobre para cada método de análisis.

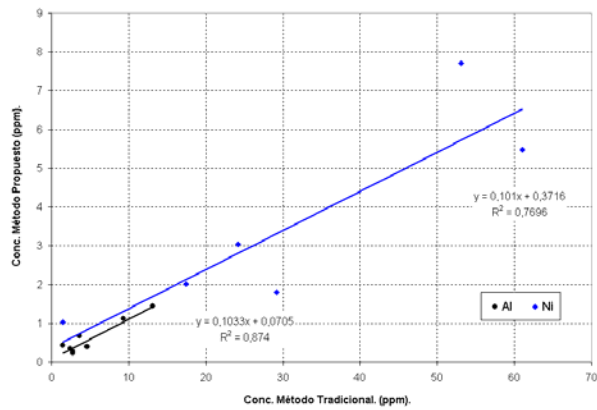


Figura 5.7. Concentraciones medidas de aluminio y níquel para cada método de análisis.

En la figura 5.8 se muestra una gráfica comparando el grado de recuperación medio para todas las muestras, donde, de los cinco metales analizados, en ninguno de ellos el grado de recuperación ha llegado al 50 %. Las razones para este bajo grado de recuperación en muestras reales serían las siguientes:

- Es posible que gran parte de las partículas metálicas de menor tamaño no lleguen a entrar en contacto con la fase acuosa y por tanto no son disueltas por el ácido.
- Existe la posibilidad de que los metales presentes en el aceite se encuentren como iones metálicos y no como partículas, no siendo capaz el ácido de atacar la totalidad de los mismos.

Ante los resultados obtenidos con las muestras reales, se considera necesario realizar modificaciones en el método inicialmente seguido, donde se debería aumentar la temperatura y la presión de trabajo, e incluir algún tipo de detergente o tensioactivo para favorecer el contacto entre fases y por consiguiente una mayor recuperación de metales.

También se debe reseñar que en el caso de la muestra correspondiente a un fallo catastrófico del motor, las medidas de concentración de metales dadas por el método tradicional son muy bajas para la gravedad del daño sufrido. Los valores de metales proporcionados por el método de digestión propuesto se ajustan más al estado real de deterioro, confirmándose las limitaciones en el análisis debidas al tamaño de las partículas que tiene el método espectrométrico tradicional.

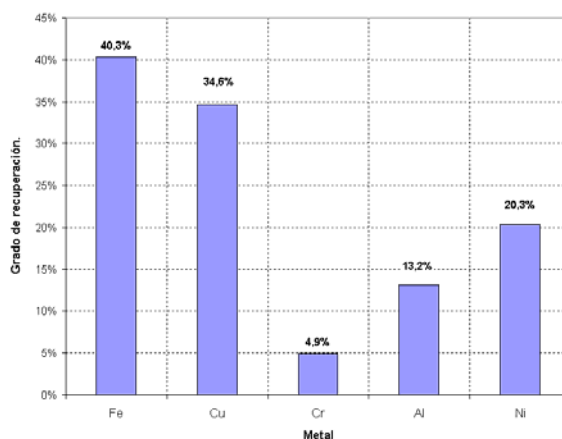


Figura 5.8. Grado de recuperación para los diferentes metales.

5.5. Referencias Bibliográficas.

- 1 Boss, C. B.; Fredeen, K. J. *Concepts, Instrumentation, and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. Perkin Elmer Corporation. 1997.
- 2 Ediger, R. D.; Wilson, D. L. *The Performance of an Inductively Coupled Plasma on the Model 5000 Atomic Absorption Spectrophotometer*. *Atomic Absorption Newsletter*, Vol. 18, No. 2. (pp. 41-45). 1979.
- 3 Ediger, R. D.; Hoult, D. W. *Highly Structured ICP Background Emission*. *Atomic Spectroscopy*, Vol. 1, No. 2 (pp. 41-47) 1980.
- 4 Fassel, V. A. *Quantitative Elemental Analyses by Plasma Emission Spectroscopy*. *Science*, Vol. 202, (pp. 183-191). 1978.
- 5 Wallace, G. F. *Some Factors Affecting the Performance of an ICP Sample Introduction System* *Atomic Spectroscopy*. Vol. 4, No. 5. (pp. 188-192). 1983.
- 6 Eisentraut, K. J.; Newman, R. W.; Saba, C. S.; Kauffman, R. E.; Rhine, W. E. *Spectrometric Oil Analysis. Detecting Engine Failures Before They Occur*. *Analytical Chemistry*, Vol 56, No. 9. (pp. 1086-1094). 1984.
- 7 Guardia, M.; Salvador, A. *Flame Atomic Absorption Determination of Metals in Lubricating Oils: a Critical Review*. *Atomic Spectroscopy*. Vol. 5, No. 4. (pp. 150-155). 1984.
- 8 Merryfield, R. N.; Loyd, R. C. *Simultaneous Determination of Metals in Oil by Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry*. *Analytical Chemistry*, Vol 51, No. 12. (pp. 1965-1968). 1979.
- 9 Meagher, R. G. *Application of Emission Spectroscopy to Prediction of Component Failures in Diesel Engines*. *Conference on Lubrication Friction and Wear in Engineering*. 1980.
- 10 Saba, C. S.; Eisentraut, K. J. *Determination of Molybdenum Wear Metal in Lubricating Oils by Atomic Absorption Spectrometry with a Particle Size Independent Method*. *Analytical Chemistry*, Vol 51, No. 12. (pp. 1927-1930). 1979.
- 11 Brown, J. R.; Saba, C. S.; Rhine, W. E. *Particle Size Independent Spectrometric Determination of Wear Metals in Aircraft Lubricant Oils*. *Analytical Chemistry*, Vol 52, No. 14. (pp. 2365-2370). 1980.
- 12 de Cózar Sievert, R. *Control del Estado Funcional de los Motores Marinos Propulsores por Medio del Análisis del Aceite Lubricante*. Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz. 1992.
- 13 Borja, R. M.; Salvador, A.; de la Guardia, M.; Burguera, J. L.; Burguera, M. *Direct Determination of Calcium in Lubricating Oils by Flow Injection Atomic Absorption Spectrometry Using Emulsions*. *Química Analítica*, Vol. 8, Núm. 2 (pp 241-246). 1989.
- 14 Salvador, A.; de la guardia, M.; Berenguer, V.; *Determination of the Total Iron Content of Used Lubricating Oils by Atomic-Absorption with Use of Emulsions* *Talanta*, Vol. 30, No. 12, (pp. 986-988). 1983.

CAPÍTULO 6.

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.

Índice

6.1. Introducción.	125.
6.2. Resultados para Aceites Hidráulicos.	126.
6.3. Resultados para Aceites de Transmisiones.	130.
6.4. Resultados para Aceites de Cáster.	135.

6.1. Introducción.

Las diferentes muestras empleadas para comprobar la validez de los resultados obtenidos con la ferrografía analítica han sido clasificadas en tres grupos:

- Aceites hidráulicos y de turbinas.
- Aceites lubricantes de transmisiones, reductores y compresores.
- Aceites de cárter motores de combustión. Procedentes tanto de MEC y MEP.

Cada uno de los aceites han sido analizados por espectrometría de emisión de plasma (ICP-OES), y estudiando las partículas con el método de separación descrito en el capítulo 4. Los datos se ordenan en tablas comparando las medidas por ambos métodos.

En el Anexo C se aportan hojas de ejemplo de los informes detallados de las muestras, junto a micrografías de las partículas más destacables.

6.2. Resultados para Aceites Hidráulicos.

Muestra: H-1 (K5044-M1).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	1,0	<p>Alta concentración de partículas de polvo mineral por encima de los 20 micrómetros de diámetro y concentración alta de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. También existe una concentración media de partículas de óxidos rojos, esferas y fragmentos de fatiga ferrosos superiores a 50 micrómetros que serían indicativos de un fallo por fatiga en el elemento.</p>
Cu (ppm)	2,0	
Al (ppm)	2,0	
Pb (ppm)	4,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	6,0	
Comentarios.		
<p><i>Mientras que el análisis mediante espectrometría aporta resultados de concentraciones de metales muy bajos, se observan partículas que indicarían un fallo grave en el funcionamiento de la máquina.</i></p>		

Muestra: H-2 (K5044-M2).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	1,0	<p>Contenido de polímeros de fricción en una concentración baja para partículas de más de 50 micrómetros y media para partículas inferiores.</p>
Cu (ppm)	2,0	
Al (ppm)	1,0	
Pb (ppm)	0,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	0,0	
Comentarios.		
<p><i>La muestra no contiene partículas de desgaste metálicas ya sean pequeñas (evaluadas por el espectrómetro) o grandes (aisladas mediante ferrografía), pero sí existe un considerable contenido de polímeros de fricción no evaluados por ICP-OES y sí por el modo combinado que indican una degradación del aceite y podrían dar lugar a fallos de funcionamiento y depósitos en los conductos.</i></p>		

Muestra: H-3 (K5044-M3).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	1,0	<p>Contenido medio de polvo mineral, fibras y polímeros de fricción de hasta 50 micrómetros de tamaño.</p>
Cu (ppm)	3,0	
Al (ppm)	1,0	
Pb (ppm)	0,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	0,0	
Comentarios.		
<p><i>El contenido de polvo no es detectado a través de espectrometría, el resto de partículas sólo son detectables a través de la ferrografía combinada, ya que son de naturaleza orgánica.</i></p>		

Muestra: H-4 (K5051-M3).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	7,0	<p>Contenido bajo de polvo mineral superior a los 50 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	16,0	
Al (ppm)	0,0	
Pb (ppm)	5,0	
Sn (ppm)	1,0	
Si (ppm)	0,0	
Comentarios.		
<p><i>La existencia de partículas de polvo no es detectada mediante espectrometría dado que son de un tamaño elevado.</i></p>		

Muestra: H-5 (K4965-M2).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	0,0	Muestra sin partículas de contaminación o desgaste reseñables.
Cu (ppm)	0,0	
Al (ppm)	3,0	
Pb (ppm)	1,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	3,0	
Comentarios.		
<i>En esta muestra el ICP es capaz de detectar un contenido de sílice y aluminio, dado que no existe prácticamente ninguna partícula retenida sobre la membrana de 0,8 micrómetros el metal está en forma de partículas de menor tamaño o en forma de iones.</i>		

Muestra: H-6 (K4965-M3).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	0,0	Contenido medio de polímeros de fricción de tamaño superior a los 50 micrómetros.
Cu (ppm)	1,0	
Al (ppm)	0,0	
Pb (ppm)	1,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	0,0	
Comentarios.		
<i>La presencia de partículas metálicas en el aceite es prácticamente nula, la ferrografía detecta polímeros que podrían dar lugar a malfuncionamientos en el sistema.</i>		

Muestra: H-7 (K4965-M4).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	0,0	Muestra sin partículas de contaminación o desgaste reseñables.
Cu (ppm)	1,0	
Al (ppm)	0,0	
Pb (ppm)	0,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	0,0	
Comentarios.		
<i>En el aceite está completamente libre de partículas, tanto inferiores a 5 micrómetros como superiores.</i>		

6.3. Resultados para Aceites de Transmisiones.

Muestra: T-1 (R004-XX72317).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	8,5	Contenido medio de óxidos rojos de hasta 50 micrómetros y contaminación media de polímeros de fricción de hasta 100 micrómetros.
Cu (ppm)	7,6	
Al (ppm)	0,5	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	0,5	
Comentarios.		
<p><i>La ferrografía determina la existencia de óxidos rojos, los cuales son generados por la presencia de humedad en el aceite. El contenido de polímeros de fricción indica un deterioro del lubricante. No se han encontrado partículas de cobre que estén relacionadas con el contenido de cobre calculado mediante espectrometría.</i></p>		

Muestra: T-2 (R007-XX69123).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	403	Concentración alta de partículas de desgaste adhesivo normal ferrosas y no ferrosas. Concentración alta de óxidos ferrosos rojos de hasta 100 micrómetros y contenido alto de partículas de corrosión química. Contenido medio de fragmentos de fatiga, partículas laminares y partículas de deslizamiento ferrosas y no ferrosas.
Cu (ppm)	43,6	
Al (ppm)	7,3	
Pb (ppm)	248	
Sn (ppm)	5,1	
Si (ppm)	16,6	
Comentarios.		
<p><i>A través de ambas técnicas se detecta un desgaste generalizado del mecanismo. Dado que no se ha detectado una elevada concentración de partículas de tamaños superiores a los 100 micrómetros se puede establecer que aún no se ha desencadenado un fallo catastrófico, si bien el mismo parece ser inminente. El análisis del aceite ha detectado una contaminación por agua del 0,55% hecho que explicaría el excesivo desgaste y la presencia de óxidos rojos y de corrosión.</i></p>		

Muestra: T-3 (R012-XX72316).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	5,6	<p>Contenido alto de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. Contenido bajo de fragmentos de fatiga y partículas laminares ferrosas y polímeros de fricción de hasta 100 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	0,5	
Al (ppm)	0,5	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	0,7	
Comentarios.		
<p><i>Mientras que la espectrometría no detecta prácticamente ningún contenido de metales, el método combinado es capaz de detectar una elevada presencia de partículas ferrosas además de un desgaste por fatiga incipiente en los engranajes.</i></p>		

Muestra: T-4 (R014-XX72318).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	5,6	<p>Concentración media de partículas de desgaste adhesivo normal.</p>
Cu (ppm)	0,5	
Al (ppm)	0,5	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	4,6	
Comentarios.		
<p><i>En esta muestra ambos métodos proporcionan medidas similares, aunque la espectrometría prácticamente no detecta la existencia de partículas de hierro.</i></p>		

Muestra: T-5 (R019-XX72314).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	10,9	<p>Concentración baja de polímeros de fricción, polvo mineral y fibras de hasta 100 micrómetros. Existe un contenido medio de partículas ferrosas con colores de oxidación por altas temperatura de hasta 50 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	4,7	
Al (ppm)	0,5	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	0,5	
Comentarios.		
<p><i>La espectrometría no detecta una concentración anómala de metales, mientras que la ferrografía sí aprecia una cierta presencia de partículas ferrosas con síntomas de sobrecalentamiento debido a excesivas temperaturas de trabajo. La existencia de polímeros de fricción también implica una degradación del lubricante.</i></p>		

Muestra: T-6 (R015-XX66946).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	6,9	<p>Contenido alto de óxidos ferrosos rojos de tamaños superiores a los 100 micrómetros. Concentración media de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal.</p>
Cu (ppm)	8,1	
Al (ppm)	---	
Pb (ppm)	9,7	
Sn (ppm)	---	
Si (ppm)	---	
Comentarios.		
<p><i>El espectrómetro ICP determina concentraciones de plomo y cobre superiores a la de hierro, mientras que la ferrografía no detecta partículas no ferrosas y destaca una elevada concentración de óxidos rojos de tamaños elevados.</i></p>		

Muestra: T-7 (R018-XX66947).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	4,8	<p>Contenido alto de óxidos ferrosos rojos de tamaños superiores a los 100 micrómetros. Concentración media de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal.</p>
Cu (ppm)	12,3	
Al (ppm)	---	
Pb (ppm)	7,7	
Sn (ppm)	---	
Si (ppm)	---	
Comentarios.		
<p><i>El ICP determina concentraciones de plomo y cobre superiores a la de hierro, mientras que la ferrografía no detecta partículas no ferrosas y destaca una elevada concentración de óxidos rojos de tamaños elevados. Al igual que en la muestra T-6 se considera que los metales no ferrosos se encuentran en forma de partículas inferiores a los 3 micrómetros.</i></p>		

Muestra: T-8 (K-5040-M3).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	1,0	<p>Contenido medio de partículas no ferrosas de desgaste adhesivo normal. Concentración media de fibras mayores de 100 micrómetros y presencia baja de polvo mineral y polímeros de fricción de hasta 100 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	0,0	
Al (ppm)	0,0	
Pb (ppm)	0,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	2,0	
Comentarios.		
<p><i>La espectrometría detecta trazas de metales mientras que mediante el método de separación combinado se aprecia un deterioro del lubricante y la entrada de polvo y fibras desde el exterior.</i></p>		

Muestra: T-9 (K-5040-M6).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	1,0	<p>Contenido medio de partículas de polvo mineral de hasta 100 micrómetros. Contenido bajo de polímeros de fricción y fibras superiores a los 100 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	1,0	
Al (ppm)	0,0	
Pb (ppm)	2,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	0,0	
Comentarios.		
<p><i>Ferrografía y espectrometría coinciden en no detectar metales de desgaste, sin embargo, dado que las partículas de polvo tienen un tamaño considerable, el ICP no es capaz de detectar su existencia mientras que el método combinado sí las ha aislado.</i></p>		

6.4. Resultados para Aceites de Cáster.

Muestra: C-1 (K5040-M1).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	2,0	La muestra no presenta partículas en concentración anormal.
Cu (ppm)	1,0	
Al (ppm)	1,0	
Pb (ppm)	1,0	
Sn (ppm)	0,0	
Si (ppm)	2,0	
Comentarios.		
<i>Tanto la espectrometría como la ferrografía no detectan metales de contaminación o desgaste en el motor.</i>		

Muestra: C-2 (M109-XX52245).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	22,5	Contenido medio de partículas ferrosas y no ferrosas debidas a fricción normal. Presencia de partículas de deslizamiento de aluminio en concentración media. Existencia de partículas de polvo mineral de gran tamaño indicativo de contaminación desde el exterior.
Cu (ppm)	2,2	
Al (ppm)	3,0	
Pb (ppm)	7,5	
Sn (ppm)	1,0	
Si (ppm)	10,0	
Comentarios.		
<i>La espectrometría obtiene valores medios de plomo que no son observados a través de la ferrografía, por el contrario, el método combinado detecta una presencia de partículas de aluminio que corresponde a un desgaste por deslizamiento del pistón.</i>		

Muestra: C-3 (M110-XX39347).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	14,5	Concentración baja de partículas de desgaste. Se observa una elevada concentración de polímeros de fricción de tamaños inferiores a 50 micrómetros.
Cu (ppm)	0,5	
Al (ppm)	2,8	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	13,2	
Comentarios.		
<p><i>El ICP-OES obtiene resultados similares al método combinado en presencia de metales de desgaste, dado que no se han encontrado partículas de polvo de gran tamaño el silicio existente corresponde a polvo mineral de pequeño tamaño o bien a restos de sellos de silicona. Los polímeros de fricción detectados mediante ferrografía son indicativos de un deterioro del lubricante por oxidación o elevadas temperaturas de trabajo.</i></p>		

Muestra: C-4 (M111-XX33495).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	7,7	Contenido medio de partículas ferrosas de partículas de desgaste adhesivo normal. Existe un contenido medio de partículas de polvo y fibras. Concentración baja de partículas ferrosas de desgaste abrasivo.
Cu (ppm)	8,5	
Al (ppm)	2,8	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,6	
Si (ppm)	2,8	
Comentarios.		
<p><i>No se detecta mediante ferrografía el contenido de cobre dado por el espectrómetro, lo cual indica que dichas partículas tienen un tamaño inferior a 3 micrómetros. El polvo mineral con tamaños próximos a los 100 micrómetros podría ser el responsable de la aparición de partículas de corte ferrosas.</i></p>		

Muestra: C-5 (M112-XX58146).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	20,6	Contenido medio de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. Contaminación por polvo mineral.
Cu (ppm)	0,9	
Al (ppm)	1,5	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,8	
Si (ppm)	7,3	
Comentarios.		
<i>Ambas técnicas proporcionan una información similar del estado de la muestra.</i>		

Muestra: C-6 (M113-XX22453).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	37,9	Presencia media de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. Contenido medio de partículas de corrosión. El contenido de polvo mineral y fibras es medio, especialmente en partículas superiores a los 100 micrómetros.
Cu (ppm)	42,7	
Al (ppm)	4,7	
Pb (ppm)	9,8	
Sn (ppm)	3,9	
Si (ppm)	8,7	
Comentarios.		
<i>La espectrometría y la ferrografía coinciden en la detección de partículas de hierro y silicio. Para el cobre y el plomo la ferrografía no es capaz de detectar la presencia de partículas de dichos metales, por tanto el tamaño de las mismas es inferior a los 3 micrómetros.</i>		

Muestra: C-7 (M114-XX07657).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	5,5	<p>Contenido medio de esferas de fatiga. Presencia de partículas ferrosas y no ferrosas de deslizamiento superiores a los 50 micrómetros en baja concentración.</p>
Cu (ppm)	0,6	
Al (ppm)	0,9	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,6	
Si (ppm)	2,6	
Comentarios.		
<p><i>Los resultados dados por espectrometría no son indicativos de un desgaste anormal del motor; sin embargo, la ferrografía combinada ha detectado partículas indicativas de un fallo incipiente.</i></p>		

Muestra: C-8 (M115-XX39346).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	42,2	<p>Concentración normal de partículas de desgaste. Solamente destacar una elevada concentración de lodos.</p>
Cu (ppm)	0,5	
Al (ppm)	4,6	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,6	
Si (ppm)	13,2	
Comentarios.		
<p><i>El espectrómetro ha detectado una concentración elevada de hierro mientras que mediante ferrografía este hierro no ha sido aislado; por el contrario ha quedado retenida sobre la membrana una alta concentración de lodos que podrían provocar problemas de saturación en los filtros. Se podría establecer, dado que no se han detectado partículas de hierro grandes, que el lodo contiene en su seno una elevada concentración de óxidos ferrosos.</i></p>		

Muestra: C-9 (M116-XX35414).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	8,9	Ha sido detectada una concentración media de partículas ferrosas de fricción normal. También existen en concentración baja partículas ferrosas de desgaste por fatiga superiores a los 50 micrómetros.
Cu (ppm)	0,5	
Al (ppm)	1,2	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,6	
Si (ppm)	1,0	
Comentarios.		
<p><i>Mientras que el ICP-OES proporciona una medida de metales absolutamente normal, el método combinado detecta una ligera aparición de partículas de desgaste por fatiga, que sin ser grave podría indicar el inicio de un fallo por fatiga en el motor.</i></p>		

Muestra: C-10 (M117-XX26895).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	4,4	Ha sido detectada una concentración media de partículas ferrosas de fricción normal y una concentración alta de polímeros de fricción de tamaño inferior a los 50 micrómetros.
Cu (ppm)	2,8	
Al (ppm)	0,8	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	2,1	
Comentarios.		
<p><i>En esta muestra, la espectrometría obtiene valores de concentración de metales totalmente normales, mientras que la ferrografía detecta una concentración media de partículas de desgaste adhesivo, sin ser indicativo de un desgaste anormal permite que el responsable de la máquina esté alerta ante aumentos de concentraciones de otras partículas mayores. La aparición de polímeros de fricción indica una degradación del lubricante.</i></p>		

Muestra: C-11 (M118-XX22414).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	29,1	Ha sido detectada una concentración media de partículas ferrosas de fricción normal. Existe un contenido bajo de polímeros de fricción por encima de los 50 micrómetros.
Cu (ppm)	51,5	
Al (ppm)	3,6	
Pb (ppm)	11,0	
Sn (ppm)	4,5	
Si (ppm)	6,2	
Comentarios.		
<p><i>El ICP-OES detecta una elevada concentración de cobre que no ha sido detectada mediante ferrografía. El método combinado sí ha detectado una baja concentración de partículas de fatiga de aleaciones plomo-estaño. En el contenido de hierro ambos métodos coinciden. La espectrometría no detecta la existencia de polímeros que podrían generar saturación de filtros.</i></p>		

Muestra: C-12 (M119-XX34842).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	27,5	Destaca el nivel medio de concentración de óxidos oscuros ferrosos, generados por trabajo a elevadas temperaturas del motor.
Cu (ppm)	0,5	
Al (ppm)	9,3	
Pb (ppm)	0,5	
Sn (ppm)	1,4	
Si (ppm)	25,3	
Comentarios.		
<p><i>La espectrometría y el método combinado coinciden en la detección de partículas de hierro, sin embargo la concentración de silicio dada por el ICP no es equivalente a las partículas de polvo aisladas mediante ferrografía. Ante estos resultados se podría inferir que el silicio existente en la muestra corresponde a partículas de tamaño inferior a 3 micrómetros o a restos de sellos de silicona.</i></p>		

Muestra: C-13 (M120-XX12731).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	118	<p>Concentración alta de partículas ferrosas y no ferrosas de desgaste adhesivo normal. Concentración media de partículas no ferrosas de desgaste por deslizamiento y contenido medio de fragmentos de fatiga no ferrosos. Alta presencia de óxidos ferrosos de corrosión. Contenido medio de polímeros de fricción y polvo mineral.</p>
Cu (ppm)	82,1	
Al (ppm)	13,1	
Pb (ppm)	13,5	
Sn (ppm)	5,7	
Si (ppm)	14,3	
Comentarios.		
<p><i>Ambas técnicas coinciden en la existencia de una elevada concentración de metales de desgaste en el motor. La ferrografía combinada no ha detectado partículas de tamaños superiores a los 100 micrómetros, aún no ha comenzado un desgaste severo generalizado, pero por los indicios hallados el fallo catastrófico es inminente.</i></p>		

Muestra: C-14 (M400-XX19291).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	21,5	<p>Contenido medio de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal y medio de óxidos debidos a corrosión química. Concentración baja de fibras mayores de 50 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	3,0	
Al (ppm)	1,6	
Pb (ppm)	1,1	
Sn (ppm)	1,5	
Si (ppm)	9,5	
Comentarios.		
<p><i>Las medidas proporcionadas por ambos métodos son similares. La presencia de fibras de gran tamaño es indicativa de la entrada de contaminación del exterior o bien de un deficiente proceso de muestreo.</i></p>		

Muestra: C-15 (M401-XX21541).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	11,3	El contenido de partículas de desgaste es normal. Existe un bajo contenido de fibras superiores a 50 micrómetros.
Cu (ppm)	3,6	
Al (ppm)	1,6	
Pb (ppm)	1,3	
Sn (ppm)	0,9	
Si (ppm)	7,7	
Comentarios.		
<p><i>La medida proporcionada por ambas técnicas es similar en todos los metales, no obstante, dado que las fibras son de naturaleza orgánica no son detectables vía espectrometría, pero sí a través de la ferrografía combinada.</i></p>		

Muestra: C-16 (M404-XX21651).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	14,7	Contenido normal de partículas de desgaste y contaminación.
Cu (ppm)	9,0	
Al (ppm)	1,7	
Pb (ppm)	1,4	
Sn (ppm)	0,8	
Si (ppm)	5,6	
Comentarios.		
<p><i>Ambos métodos obtienen unas medidas similares.</i></p>		

Muestra: C-17 (M405-XX15361).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	40,8	<p>Contenido alto de partículas no ferrosas de desgaste adhesivo normal y concentración media de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. Contenido medio de polímeros de fricción de hasta 50 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	5,4	
Al (ppm)	2,9	
Pb (ppm)	4,0	
Sn (ppm)	0,6	
Si (ppm)	9,5	
Comentarios.		
<p><i>Las dos técnicas obtienen resultados equivalentes, la espectrometría detecta una menor concentración de metales no ferrosos. El método combinado da información de la presencia de polímeros de fricción, relacionados con la degradación del aceite lubricante.</i></p>		

Muestra: C-18 (M406-XX15360).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	8,1	<p>Contenido normal de partículas metálicas de desgaste. Concentración baja de polímeros de fricción mayores de 100 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	1,1	
Al (ppm)	1,8	
Pb (ppm)	1,1	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	5,4	
Comentarios.		
<p><i>Ambos métodos obtienen unas medidas similares de concentración de metales de desgaste. Los polímeros de fricción de gran tamaño crean problemas de saturación en filtros y pueden crear depósitos en las superficies del motor.</i></p>		

Muestra: C-19 (M407-XX07753).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	11,8	<p>Contenido medio de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. El resto de partículas de desgaste y contaminantes presenta una concentración normal.</p>
Cu (ppm)	1,0	
Al (ppm)	1,7	
Pb (ppm)	1,8	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	4,0	
Comentarios.		
<p><i>En esta muestra el ferrógrafo ha detectado un mayor porcentaje de hierro que lo cuantificado vía ICP-OES, en el resto de metales se observan medidas equiparables, el aceite prácticamente no tiene partículas de desgaste aparte de las ferrosas.</i></p>		

Muestra: C-20 (M408-XX17049).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	20,8	<p>Se ha detectado una concentración media de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. Existen partículas de desgaste por fatiga pero en concentración baja. El contenido de polvo mineral hasta tamaños de 100 micrómetros es medio.</p>
Cu (ppm)	10,8	
Al (ppm)	1,5	
Pb (ppm)	2,6	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	6,8	
Comentarios.		
<p><i>Ambos métodos aportan una información equivalente, aunque gracias al método combinado se puede estimar que el desgaste que tiende a aparecer es de fatiga, además la presencia de partículas de polvo mineral de tamaño intermedio no es cuantificada por el espectrómetro.</i></p>		

Muestra: C-21 (M409-XX21542).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	9,8	Se detectan partículas de desgaste por fatiga pero en concentración baja . El contenido de polvo mineral hasta tamaños de 100 micrómetros es medio . Presencia baja de fibras de tamaños superiores a los 50 micrómetros.
Cu (ppm)	0,5	
Al (ppm)	2,0	
Pb (ppm)	1,9	
Sn (ppm)	2,1	
Si (ppm)	20,8	
Comentarios.		
<p><i>El contenido de polvo mineral es cuantificado por ambos métodos, además la existencia de fibras induce a pensar que se está produciendo una entrada de contaminantes desde el exterior.</i></p>		

Muestra: C-22 (M410-XX61231).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	24,5	Presencia de polímeros de fricción de hasta 50 micrómetros en concentración media . También se ha detectado la existencia de fibras de hasta 100 micrómetros a nivel medio .
Cu (ppm)	13,4	
Al (ppm)	2,5	
Pb (ppm)	25,3	
Sn (ppm)	0,7	
Si (ppm)	11,4	
Comentarios.		
<p><i>Los resultados dados por ambas técnicas son muy diferentes, mediante espectrometría se observa un contenido medio de hierro y plomo que no es detectado a través de la ferrografía, las partículas de desgaste de estos dos metales tienen tamaños inferiores a los 3 micrómetros.</i></p>		

Muestra: C-23 (M411-XX19055).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	13,2	<p>Contenido medio de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. Se detecta un contenido bajo óxidos oscuros mayores de 50 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	38,6	
Al (ppm)	5,9	
Pb (ppm)	2,3	
Sn (ppm)	3,1	
Si (ppm)	4,7	
Comentarios.		
<p><i>La ferrografía solamente detecta un cierto desgaste ferroso con la presencia de óxidos oscuros producidos por temperaturas de trabajo elevadas. El ICP detecta una elevada concentración de cobre que no tiene su equivalente con partículas de desgaste aisladas mediante el método combinado.</i></p>		

Muestra: C-24 (M412-XX16464).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	32,2	<p>Contenido bajo de polímeros de fricción por encima de los 50 micrómetros y contaminación media de polvo mineral y fibras de hasta 50 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	2,0	
Al (ppm)	3,3	
Pb (ppm)	1,7	
Sn (ppm)	1,0	
Si (ppm)	14,0	
Comentarios.		
<p><i>Ambas técnicas detectan la entrada de polvo del exterior, pero la concentración de hierro obtenida vía espectrometría corresponde a partículas de un tamaño inferior a un micrómetro, ya que la ferrografía no ha detectado su presencia.</i></p>		

Muestra: C-25 (M416-XX16657).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	91,1	<p>Contenido medio de óxidos ferrosos de corrosión. Concentración media de partículas ferrosas generadas por un desgaste adhesivo normal. También existe un contenido bajo de fibras superiores a los 100 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	19,8	
Al (ppm)	15,7	
Pb (ppm)	84,6	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	31,0	
Comentarios.		
<p><i>La elevada concentración de partículas ferrosas es cuantificada por ambos métodos. .</i></p>		

Muestra: C-26 (M417-XX19295).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	20,2	<p>Contenido medio de partículas de desgaste adhesivo normal (ferroso y no ferroso). Concentración baja de polímeros de fricción de tamaño superior a los 50 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	3,6	
Al (ppm)	3,5	
Pb (ppm)	2,4	
Sn (ppm)	0,5	
Si (ppm)	12,3	
Comentarios.		
<p><i>Los resultados de contenido de metales de desgaste aportados por ambas técnicas son similares, la presencia de polímeros de fricción indica un cierto deterioro del lubricante.</i></p>		

Muestra: C-27 (M418-XX19054).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	19,0	<p>Concentración media de partículas ferrosas generadas por desgaste adhesivo normal. Contenido bajo de polvo mineral y fibras de hasta 100 micrómetros de tamaño.</p>
Cu (ppm)	17,6	
Al (ppm)	3,0	
Pb (ppm)	4,9	
Sn (ppm)	1,9	
Si (ppm)	3,6	
Comentarios.		
<p><i>Las medidas proporcionadas por los dos métodos analíticos son similares, la principal diferencia radica en que no han sido detectadas partículas de cobre que justifiquen la concentración dada por el ICP-OES. La presencia de polvo mineral podría generar un desgaste abrasivo de la máquina.</i></p>		

Muestra: C-28 (M419-XX16658).		
ICP-OES.		Ferrografía combinada.
Fe (ppm)	95,2	<p>Contenido medio de partículas ferrosas de desgaste adhesivo normal. También se ha encontrado una concentración baja de óxidos ferrosos oscuros y de polímeros de fricción de hasta 100 micrómetros.</p>
Cu (ppm)	16,8	
Al (ppm)	10,1	
Pb (ppm)	45,1	
Sn (ppm)	1,9	
Si (ppm)	13,1	
Comentarios.		
<p><i>No existe una equivalencia entre la elevada concentración de metales encontrada en este aceite de motor y las partículas aisladas mediante ferrografía, por tanto la mayor parte de metales se encuentran en forma de partículas por debajo de los 3 micrómetros. La existencia de óxidos ferrosos oscuros es indicativa de altas temperaturas de trabajo del lubricante.</i></p>		

CAPÍTULO 7.

CONCLUSIONES.

Índice

7.1. Introducción.	151.
7.2. Proceso de Muestreo.	151.
7.3. Análisis Espectrométrico de Metales.	151.
7.4. Ferrografía Combinada.	152.
7.5. Método de Medida de Metales Propuesto.	153.

7.1. Introducción.

Un vez finalizado todo el proceso de investigación llegado a cabo durante el desarrollo de la presente Tesis Doctoral, se han obtenido diferentes conclusiones que han sido agrupadas en cuatro áreas diferentes: particularidades del proceso de toma de muestras, medida cuantitativa de metales, el proceso ferrográfico y el análisis automático de partículas.

7.2. Proceso de Muestreo.

Respecto a las metodologías de toma de muestra se puede concluir que:

- Siempre se buscará la instalación de conectores para la toma de muestras integrados en los sistemas lubricados, facilitando de este modo el proceso, reduciendo las contaminaciones externas y evitando las muestras poco representativas.
- El muestreo mediante dispositivos ajenos al circuito, sólo es válido si se realiza con el aceite perfectamente agitado; tal y como representan las gráficas del apartado 2.6, la velocidad de sedimentación de las partículas en los aceites es tan elevada que en menos de 5 cinco minutos ya se han depositado en el fondo las de mayor tamaño, que son las críticas a la hora de diagnosticar el estado de la máquina.
- Se vuelve a incidir en la importancia de una correcta toma de muestras, el operario encargado de la misma debe ser consciente de que si no se muestrea de manera adecuada, los análisis realizados posteriormente carecen de fiabilidad.

7.3. Análisis Espectrométrico de Metales.

El estudio de los métodos de análisis mediante espectrometría ha conducido a la emisión de las siguientes conclusiones:

- Se ha constatado que los equipos ICP-OES solamente cuantifican partículas metálicas por debajo de los 5 micrómetros, y de los resultados obtenidos de las observaciones de filtros de membrana, se puede inferir que las partículas que predominan en la medida dada por el espectrómetro son de tamaños inferiores a los 0,8 micrómetros. óxidos metálicos o iones metálicos.
- El proceso de ataque ácido presenta mejoras en la determinación de metales que forman partículas de mayor tamaño, pero en la práctica presenta serias desventajas operativas que no lo hacen recomendable.
 - Alarga el tiempo de proceso en casi una hora por muestra, dado que son necesarios procesos de pesado, trasiego de la muestra desde

diferentes recipientes, realización del ataque químico y aforado de las muestras.

- Se requiere la manipulación de ácidos inorgánicos a altas concentraciones, teniéndose que realizar las reacciones en campanas de extractoras de gases específicas para ácidos fuertes.
- El aceite se diluye en una proporción de 20:1, por tanto se pierde sensibilidad en la detección debido a estas diluciones. Elementos en concentraciones inferiores a 20 ppm en el aceite tendrían una gran incertidumbre en la medida, ya que suele trabajar con un gramo de aceite usado.
- El empleo de diferentes ácidos, disolventes y recipientes para la realización de ensayos aumenta el riesgo de contaminaciones externas que distorsionen los resultados obtenidos.

7.4. Ferrografía Combinada.

Las principales conclusiones extraídas de la aplicación del método de separación de partículas desarrollado a lo largo de la Tesis son las siguientes:

- El método propuesto mejora los resultados proporcionados por otros equipos ferrográficos tradicionales, ya que con las modificaciones realizadas, el sistema es capaz de aislar tanto las partículas ferrosas como las no ferrosas.
- La ferrografía combinada es mucho más sensible que la espectrometría de emisión; dado que cierto número de partículas que indican un desgaste serio de la máquina, si fueran medidas mediante ICP-OES daría una concentración despreciable dado que la masa de dichas partículas es muy baja.
- El método de ferrografía es actualmente la herramienta más eficaz para detectar fallos incipientes en el motor cuando éstos llevan asociados la generación de partículas de tamaños superiores a los 15 micrómetros.

7.5. Método de Medida de Metales Propuesto.

En último lugar, y a raíz de la experiencia y conocimientos adquiridos a lo largo de la realización de la presente Tesis Doctoral, se comenta el proceso óptimo para determinar de manera absoluta la totalidad de metales de contaminación y desgaste presente en aceites lubricantes usados:

1. Recuento de partículas a través de contadores láser: informando del total de partículas existentes en el aceite clasificadas por tamaños.
2. ICP-OES con introducción directa de muestra: realizará un análisis de la totalidad de metales de tamaños inferiores a 5 micrómetros. Este método es eficaz para determinar corrosión química de metales no ferrosos, las concentraciones de aditivos organometálicos del lubricante, la dilución por combustible a través de la medida de metales existentes en combustibles (como el vanadio) o la contaminación por fluido refrigerante también debido a la existencia de aditivos específicos en dichos fluidos (sodio o boro).
3. Ferrografía combinada: cuando el equipo de recuento detecte partículas de tamaños superiores a la habitual o en mayor concentración, se realizará un análisis ferrográfico del aceite para analizar la composición y morfología de las partículas existentes en el lubricante.

CAPÍTULO 8.

Trabajos Futuros.

8.1. Trabajos Futuros.

En este último capítulo de la Tesis se comentan algunas de las líneas de investigación que están siendo o serán desarrolladas en un futuro próximo y que están directamente relacionadas con las técnicas de análisis de lubricante anteriormente descritas:

- Realización de mejoras sobre ferrógrafo, posibilitando el análisis de varias muestras de forma simultánea e incorporando dispositivos electrónicos que reduzcan el grado de intervención sobre el ensayo del técnico, permitiendo que sea un ensayo semiautomático.
- Se están iniciando conversaciones con expertos en análisis de lubricantes de diferentes centro de investigación, tanto nacionales como internacionales, para proponer una metodología estándar para la realización de análisis ferrográficos de aceites lubricantes.
- Ya han sido analizadas algunas de estas muestras de gasóleo para determinar qué efecto tiene la presencia de partículas en el funcionamiento de sistemas de inyección de motores Diesel (anexo D), y se ha comprobado que es aplicable la misma metodología de análisis que la seguida para aceites lubricantes, realizando pequeñas modificaciones en el proceso.
- Se están realizando estudios acerca de la viabilidad de la implantación de un sistema de análisis de partículas en el fluido refrigerante, de manera que sea posible evaluar el desgaste de elementos internos del circuito como la bomba, manguitos poliméricos o intercambiadores; y también detectar la entrada de contaminantes como polvo mineral.

ANEXO A.

Tablas de Referencia.

Índice

A.1. Introducción.	158.
A.2. Clasificación SAE para Aceites Lubricantes de Cáster.	159.
A.3. Clasificación ISO para aceites industriales.	159.
A.4. Equivalencias entre Unidades de Viscosidad.	160.
A.5. Cuadro Resumen de los Principales Tipos de Partículas.	161.
A.6. Procedencia de los Metales Existentes en el Lubricante.	162.

A.1. Introducción.

El objetivo de este apartado es recoger diferentes tablas de datos y ensayos que aportan una información complementaria a los estudios realizados durante el desarrollo de la presente tesis doctoral y que son considerados de interés.

A.2. Clasificación SAE para Aceites Lubricantes de Cáster.

Grado de Viscosidad SAE	Temp. límite máxima de bombeabilidad °C	Viscosidad Máxima cP a °C	Viscosidad Cinemática a 100°C (cSt)		Viscosidad de cizalla (cP) a 150°C, 10 ⁶ s ⁻¹ Mínima
			Mínima	Máxima	
0W	- 35	3.250 a -30	3,8	---	
5W	- 30	3.500 a -25	3,8	---	
10W	- 25	3.500 a -20	4,1	---	
15W	- 20	3.500 a -15	5,6	---	
20W	- 15	4.500 a -10	5,6	---	
25W	- 10	6.000 a -5	9,3	---	
20	---	---	5,6	<9,3	2,6
30	---	---	9,3	<12,5	2,9
40	---	---	12,5	<16,3	2,9 ⁽¹⁾
					3,7 ⁽²⁾
50	---	---	16,3	<21,9	3,7
60	---	---	21,9	<26,1	3,7

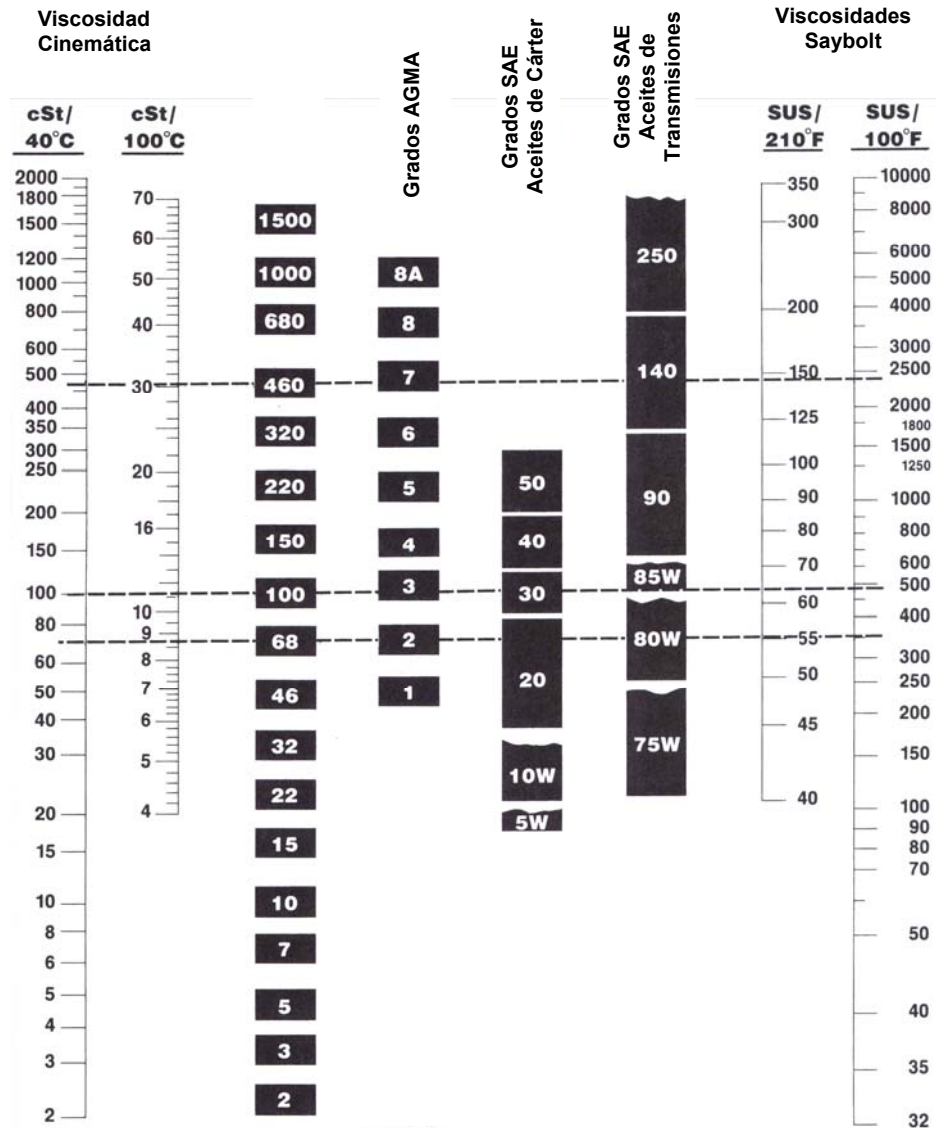
(1) para grados de viscosidad 0W-40, 5W-40 y 10W-40.

(2) para grados de viscosidad 15W-40, 20W-40, 25W-40 y 40.

A.3. Clasificación ISO para aceites industriales.

Grado de viscosidad ISO VG	Viscosidad Media a 40°C (cSt)	Límite de viscosidad		Grado de viscosidad ISO VG	Viscosidad Media a 40°C (cSt)	Límite de viscosidad	
		Mín.	Máx.			Mín	Máx.
2	2,2	1,98	2,42	68	68	61,2	74,8
3	3,2	2,88	3,52	100	100	90	110
5	4,6	4,14	5,06	150	150	135	165
7	6,8	6,12	7,48	220	220	198	242
10	10	9,0	11,0	360	360	2,88	352
15	15	13,5	16,5	460	460	414	506
22	22	19,8	24,2	680	680	612	748
32	32	28,8	35,2	1000	1000	900	1100
46	46	41,2	50,6	1500	1500	1350	1650

A.4. Equivalencias entre Unidades de Viscosidad.



Las viscosidades sólo se pueden relacionar horizontalmente.

Las relaciones entre viscosidad y temperatura están basadas en aceites con un IV de 95 y sólo son aplicables para aceites monogrado o aceites multigrado de similar índice de viscosidad.

Los valores de viscosidad de aceites de cárter y aceites de transmisiones vienen referidos a una temperatura de 100°C. Las clasificaciones ISO y AGMA expresan valores de viscosidad a 40°C.

A.5. Cuadro Resumen de los Principales Tipos de Partículas.

Tipo	Características	Aspecto
DESGASTE ADHESIVO		
Fricción Normal	Forma similar a diminutas <i>escamas</i> metálicas, de un tamaño nunca superior a los 20 µm. Su superficie es lisa y no suelen presentar colores de oxidación. Este tipo de partículas está asociado al desgaste normal.	
Fricción Deslizante	Estriaciones paralelas en superficie, generalmente en la dirección de la dimensión mayor. Bordes rectos. Superficie irregular. Coloración superficial por sobrecalentamiento que induce habitualmente colores de oxidación característicos para cada tipo de aleación.	
DESGASTE POR FATIGA		
Fragmento	Morfología equiaxial, con la superficie sin irregularidades pronunciadas, su relación dimensión mayor frente al grosor es inferior a 10:1 llegando incluso a 5:1. Aparecen como consecuencia de la degradación del material por fatiga por elevadas cargas.	
Esfera	Forma esférica característica que permite una rápida diferenciación, su tamaño suele estar entre los 1 µm y 10 µm de diámetro. Si el diámetro de las esferas es superior a los 20 micrómetros indican un daño grave en la máquina o bien su origen son restos de mecanizado, soldadura o corte con sierras radiales.	
Laminar	Aspecto aplanado sin bordes rectos, con la superficie lisa, en ocasiones presentan agujeros y bordes hendidos, consecuencia del aplastamiento y laminación de los fragmentos de fatiga que se introducen en la zona de rodadura.	
DESGASTE ABRASIVO		
Entre dos cuerpos	De 2 µm a 5 µm de anchura y una longitud generalmente superior a los 30 µm. Se presentan en forma de virutas de aspecto recto o curvado. En ocasiones toman colores de oxidación	
Entre tres cuerpos	De 1 µm de anchura como máximo y de una longitud inferior a los 30 µm. Suelen ser menos curvadas que las formadas entre dos cuerpos.	
ÓXIDOS FERROSOS		
Rojos tipo alfa (α-Fe ₂ O ₃)	Tonalidad pardo-rojiza característica, son semitransparentes a la luz transmitida, responden con un color naranja brillante ante la luz polarizada, lo cual permite su fácil identificación. Su presencia es indicativa de una contaminación por agua del circuito de lubricación.	
Rojos tipo beta (β-Fe ₂ O ₃)	Tonalidad grisácea característica, planos, de aspecto similar a las partículas ferrosas de desgaste por deslizamiento, pero con una menor respuesta al campo magnético. Si se observan con los transmitida, las áreas de menos grosor son traslúcidas total o parcialmente, evidenciándose un color marrón-rojizo.	
Negros / Oscuros	Color oscuro generadas por sobrecalentamientos. En la superficie se detectan irisaciones y colores de oxidación severa.	
Corrosión	Son óxidos de un tamaño inferior a 1 micrómetro, al producirse sobre la superficie de los materiales afectados reacciones químicas o electroquímicas, bien por la presencia de gases o líquidos especialmente reactivos, o bien por la aparición de pares galvánicos entre dos materiales distintos.	
PARTÍCULAS CONTAMINANTES Y DE DEGRADACIÓN DEL ACEITE		
Polímeros de fricción y de degradación.	Los polímeros de fricción presentan un aspecto cristalino, son debidos a la degradación del lubricante en zonas de elevadas presiones. Los polímeros de degradación presentan un aspecto amorfo, como geles, originados por procesos oxidativos del aceite y catalizados por la presencia de agua, aireación, elevadas temperaturas y partículas metálicas en suspensión.	
Polvo ambiental	Polvo de silicatos: son partículas brillantes, se asemejan a diminutos fragmentos de vidrio. Tienen una elevada dureza, que podría dañar las superficies lubricadas. Polvo calcáreo: partículas traslúcidas con aspecto terroso, en algunas ocasiones presentan brillos, tienen un poder abrasivo inferior a los silicatos.	
Fibras	Fibras de naturaleza orgánica: son curvadas, de diferentes colores, con los extremos desgarrados, los tratamientos térmicos las carboniza o funde. Fibras de naturaleza inorgánica: <i>Amianto</i> son partículas alargadas de un grosor generalmente inferior a 1 µm. <i>Fibra de vidrio:</i> son fibras largas y rectas, su grosor es de varios micrómetros.	

A.6. Procedencia de los Metales Existentes en el Lubricante.

METAL	ORIGEN
Aluminio (Al)	<i>Cojinetes. Pistones de MCIA. Algunos tipos de jaulas de rodamientos. Contaminación externa con polvo del ambiente.</i>
Antimonio (Sb)	<i>Aleaciones de cojinetes. Grasas lubricantes.</i>
Bario (Ba)	<i>Aditivos detergentes del lubricante. Fugas del circuito de refrigeración.</i>
Boro (B)	<i>Aditivo del lubricante. Trazas de inhibidores del refrigerante (tetraborato de sodio). Polvo ambiental.</i>
Calcio (Ca)	<i>Aditivo detergente del lubricante.</i>
Cobre (Cu)	<i>Cojinetes (Cu-Pb, Sn-Cu). Entrada de fluido refrigerante (radiadores de cobre). Enfriadores de lubricante.</i>
Cromo (Cr)	<i>Segmentos, camisas, pistones. Barras de válvulas. Inhibidores de corrosión del refrigerante (cromatos de sodio o de potasio)</i>
Estaño (Sn)	<i>Cojinetes (Pb-Sn, Cu-Sn, Al-Sn). Conductos del lubricante. Sellos y restos de soldaduras.</i>
Fósforo (P)	<i>Aditivo antidesgaste y antioxidante del lubricante. Fuga de agua de refrigeración.</i>
Hierro (Fe)	<i>Segmentos y camisas de cilindros. Levas y balancines. Engranajes y cadenas. Apoyos y muñequillas del cigüeñal.</i>
Magnesio (Mg)	<i>Aditivos detergentes del lubricante. Entrada de agua de mar.</i>
Manganeso (Mn)	<i>Válvulas. Sistemas de admisión y escape.</i>
Molibdeno (Mo)	<i>Pistones y segmentos. Aditivo antifricción de grasas y lubricantes (MoS₂).</i>
Níquel (Ni)	<i>Cilindros. Elementos de la distribución. Álabes de turbinas.</i>
Plata (Ag)	<i>Recubrimiento de cojinetes. Dientes de engranajes con recubrimientos antifricción.</i>
Plomo (Pb)	<i>Cojinetes. Aditivo del lubricante. Trazas de contaminación por gasolina. Restos de pinturas.</i>
Silicio (Si)	<i>Polvo atmosférico (SiO₂) Camisas de fundición. Aditivos antiespumantes del lubricante. Inhibidores de corrosión del agua de refrigeración. Restos de pastas de juntas y tubos (siliconas).</i>

ANEXO B.

Ensayos Análisis de Imágenes.

Índice

B.1. Introducción.	165.
B.2. Estudio de Formas Básicas.	165.
B.3. Estudio de Formas Complejas.	170.
B.4. Análisis de Partículas de Corte.	173.

B.1. Introducción.

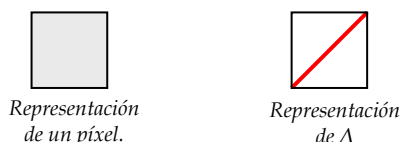
El objetivo de este apartado es recoger algunos de los resultados de los ensayos y cálculos llevados a cabo durante la realización de los ensayos para el empleo del programa informático de dibujo y análisis de imagen Scion®.

Se realiza inicialmente un estudio del reconocimiento de formas básicas para posteriormente finalizar con un análisis de formas complejas, con ejemplos de partículas de corte.

B.2. Estudio de Formas Básicas.

En primer lugar se han realizado ensayos con formas básicas para conocer la forma de calcular la superficie, el perímetro y el ajuste a elipses del programa Scion Image.

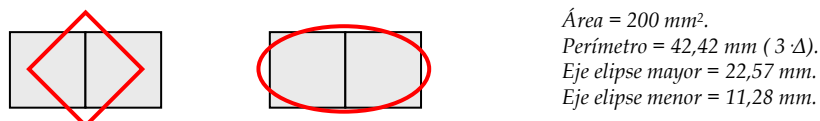
Han sido consideradas figuras compuestas por uno o varios píxeles, los cuales se representan en el papel por cuadros grises de 10 mm de lado. Junto a cada dibujo se ha trazado el perímetro y la elipse dados por el programa informático. Para el cálculo del perímetro se ha empleado una unidad básica, Δ , de 14,142 mm de longitud y equivalente a la diagonal del cuadrado.



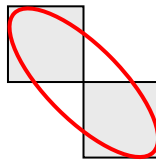
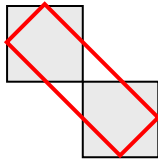
F-1 (cuadrado)



F-2 (dos cuadrados unidos por un lado)

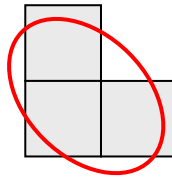
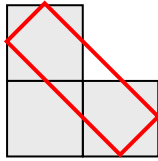


F-3 (dos cuadrados unidos por un vértice).



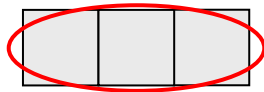
Área = 200 mm^2 .
 Perímetro = $56,57 \text{ mm}$ ($4 \cdot \Delta$).
 Eje elipse mayor = $25,96 \text{ mm}$.
 Eje elipse menor = $9,81 \text{ mm}$.

F-4 (tres cuadrados unidos por los lados formando un ángulo).



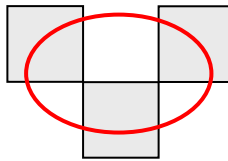
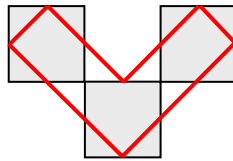
Área = 300 mm^2 .
 Perímetro = $56,57 \text{ mm}$ ($4 \cdot \Delta$).
 Eje elipse mayor = $23,65 \text{ mm}$.
 Eje elipse menor = $16,15 \text{ mm}$.

F-5 (tres cuadrados alineados unidos por sus lados).



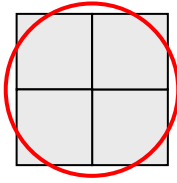
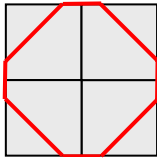
Área = 300 mm^2 .
 Perímetro = $68,28 \text{ mm}$ ($2 \cdot \Delta + 4 \cdot L$).
 Eje elipse mayor = $33,85 \text{ mm}$.
 Eje elipse menor = $11,28 \text{ mm}$.

F-6 (tres cuadrados unidos por los vértices).



Área = 300 mm^2 .
 Perímetro = $84,85 \text{ mm}$ ($2 \cdot \Delta$).
 Eje elipse mayor = $24,46 \text{ mm}$.
 Eje elipse menor = $15,61 \text{ mm}$.

F-7 (cuatro cuadrados formando un cuadrado compacto).



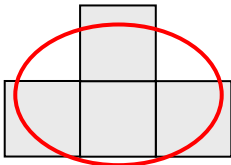
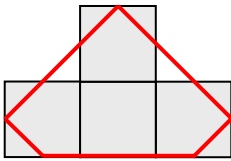
Área = 400 mm^2 .
Perímetro = $62,42 \text{ mm}$ ($2 \cdot \Delta + 2 \cdot L$).
Eje elipse mayor = $22,57 \text{ mm}$.
Eje elipse menor = $22,57 \text{ mm}$.

F-8 (cuatro cuadrados alineados unidos por sus lados).



Área = 400 mm^2 .
Perímetro = $88,28 \text{ mm}$ ($2 \cdot \Delta + 6 \cdot L$).
Eje elipse mayor = $45,14 \text{ mm}$.
Eje elipse menor = $11,28 \text{ mm}$.

F-9 (cuatro cuadrados unidos formando una punta de flecha).



Área = 400 mm^2 .
Perímetro = $76,57 \text{ mm}$ ($4 \cdot \Delta + 2 \cdot L$).
Eje elipse mayor = $27,34 \text{ mm}$.
Eje elipse menor = $18,63 \text{ mm}$.

Imagen	Área real (mm ²)	Área calculada (mm ²)	Perimetro real (mm)	Perimetro calculado (cm)	Error	Eje Mayor (mm)	Eje menor (mm)
F1	100	100	40,00	28,28	29,3%	11,28	11,28
F2	200	200	60,00	42,42	29,3%	22,57	11,28
F3	200	200	80,00	56,57	29,3%	25,96	9,81
F4	300	300	80,00	56,57	29,3%	23,65	16,15
F5	300	300	80,00	68,28	14,7%	33,85	11,28
F6	300	300	120,00	84,85	29,3%	24,46	15,61
F7	400	400	80,00	62,42	22,0%	22,57	22,57
F8	400	400	100,00	88,28	11,7%	45,14	11,28
F9	400	400	100,00	76,57	23,4%	27,34	18,63

Tabla B.1. Resultado del análisis de formas básicas.

Se observa claramente que el programa de análisis de imagen cuantifica con exactitud la superficie de las partículas trazadas. No presenta la misma exactitud en la determinación del perímetro de la partícula, dado que tiende a obtener perímetros inferiores en todos los casos, y en algunos casos con un error próximo al 30%, tal y como se muestra en la tabla B.1, la causa de esta diferencia en los valores radica en el proceso de ajuste perimetral que realiza el programa en vértices, suavizando las aristas, por tanto cuanto más irregular sea el contorno del cuerpo estudiado mayor será el error cometido en el cálculo del perímetro, dicho error será como máximo del 29,3%, que es el caso más desfavorable de ajuste.

Los valores de ajuste de la superficie y morfología de la partícula a una elipse pueden ser de gran utilidad para saber si el cuerpo es equiaxial o alargado, predominando una dimensión sobre la otra.

B.3. Estudio de Formas Complejas.

Se han creado once cuerpos de diferentes formas pero con la particularidad de que todos poseen la misma superficie, 64 píxeles, que se han considerado equivalentes a 64 mm² para simplificar los cálculos. Las partículas creadas para este estudio son las siguientes:

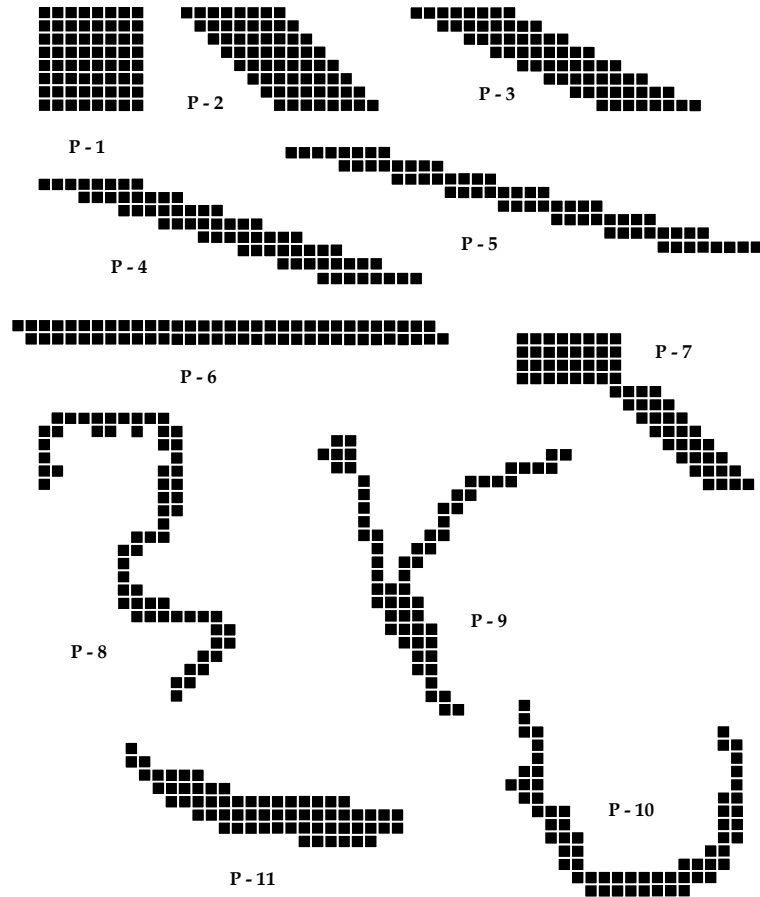


Imagen	Área real (mm ²)	Área calculada (mm ²)	Perímetro real (mm)	Perímetro calculado (mm)	Error	Eje Mayor (mm)	Eje menor (mm)
P1	64	64	32,00	30,24	5,5%	9,03	9,03
P2	64	64	46,00	36,63	20,4%	14,48	5,63
P3	64	64	60,00	50,63	15,6%	21,33	3,82
P4	64	64	74,00	64,63	12,7%	28,66	2,84
P5	64	64	88,00	78,63	10,6%	35,92	2,27
P6	64	64	70,00	67,66	3,3%	36,15	2,25
P7	64	64	60,00	48,87	18,6%	19,10	4,27
P8	64	64	105,00	89,15	15,1%	14,38	5,67
P9	64	64	109,00	86,33	20,8%	10,75	7,58
P10	64	64	92,00	75,60	17,8%	11,39	7,15
P11	64	64	58,00	49,21	15,2%	20,66	3,94

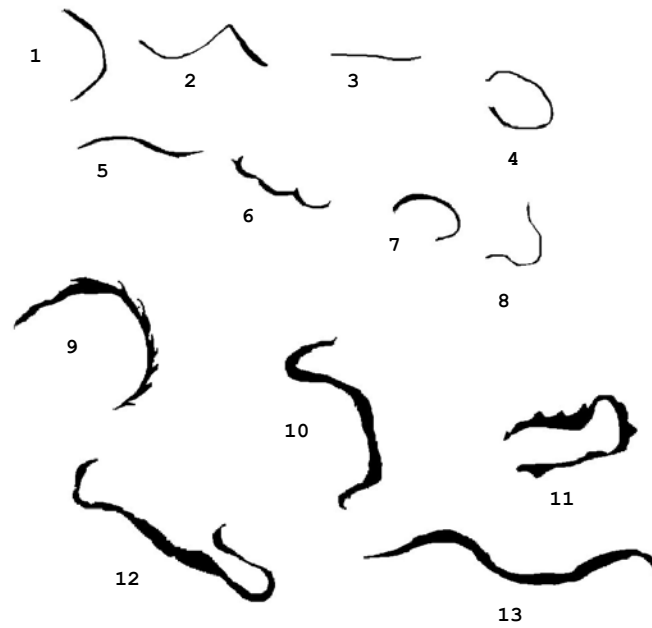
Tabla B.2. Resultado del análisis de formas complejas.

Los resultados del análisis (tabla B.2) muestran cómo el programa determina con total exactitud el área de las partículas, mientras que el perímetro sigue siendo evaluado con error tal y como se comentaba en el apartado anterior, claramente, las partículas con superficie más roma son las que mejor ajuste muestran.

Es clara la variación de longitudes de los ejes de la elipse en función de la forma de la partícula, las partículas equiaxiales tienen ambos ejes de longitud similar mientras que los cuerpos alargados tienen ejes de valores muy diferentes.

Ante las observaciones realizadas se decide someter a análisis ejemplos de los diferentes tipos de partículas de contaminación y desgaste para extraer las características propias de cada grupo en aras de una posterior caracterización de partículas reales aisladas del lubricante.

B.4. Análisis de Partículas de Corte.



#	Área	Densidad	Perímetro	Eje Mayor	Eje Menor	Esferic.	Regular.
1	930,00	255,0	403,63	57,51	20,59	0,36	0,27
2	1094,00	255,0	516,14	71,75	19,41	0,27	0,23
3	414,00	255,0	282,53	118,72	4,44	0,04	0,26
4	958,00	255,0	541,29	37,90	32,18	0,85	0,20
5	1062,00	255,0	420,59	106,49	12,70	0,12	0,27
6	1159,00	255,0	417,75	106,40	13,87	0,13	0,29
7	1016,00	255,0	382,78	52,96	24,43	0,46	0,30
8	476,00	255,0	373,08	29,60	20,48	0,69	0,21
9	4762,00	255,0	1079,89	105,21	57,63	0,55	0,23
10	5603,00	255,0	901,01	144,85	49,25	0,34	0,29
11	5839,00	255,0	991,54	116,18	63,99	0,55	0,27
12	6875,00	255,0	1243,95	223,49	39,17	0,18	0,24
13	6689,00	255,0	1075,48	227,05	37,51	0,17	0,27

ANEXO C.

Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Índice

C.1. Introducción.	161.
C.2. Hojas de Resultados.	162.

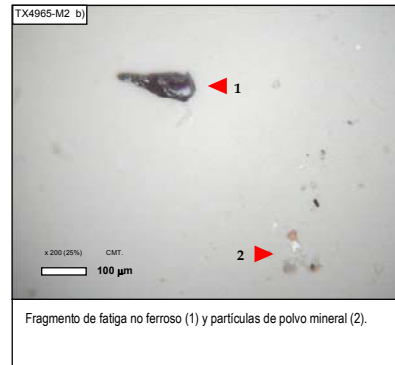
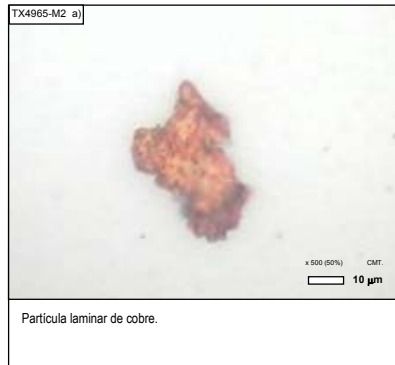
B.1. Introducción.

En este anexo se muestran las hojas de resultados detalladas de las muestras comentadas en el capítulo 6 y que para mejorar la claridad de la presentación de los trabajos, han sido agrupadas en este anexo.

Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		104965 M-1		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite: D
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			

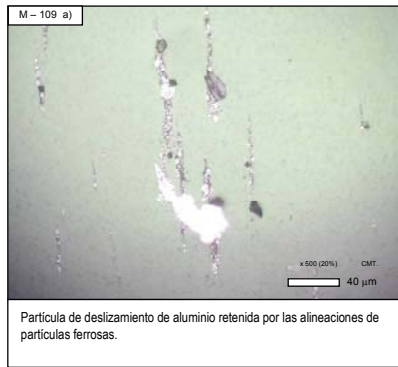
		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Ferrosas	No Ferrosas						
Normal	Normal						
Desgaste adhesivo.							
	Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo		
	Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		
Normal	Normal						
Desgaste por fatiga.							
	Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo		
	Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Bajo		
	Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo				
Normal	Normal						
Desgaste Abrasivo.							
	Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		
	Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		
Normal	Normal						
Óxidos ferrosos.							
	Rojos (humedad)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo				
	Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo				
	Corrosión química	< 1	Nulo				
Contaminantes.							
	Polímeros de fricción.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo				
	Polvo mineral.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo				
	Fibras.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Bajo				
Normal	Normal						



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.














Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-109 XX52245		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

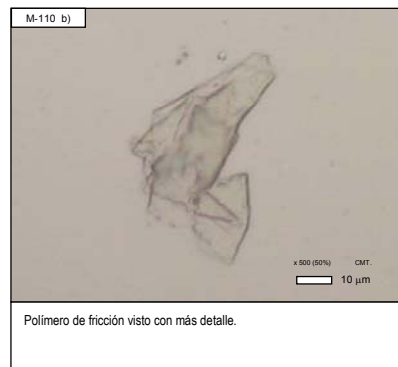
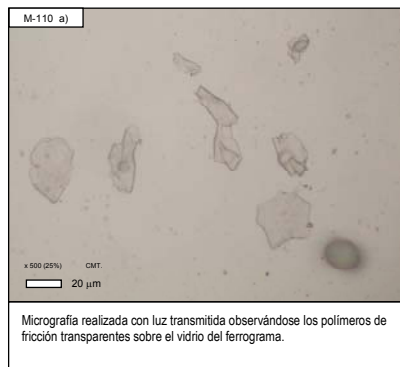
		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
		Desgaste adhesivo.		Óxidos ferrosos.			
			1 + 15 Medio		20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo		
			15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo		20 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo		
		Desgaste por fatiga.		Contaminantes.			
			15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo		20 + 50 Bajo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo		
			15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo		20 + 50 Medio 50 + 100 Medio > 100 Medio		
			1 + 15 Nulo 15 + 50 Nulo > 50 Nulo		20 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Bajo		
		Desgaste Abrasivo.					
			15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo				
			15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo				



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-110 XX39347		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

		Ferrosas		No ferrosas				
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.		
		 Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo	 Rojos (humedad)	
							20 + 50 50 + 100 > 100	
		 Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	 Oscuros (alta temperatura)	
							20 + 50 50 + 100 > 100	
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química		
		 Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Nulo	 Corrosión química	
							< 1	
		 Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Contaminantes.	
							 Polímeros de fricción.	
		 Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	 Polvo mineral.	
							20 + 50 50 + 100 > 100	
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Fibras.		
		 Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	 Fibras.	
							20 + 50 50 + 100 > 100	
		 Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Otros.	
							20 + 50 50 + 100 > 100	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-111 XX33495		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		Fricción normal.	1 + 15 Medio	3 + 15 Bajo	Rojos (humedad)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		Fricción deslizante.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.	
		Laminares.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	Corrosión química	< 1 Nulo	
		Fragmentos.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Contaminantes.		
		Esferas.	1 + 15 Nulo 15 + 50 Nulo > 50 Nulo		Polímeros de fricción.	20 + 50 Medio 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Polvo mineral.	
		Entre dos cuerpos.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Fibras.	20 + 50 Nulo 50 + 100 Medio > 100 Bajo	
		Entre tres cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Otros.	20 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra: M-112 XX458146	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

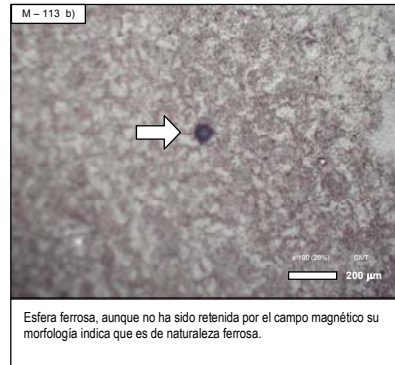
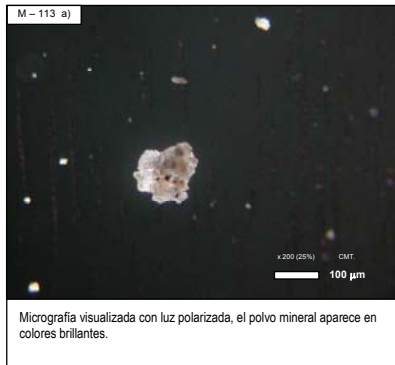
		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
			Fricción normal.	1 + 15	Medio	3 + 15	Bajo
			Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
		Desgaste por fatiga.				Contaminantes.	
			Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Bajo Nulo
			Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo		
		Desgaste Abrasivo.				Polímeros de fricción.	
			Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	20 + 50 50 + 100 > 100	Medio Nulo Nulo
			Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	20 + 50 50 + 100 > 100	Medio Medio Bajo
						20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
						20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-113 XX22453		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite: D
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			

		Ferrosas		No ferrosas				
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	
		Desgaste adhesivo.						
			1 + 15	Medio	3 + 15	Bajo		
			15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Bajo Nulo		
		Desgaste por fatiga.						
			15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Nulo		
			15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		
			1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Bajo Nulo				
		Desgaste Abrasivo.						
			15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		
			15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		
		Óxidos ferrosos.						
			20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo				
			20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo				
			< 1	Medio				
		Contaminantes.						
			20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo				
			20 + 50 50 + 100 > 100	Alto Medio Bajo				
			20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Medio Bajo				
			20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo				



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-114 XX07657		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

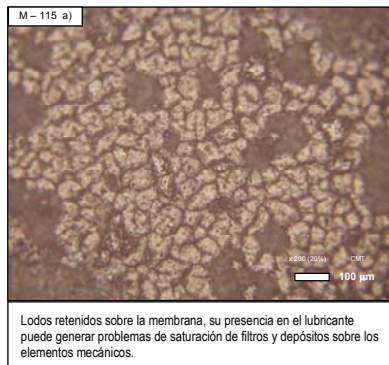
		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo	Rojos (humedad)
							20 + 50 50 + 100 > 100
		Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Bajo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Bajo Nulo	Oscuros (alta temperatura)
							20 + 50 50 + 100 > 100
Alerta	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.	
		Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Nulo	< 1
		Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
		Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Medio Medio Nulo			
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Contaminantes.	
		Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Polímeros de fricción.
							20 + 50 50 + 100 > 100
		Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Polvo mineral.
							20 + 50 50 + 100 > 100
							Fibras.
							20 + 50 50 + 100 > 100
							Otros.
							20 + 50 50 + 100 > 100



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.














Cliente: D		Código muestra: M-115 XX39346	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

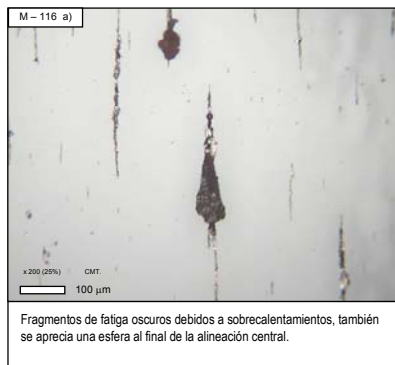
		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
Normal	Normal	Fricción normal.		1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo
		Fricción deslizante.		15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
		Desgaste por fatiga.				Contaminantes.	
Normal	Normal	Laminares.		15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
		Fragmentos.		15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
		Esferas.		1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo		
		Desgaste Abrasivo.				Corrosión química	
Normal	Normal	Entre dos cuerpos.		15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
		Entre tres cuerpos.		15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
						< 1	Bajo
						Polímeros de fricción.	
						20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo
						20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo
						20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Bajo
						Lodos en concentración elevada.	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-116 XX35414		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

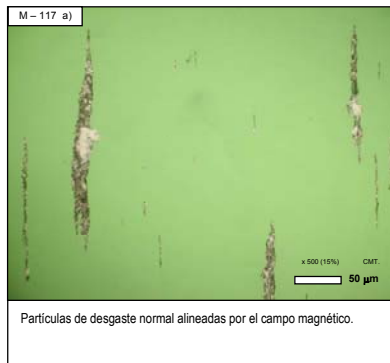
		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		 Fricción normal.	1 + 15 Medio	3 + 15 Bajo	 Rojos (humedad)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		 Fricción deslizante.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.	
		 Laminares.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	 Corrosión química	< 1 Nulo	
		 Fragmentos.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Contaminantes.		
		 Esferas.	1 + 15 Nulo 15 + 50 Bajo > 50 Nulo		 Polímeros de fricción.	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Polvo mineral.	
		 Entre dos cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Polvo mineral.	20 + 50 Medio 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		 Entre tres cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Fibras.	20 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Bajo	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.














Cliente: D		Código muestra: M-117 XX26895	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

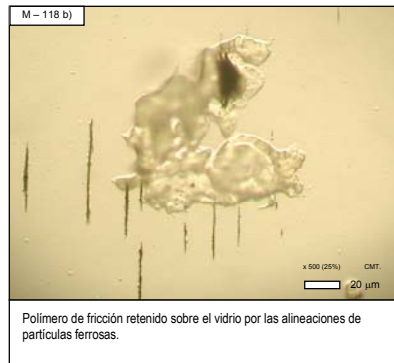
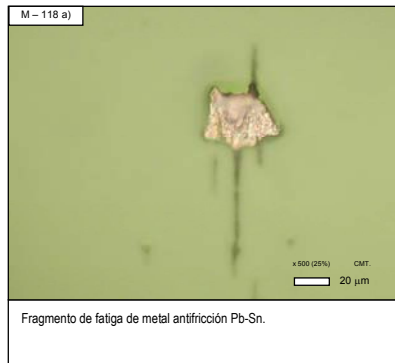
		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
			1 + 15 Medio	3 + 15	Bajo		20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo
			15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo			20 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo
		Desgaste por fatiga.				Corrosión química	
			15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo			< 1 Bajo
			15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo		Contaminantes.	
			1 + 15 Nulo 15 + 50 Nulo > 50 Nulo				20 + 50 Alto 50 + 100 Bajo > 100 Nulo
		Desgaste abrasivo.					
			15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo			20 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Bajo
			15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo			



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.








Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-118 XX22414		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

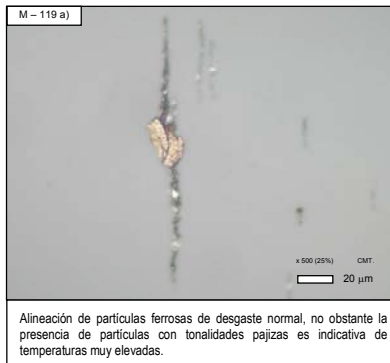
		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		 Fricción normal.	1 + 15 Medio	3 + 15 Bajo	 Rojos (humedad)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		 Fricción deslizante.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.	
		 Laminares.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Corrosión química	< 1 Bajo	
		 Fragmentos.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Contaminantes.		
		 Esferas.	1 + 15 Nulo 15 + 50 Nulo > 50 Nulo		 Polímeros de fricción.	20 + 50 Bajo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste abrasivo.				Polvo mineral.	
		 Entre dos cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Polvo mineral.	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		 Entre tres cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Fibras.		
					 Fibras.	20 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-119 XX34842		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

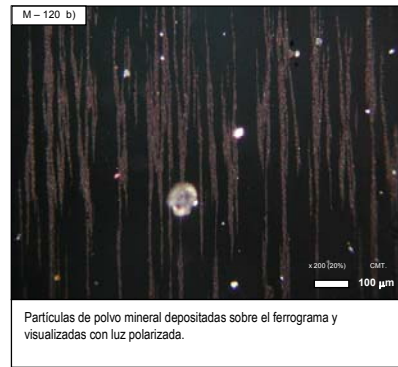
		Ferrosas		No ferrosas				
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.		
			Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo	
			Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Contaminantes.		
			Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
			Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Bajo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	
			Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo			
Normal	Normal	Desgaste abrasivo.				Polímeros de fricción.		
			Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
			Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
						Polvo mineral.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo
						Fibras.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Nulo
						Corrosión química.	< 1	Nulo



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra: M-120 XX12731	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
		Desgaste adhesivo.		Óxidos ferrosos.			
		Fricción normal.		Rojos (humedad)		Nulo	
		1 + 15	Alto	3 + 15	Alto	20 + 50	Nulo
						50 + 100	Nulo
						> 100	Nulo
		Fricción deslizante.		Oscuros (alta temperatura)		Nulo	
		15 + 50	Nulo	15 + 50	Medio	20 + 50	Nulo
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Bajo	50 + 100	Nulo
		> 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	Nulo
		Desgaste por fatiga.		Corrosión química.			
		Laminares.		< 1		Alto	
		15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo		
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo		
		> 100	Nulo	> 100	Nulo		
		Fragmentos.		Contaminantes.			
		15 + 50	Bajo	15 + 50	Medio	Polímeros de fricción.	
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Bajo	20 + 50	
		> 100	Nulo	> 100	Nulo	50 + 100	
		Esferas.		Polvo mineral.		20 + 50	
		1 + 15	Nulo	15 + 50	Medio	50 + 100	
		15 + 50	Bajo	50 + 100	Medio	50 + 100	
		> 50	Nulo	> 100	Nulo	> 100	
		Desgaste Abrasivo.		Fibras.			
		Entre dos cuerpos.		20 + 50		Nulo	
		15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	50 + 100	
		50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	
		Entre tres cuerpos.		15 + 50		Nulo	
		15 + 50	Bajo	50 + 100	Nulo	50 + 100	
		50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.













Cliente: D		Código muestra: M-400 XX19291	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

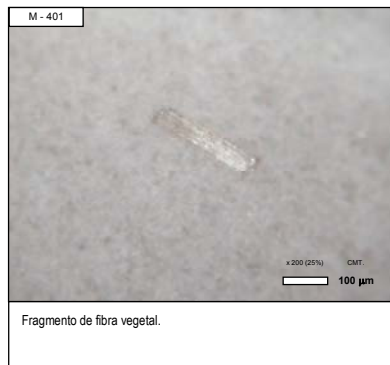
		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
			Fricción normal.	1 + 15	Medio	3 + 15	Bajo
			Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
		Desgaste por fatiga.				Contaminantes.	
			Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo		
		Desgaste Abrasivo.				Polímeros de fricción.	
			Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo
			Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Nulo
						Corrosión química	< 1 Medio
						Polvo mineral	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo
						Fibras	20 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-401 XX21541		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

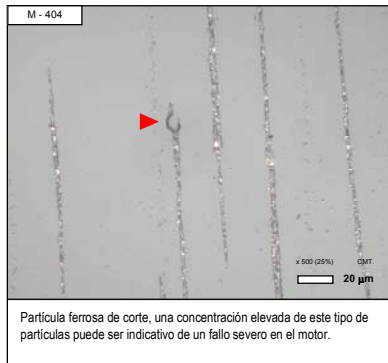
		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
			Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo
			Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Contaminantes.	
			Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo		
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Corrosión química.	
			Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Rojos (humedad)	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo		
			Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo		
			Polímeros de fricción.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo		
			Polvo mineral.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo		
			Fibras.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Bajo Bajo		



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-401 XX21651		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

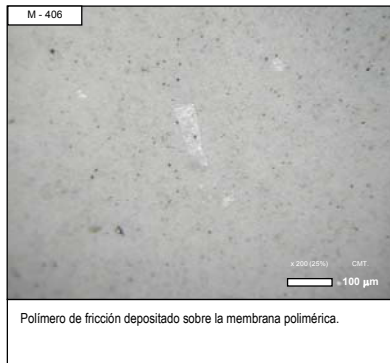
		Ferrosas		No ferrosas										
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas							
<table border="0"> <tr> <td>Ferrosas</td> <td>No Ferrosas</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>Normal</td> </tr> </table>		Ferrosas	No Ferrosas			Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.		
Ferrosas	No Ferrosas													
Normal	Normal													
			Fricción normal.	1 + 15	Medio	3 + 15	Bajo		Rojos (humedad)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Normal		
			Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo			
<table border="0"> <tr> <td>Ferrosas</td> <td>No Ferrosas</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>Normal</td> </tr> </table>		Ferrosas	No Ferrosas			Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.		
Ferrosas	No Ferrosas													
Normal	Normal													
			Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Corrosión química	< 1	Bajo			
			Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Contaminantes.				Normal		
			Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo				Polímeros de fricción.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo			
<table border="0"> <tr> <td>Ferrosas</td> <td>No Ferrosas</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>Normal</td> </tr> </table>		Ferrosas	No Ferrosas			Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Polvo mineral.		
Ferrosas	No Ferrosas													
Normal	Normal													
			Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Polvo mineral.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo			
			Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Fibras.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Nulo			



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra: M-406 XX15360	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

		Ferrosas		No ferrosas								
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas					
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.						
			Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo		Rojos (humedad)	20 + 50	Bajo	
										50 + 100	Nulo	
										> 100	Nulo	
			Fricción deslizante.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo		Oscuros (alta temperatura)	20 + 50	Nulo	
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo			50 + 100	Nulo	
				> 100	Nulo	> 100	Nulo		Corrosión química	< 1	Nulo	
		Desgaste por fatiga.				Contaminantes.						
			Laminares.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo		Polímeros de fricción.	20 + 50	Bajo	
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo			50 + 100	Bajo	
				> 100	Nulo	> 100	Nulo		Polvo mineral.	20 + 50	Bajo	
			Fragmentos.	15 + 50	Bajo	15 + 50	Nulo			50 + 100	Nulo	
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo		Fibras.	20 + 50	Nulo	
				> 100	Nulo	> 100	Nulo			50 + 100	Bajo	
			Esferas.	1 + 15	Nulo	1 + 15	Nulo			> 100	Nulo	
				15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo					
				> 50	Nulo	> 50	Nulo					
		Desgaste Abrasivo.										
			Entre dos cuerpos.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo					
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo					
				> 100	Nulo	> 100	Nulo					
			Entre tres cuerpos.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo					
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo					
				> 100	Nulo	> 100	Nulo					



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-407 XX07753		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

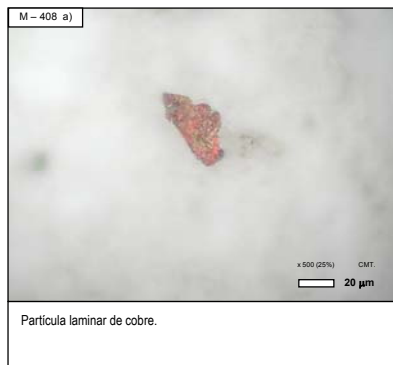
		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		1 + 15	Medio	3 + 15	Bajo	20 + 50	Nulo
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
		> 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	Nulo
		Desgaste por fatiga.				Contaminantes.	
		15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo	20 + 50	Bajo
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
		> 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	Nulo
		1 + 15	Nulo	15 + 50	Bajo	20 + 50	Bajo
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
		> 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	Nulo
		1 + 15	Nulo	15 + 50	Nulo	20 + 50	Nulo
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
		> 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	Nulo
		Desgaste Abrasivo.					
		15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo		
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo		
		> 100	Nulo	> 100	Nulo		
		15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo		
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo		
		> 100	Nulo	> 100	Nulo		



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-408 XX17049		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

		Ferrosas		No ferrosas																						
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas																			
<table border="0"> <tr> <td>Ferrosas</td> <td>No Ferrosas</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>Normal</td> </tr> </table>		Ferrosas	No Ferrosas			Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.														
Ferrosas	No Ferrosas																									
Normal	Normal																									
Fricción normal.		1 + 15	Medio	3 + 15	Bajo	Rojos (humedad)	<table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	20 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo													
20 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
Fricción deslizante.		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Bajo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo		Oscuros (alta temperatura)	<table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	20 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	
15 + 50	Bajo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
15 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
20 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
Desgaste por fatiga.						Corrosión química	< 1	Nulo																		
Laminares.		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Nulo	50 + 100	Bajo	> 100	Nulo		Contaminantes.								
15 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
15 + 50	Nulo																									
50 + 100	Bajo																									
> 100	Nulo																									
Fragmentos.		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Bajo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo		Polímeros de fricción.	<table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Bajo</td></tr> </table>	20 + 50	Bajo	50 + 100	Nulo	> 100	Bajo	
15 + 50	Bajo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
15 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
20 + 50	Bajo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Bajo																									
Esferas.		<table border="1"> <tr><td>1 + 15</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 50</td><td>Nulo</td></tr> </table>	1 + 15	Bajo	15 + 50	Nulo	> 50	Nulo				Polvo mineral.	<table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Medio</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Medio</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	20 + 50	Medio	50 + 100	Medio	> 100	Nulo							
1 + 15	Bajo																									
15 + 50	Nulo																									
> 50	Nulo																									
20 + 50	Medio																									
50 + 100	Medio																									
> 100	Nulo																									
Desgaste Abrasivo.						Fibras.	<table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Bajo</td></tr> </table>	20 + 50	Nulo	50 + 100	Bajo	> 100	Bajo													
20 + 50	Nulo																									
50 + 100	Bajo																									
> 100	Bajo																									
Entre dos cuerpos.		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo										
15 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
15 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
Entre tres cuerpos.		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo		<table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>	15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo										
15 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									
15 + 50	Nulo																									
50 + 100	Nulo																									
> 100	Nulo																									



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.














Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-409 XX21542		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

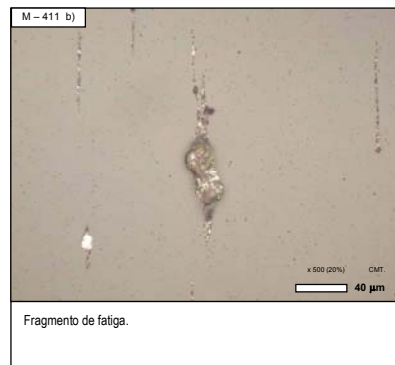
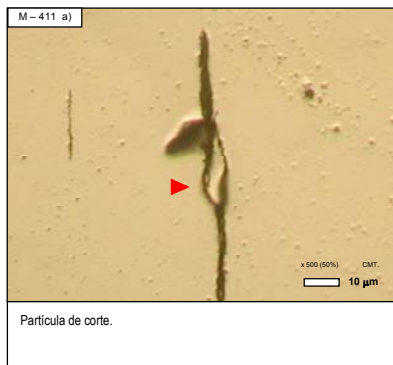
		Ferrosas		No ferrosas																													
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas																										
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.																											
		Fricción normal. <table border="1"> <tr><td>1 + 15</td><td>Medio</td></tr> </table>		1 + 15	Medio	Fricción deslizando. <table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>		15 + 50	Bajo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	Rojos (humedad) <table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>		20 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	Oscuros (alta temperatura) <table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>		20 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo				
1 + 15	Medio																																
15 + 50	Bajo																																
50 + 100	Nulo																																
> 100	Nulo																																
20 + 50	Nulo																																
50 + 100	Nulo																																
> 100	Nulo																																
20 + 50	Nulo																																
50 + 100	Nulo																																
> 100	Nulo																																
		Desgaste por fatiga.																															
		Laminares. <table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>		15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	Fragmentos. <table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>		15 + 50	Bajo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	Corrosión química <table border="1"> <tr><td>< 1</td><td>Nulo</td></tr> </table>		< 1	Nulo												
15 + 50	Nulo																																
50 + 100	Nulo																																
> 100	Nulo																																
15 + 50	Bajo																																
50 + 100	Nulo																																
> 100	Nulo																																
< 1	Nulo																																
		Desgaste Abrasivo.				Contaminantes.																											
		Entre dos cuerpos. <table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>		15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	Entre tres cuerpos. <table border="1"> <tr><td>15 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>		15 + 50	Nulo	50 + 100	Nulo	> 100	Nulo	Polímeros de fricción. <table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Bajo</td></tr> </table>		20 + 50	Bajo	50 + 100	Nulo	> 100	Bajo	Polvo mineral. <table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Medio</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Medio</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Nulo</td></tr> </table>		20 + 50	Medio	50 + 100	Medio	> 100	Nulo
15 + 50	Nulo																																
50 + 100	Nulo																																
> 100	Nulo																																
15 + 50	Nulo																																
50 + 100	Nulo																																
> 100	Nulo																																
20 + 50	Bajo																																
50 + 100	Nulo																																
> 100	Bajo																																
20 + 50	Medio																																
50 + 100	Medio																																
> 100	Nulo																																
						Fibras. <table border="1"> <tr><td>20 + 50</td><td>Nulo</td></tr> <tr><td>50 + 100</td><td>Bajo</td></tr> <tr><td>> 100</td><td>Bajo</td></tr> </table>		20 + 50	Nulo	50 + 100	Bajo	> 100	Bajo																				
20 + 50	Nulo																																
50 + 100	Bajo																																
> 100	Bajo																																



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.















Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-411 XX19055		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		 Fricción normal.	1 + 15 Medio	3 + 15 Medio	 Rojos (humedad)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		 Fricción deslizante.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.	
		 Laminares.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Corrosión química	< 1 Bajo	
		 Fragmentos.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Contaminantes.		
		 Esferas.	1 + 15 Nulo 15 + 50 Nulo > 50 Nulo		 Polímeros de fricción.	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Polvo mineral.	
		 Entre dos cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Polvo mineral.	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		 Entre tres cuerpos.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Fibras.	20 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra: M-412 XX16464	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

		Ferrosas		No ferrosas				
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.		
		 Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo	 Rojos (humedad)	
							20 + 50 50 + 100 > 100	
		 Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	 Oscuros (alta temperatura)	
							20 + 50 50 + 100 > 100	
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.		
		 Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	 Corrosión química	
							< 1	
		 Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Contaminantes.	
							 Polímeros de fricción.	
		 Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	 Polvo mineral.	
							20 + 50 50 + 100 > 100	
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				 Fibras.		
		 Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	 Fibras.	
							20 + 50 50 + 100 > 100	
		 Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-416 XX16657		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

		Ferrosas		No ferrosas																																																																
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas																																																													
<table border="0"> <tr> <td>Ferrosas</td> <td>No Ferrosas</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>Normal</td> </tr> </table>		Ferrosas	No Ferrosas			Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.																																																								
Ferrosas	No Ferrosas																																																																			
Normal	Normal																																																																			
			Fricción normal.	1 + 15	Medio	3 + 15	Bajo	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Rojos (humedad)</td> <td>20 + 50</td> <td>Bajo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>50 + 100</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>> 100</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Oscuros (alta temperatura)</td> <td>20 + 50</td> <td>Bajo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>50 + 100</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>> 100</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Corrosión química</td> <td>< 1</td> <td>Medio</td> </tr> </table>		Rojos (humedad)	20 + 50	Bajo			50 + 100	Nulo			> 100	Nulo		Oscuros (alta temperatura)	20 + 50	Bajo			50 + 100	Nulo			> 100	Nulo		Corrosión química	< 1	Medio																																
	Rojos (humedad)	20 + 50	Bajo																																																																	
		50 + 100	Nulo																																																																	
		> 100	Nulo																																																																	
	Oscuros (alta temperatura)	20 + 50	Bajo																																																																	
		50 + 100	Nulo																																																																	
		> 100	Nulo																																																																	
	Corrosión química	< 1	Medio																																																																	
			Fricción deslizante.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo																																																													
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo																																																													
				> 100	Nulo	> 100	Nulo																																																													
<table border="0"> <tr> <td>Ferrosas</td> <td>No Ferrosas</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Normal</td> <td>Normal</td> </tr> </table>		Ferrosas	No Ferrosas			Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Contaminantes.																																																								
Ferrosas	No Ferrosas																																																																			
Normal	Normal																																																																			
			Laminares.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Polímeros de fricción.</td> <td>20 + 50</td> <td>Bajo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>50 + 100</td> <td>Bajo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>> 100</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fragmentos.</td> <td>15 + 50</td> <td>Nulo</td> <td>15 + 50</td> <td>Nulo</td> <td>15 + 50</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>50 + 100</td> <td>Nulo</td> <td>50 + 100</td> <td>Nulo</td> <td>50 + 100</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>> 100</td> <td>Nulo</td> <td>> 100</td> <td>Nulo</td> <td>> 100</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Esferas.</td> <td>1 + 15</td> <td>Nulo</td> <td>1 + 15</td> <td>Nulo</td> <td>1 + 15</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>15 + 50</td> <td>Nulo</td> <td>15 + 50</td> <td>Nulo</td> <td>15 + 50</td> <td>Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>> 50</td> <td>Nulo</td> <td>> 50</td> <td>Nulo</td> <td>> 50</td> <td>Nulo</td> </tr> </table>		Polímeros de fricción.	20 + 50	Bajo			50 + 100	Bajo			> 100	Nulo		Fragmentos.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo			50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo			> 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	Nulo		Esferas.	1 + 15	Nulo	1 + 15	Nulo	1 + 15	Nulo			15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo			> 50	Nulo	> 50	Nulo	> 50	Nulo
	Polímeros de fricción.	20 + 50	Bajo																																																																	
		50 + 100	Bajo																																																																	
		> 100	Nulo																																																																	
	Fragmentos.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo																																																													
		50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo																																																													
		> 100	Nulo	> 100	Nulo	> 100	Nulo																																																													
	Esferas.	1 + 15	Nulo	1 + 15	Nulo	1 + 15	Nulo																																																													
		15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo																																																													
		> 50	Nulo	> 50	Nulo	> 50	Nulo																																																													
			Desgaste Abrasivo.																																																																	
			Entre dos cuerpos.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo																																																													
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo																																																													
				> 100	Nulo	> 100	Nulo																																																													
			Entre tres cuerpos.	15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo																																																													
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo																																																													
				> 100	Nulo	> 100	Nulo																																																													



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra: M-417 XX19295	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

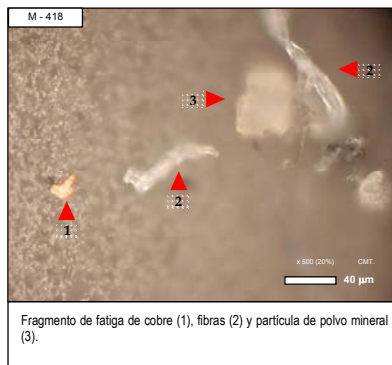
		Ferrosas		No ferrosas																																
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas																													
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.																														
		<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Fricción normal.</td> <td>1 + 15</td> <td>Medio</td> <td>3 + 15</td> <td>Medio</td> <td></td> <td>Rojos (humedad)</td> <td>20 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fricción deslizante.</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td></td> <td>Oscuros (alta temperatura)</td> <td>20 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> </tr> </table>					Fricción normal.	1 + 15	Medio	3 + 15	Medio		Rojos (humedad)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo											
	Fricción normal.	1 + 15	Medio	3 + 15	Medio		Rojos (humedad)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo																											
	Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo																											
		Desgaste por fatiga.				Contaminantes.																														
		<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Laminares.</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td></td> <td>Polímeros de fricción.</td> <td>20 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Medio Bajo Bajo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fragmentos.</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Bajo Nulo Nulo</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td></td> <td>Polvo mineral.</td> <td>20 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Bajo Nulo Nulo</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Esferas.</td> <td>1 + 15 15 + 50 > 50</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Fibras.</td> <td>20 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> </tr> </table>					Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Polímeros de fricción.	20 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Bajo		Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Polvo mineral.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo		Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo				Fibras.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
	Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Polímeros de fricción.	20 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Bajo																											
	Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo		Polvo mineral.	20 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo																											
	Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo				Fibras.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo																											
		Desgaste Abrasivo.																																		
		<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Entre dos cuerpos.</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Entre tres cuerpos.</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td>15 + 50 50 + 100 > 100</td> <td>Nulo Nulo Nulo</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>					Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo				Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo																	
	Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo																															
	Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo																															



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.














Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-418 XX19054		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		Fricción normal.	1 + 15 Medio	3 + 15	Bajo	Rojos (humedad)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo
		Fricción deslizante.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Nulo	Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.	
		Laminares.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Nulo	Corrosión química	< 1 Nulo
		Fragmentos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Nulo	Contaminantes.	
		Esferas.	1 + 15 Nulo 15 + 50 Nulo > 50 Nulo	1 + 15 Nulo 15 + 50 Nulo > 50 Nulo	Nulo	Polímeros de fricción.	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Polvo mineral.	
		Entre dos cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Nulo	Fibras.	20 + 50 Nulo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo
		Entre tres cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Nulo		



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		M-419 XX16658		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		 Fricción normal.	1 + 15 Medio	3 + 15 Bajo	 Rojos (humedad)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		 Fricción deslizante.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 Bajo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.	
		 Laminares.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Corrosión química	< 1 Bajo	
		 Fragmentos.	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	Contaminantes.		
		 Esferas.	1 + 15 Nulo 15 + 50 Nulo > 50 Nulo		 Polímeros de fricción.	20 + 50 Bajo 50 + 100 Bajo > 100 Nulo	
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Polvo mineral.	
		 Entre dos cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Polvo mineral.	20 + 50 Bajo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	
		 Entre tres cuerpos.	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	15 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	 Fibras.	20 + 50 Nulo 50 + 100 Nulo > 100 Nulo	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.






















Cliente: D			Código muestra: ROA-004 XX72317		
Equipo: D					
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D			
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N				

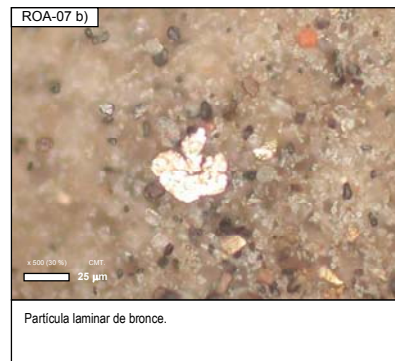
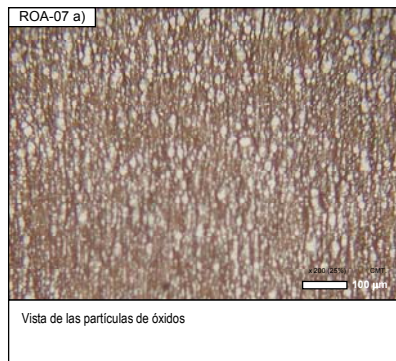
		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
			Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo
			Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
		Desgaste por fatiga.				Contaminantes.	
			Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo
		Desgaste Abrasivo.				Polímeros de fricción.	
			Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
			Polvos.	20 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Nulo	20 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Nulo
			Corrosión química.	< 1	Nulo	< 1	Nulo
			Fibras.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Bajo	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Bajo
			Otros.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		ROA - 007 XX69123		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite:
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			D

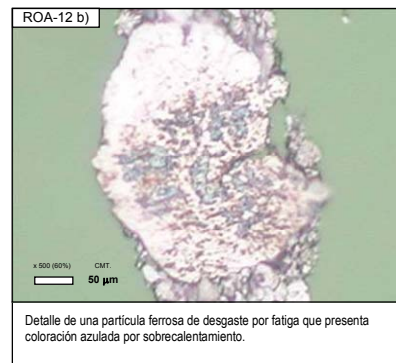
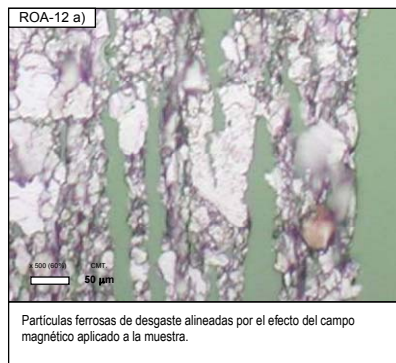
		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
 Alerta		Desgaste adhesivo.				 Alerta	
 Fricción normal.		1 + 15	Alto	3 + 15	Alto	 Rojos (humedad)	
 Fricción deslizante.		15 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Nulo	 Oscuros (alta temperatura)	
 Alarma		Desgaste por fatiga.				 Alarma	
 Laminares.		15 + 50 50 + 100 > 100	Alto Medio Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Alto Medio Bajo	 Corrosión química	
 Fragmentos.		15 + 50 50 + 100 > 100	Alto Medio Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Alto Medio Bajo	Contaminantes.	
 Esferas.		1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	 Normal	
 Normal		Desgaste Abrasivo.				 Normal	
 Entre dos cuerpos.		15 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	 Polímeros de fricción.	
 Entre tres cuerpos.		15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	 Polvo mineral.	
						 Fibras.	
						 Otros.	



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		ROA-012 XX72316		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite: D
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			

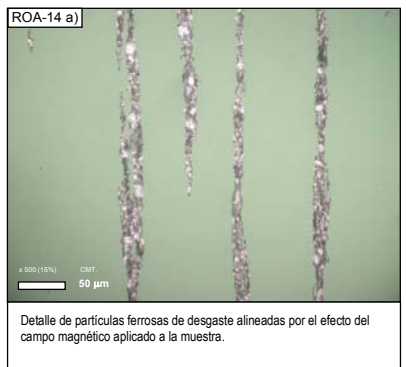
		Ferrosas		No ferrosas			
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
Alerta	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
		Fricción normal.	1 + 15	Alto	3 + 15	Bajo	
		Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
Alerta	Normal	Desgaste por fatiga.				Contaminantes.	
		Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
		Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
		Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo			
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Polímeros de fricción.	
		Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
		Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	
							Polvo mineral.
							20 + 50 50 + 100 > 100
							Fibras.
							20 + 50 50 + 100 > 100
							Otros.
							20 + 50 50 + 100 > 100



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra: ROA-014 XX72318	
Equipo: D			
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N	Tipo de aceite: D	
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N		

		Ferrosas		No ferrosas			
		Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas
		Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.	
Normal	Normal	Fricción normal.		1 + 15	Medio	3 + 15	Bajo
						20 + 50	Bajo
						50 + 100	Nulo
						> 100	Nulo
						20 + 50	Nulo
						50 + 100	Nulo
						> 100	Nulo
		Desgaste por fatiga.				Corrosión química.	
Normal	Normal	Laminares.		15 + 50	Nulo	15 + 50	Bajo
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
				> 100	Nulo	> 100	Nulo
				15 + 50	Bajo	15 + 50	Bajo
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
				> 100	Nulo	> 100	Nulo
				1 + 15	Nulo	1 + 15	Nulo
				15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo
				> 50	Nulo	> 50	Nulo
		Desgaste Abrasivo.				Contaminantes.	
Normal	Normal	Entre dos cuerpos.		15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
				> 100	Nulo	> 100	Nulo
				15 + 50	Nulo	15 + 50	Nulo
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
				> 100	Nulo	> 100	Nulo
				20 + 50	Bajo	20 + 50	Bajo
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
				> 100	Nulo	> 100	Nulo
				20 + 50	Nulo	20 + 50	Nulo
				50 + 100	Nulo	50 + 100	Nulo
				> 100	Nulo	> 100	Nulo



Anexo C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.

Cliente: D		Código muestra:		
Equipo: D		ROA-019 XX72314		
Fecha toma: DD / MM / AAAA	Km de aceite: N			Tipo de aceite: D
Fecha análisis: DD / MM / AAAA	Volumen Aceite: N			

		Ferrosas		No ferrosas					
Ferrosas	No Ferrosas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas	Tamaño medio [µm]	Contenido de partículas		
Normal	Normal	Desgaste adhesivo.				Óxidos ferrosos.			
		Fricción normal.	1 + 15	Bajo	3 + 15	Bajo	Rojos (humedad)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
		Fricción deslizante.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Oscuros (alta temperatura)	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo
Normal	Normal	Desgaste por fatiga.				Corrosión química.			
		Laminares.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	Corrosión química	< 1	Nulo
		Fragmentos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	Contaminantes.		
		Esferas.	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	1 + 15 15 + 50 > 50	Nulo Nulo Nulo	Polímeros de fricción.	20 + 50 50 + 100 > 100	Medio Bajo Nulo
Normal	Normal	Desgaste Abrasivo.				Polvo mineral.			
		Entre dos cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Bajo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Fibras.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Bajo Nulo
		Entre tres cuerpos.	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	15 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo	Otros.	20 + 50 50 + 100 > 100	Nulo Nulo Nulo



ANEXO D.

Análisis de Partículas en Gasóleo.

Índice

D.1. Introducción.	212.
D.2. Descripción del Equipo de Análisis.	212.
D.3. Análisis de las Partículas.	213.
D.4. Ejemplos de Aplicación y Diagnóstico.	214.
D.5. Conclusiones.	217.
D.6. Análisis de un Caso Real.	217.

D.1. Introducción.

Los actuales circuitos de inyección presentan tolerancias en los elementos móviles de los inyectores inferiores a los 50 micrómetros, por tanto, partículas contenidas en el combustible y superiores a dicho tamaño pueden generar problemas de obstrucciones y pinzamientos en la aguja del inyector. Los elementos filtrantes instalados actualmente en los circuitos se muestran en ciertos casos incapaces de retener la totalidad de partículas de contaminación o desgaste existentes en el gasóleo, desencadenando fallos.

El análisis ferrográfico, como herramienta de detección de fallos a partir del análisis de las partículas presentes en los lubricantes, es una técnica que viene siendo empleada desde los años 70 en motores y maquinaria industrial. En este anexo, se presenta una nueva aplicación de la ferrografía, el diagnóstico del circuito de inyección de combustible de motores Diesel.

D.2. Descripción del Equipo de Análisis.

Se ha empleado un ferrógrafo similar a los ya existentes en el mercado, pero ampliando sus prestaciones, de modo que es capaz de aislar tanto las partículas ferrosas como las no ferrosas presentes en el combustible. El esquema del equipo se muestra en la figura D.1. Las principales modificaciones incluidas son:

- Al final del flujo del ferrograma se interpone un filtro membrana que retiene las partículas no ferrosas que hayan sido arrastradas. El diámetro de poro de la membrana polimérica es de 3 micrómetros, pero se pueden emplear tamaños superiores o inferiores en función del grado de contaminación de la muestra. El fluido es filtrado mediante la aspiración creada por una bomba de vacío.
- Dada la baja viscosidad del gasóleo, no se requiere el uso de disolventes adicionales para diluir la muestra. No obstante, se emplea heptano en el lavado final, para eliminar posibles restos de combustible, que dificultarían la posterior observación microscópica.

Mediante este proceso se obtiene una separación de las partículas sobre dos sustratos diferentes:

- a) Las partículas ferrosas quedan depositadas sobre el cubreobjetos de vidrio, formando alineaciones paralelas, dispuestas perpendicularmente a la dirección del flujo. Las partículas de mayor tamaño son las primeras en ser retenidas formando parte de las primeras alineaciones, en último lugar quedan retenidas las partículas ferrosas de tamaños inferiores a un micrómetro. Algunas partículas no ferrosas quedan retenidas entre las alineaciones de ferrosas que actúan de barrera.

- b) El resto de partículas no ferrosas quedan repartidas homogéneamente sobre la membrana polimérica.

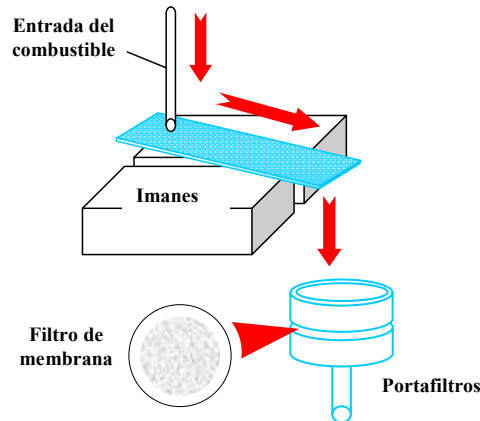


Figura D.1. Esquema del equipo de separación de partículas.

D.3. Análisis de las Partículas.

Para el estudio de las partículas se han empleado dos técnicas de análisis:

- Microscopía óptica con sistemas de iluminación reflejada y transmitida, dotados de capacidad polarizante. La observación se realiza a magnificaciones comprendidas entre X100 y X1.000 aumentos. La iluminación reflejada permite el análisis del tamaño, forma y detalles superficiales de la partícula, que son característicos de cada tipo de desgaste. Mediante luz transmitida se identifican partículas más o menos traslúcidas de tipo orgánico, o bien inorgánicas cristalinas. La utilización de luz polarizada en los dos sistemas de iluminación facilita la identificación de ciertas partículas con propiedades birrefringentes (silicatos, óxidos o fibras).
- Microscopía electrónica con análisis de rayos X, que es empleada exclusivamente en casos puntuales, donde es crítico conocer la composición exacta de la partícula para garantizar el diagnóstico de la anomalía. También permite la obtención de imágenes muy detalladas de la superficie de las partículas, aunque no proporciona colores reales, solamente imágenes en tonos de grises.

La captación de imágenes digitales en ambas técnicas de microscopía permite la inserción de las mismas en posteriores informes del estado del equipo lubricado así como su archivo en bases de datos para obtener un histórico de la evolución y tendencia de cada máquina monitorizada.

D.4. Ejemplos de Aplicación y Diagnóstico.

En este apartado se han descrito las principales morfologías y procedencia de las partículas que afectan al correcto funcionamiento del sistema de inyección.

D.4.1. Desgaste de la bomba de alta presión.

Los modernos sistemas de inyección de combustible requieren elevadas presiones de inyección de gasóleo, esta presión es suministrada por bombas de tipo pistón, capaces de generar presiones superiores a los 1.000 bares. Cuando esta bomba presenta un desgaste anómalo se detecta la aparición de partículas de desgaste con colores de temple y surcos típicos generados por deslizamiento. También se detectan partículas de corte con colores de oxidación. En este caso, al no existir ningún filtro intermedio las partículas generadas pasan directamente al inyector, desencadenando múltiples problemas. (Figura D.2).

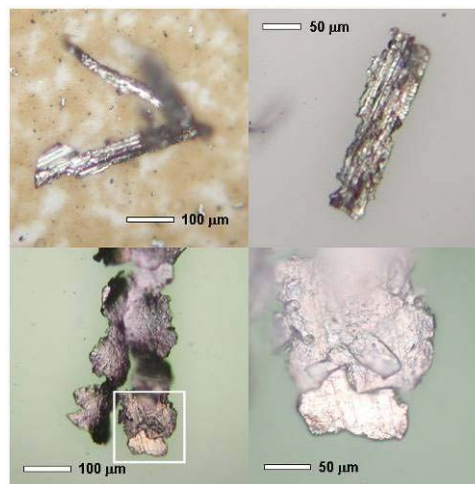


Figura D.2. Partículas generadas por el desgaste de la bomba de alta presión.

D.4.2. Desgaste de la bomba eléctrica de baja presión.

En la mayoría de motores Diesel existe una bomba que se encarga de alimentar la bomba de alta presión, extrayendo el combustible desde el depósito del vehículo. Estas electrobombas proporcionan una presión de 2 a 3 bar, capaz de hacer llegar un caudal suficiente de combustible a la bomba de alta. Las partículas generadas por este elemento (ver figura D.3) se clasificaron dentro de tres tipos principales:

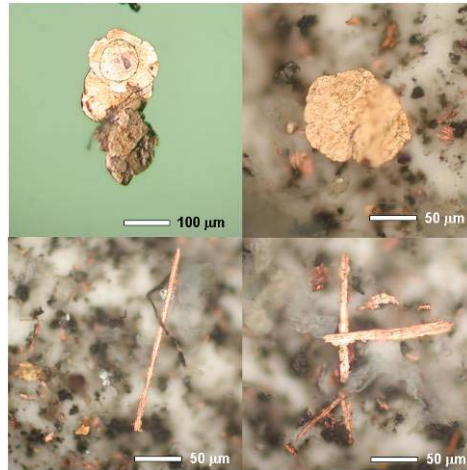


Figura D.3. Partículas generadas por el desgaste de la bomba de baja presión.

- Partículas de cobre con morfología indicativa de desgaste por deslizamiento y corte, algunas de estas partículas presentan tamaños superiores a los 200 micrómetros.
- Partículas laminares de bronce de tamaños por encima de los 100 micrómetros.
- Partículas de grafito de tamaños por debajo de los 10 micrómetros, procedentes de las escobillas de motor eléctrico, y similar a la carbonilla de los procesos de combustión del motor.

La mayor parte de las partículas generadas quedan retenidas por sistemas de filtrado posteriores, pero si la bomba presenta un desgaste severo, los filtros no son capaces de retenerlas todas y un número considerable de partículas grandes pasan al inyector.

D.4.3. Entrada de polvo mineral.

Aunque los sistemas de filtrado de combustible funcionen correctamente, en ocasiones es posible la entrada de polvo del exterior durante el proceso de llenado con combustible, o bien que sean partículas de polvo presente en el propio combustible por problemas de limpieza en los depósitos de la gasolinera. Estas partículas de polvo suelen ser de minerales duros (SiO_2 , CaO) capaces de desgastar los pistones de las bombas y los diferentes conductos por los que circula el combustible. Se debe comentar que las partículas de polvo tienen una forma equiaxial (figura D.4) que dificulta su retención por los filtros.

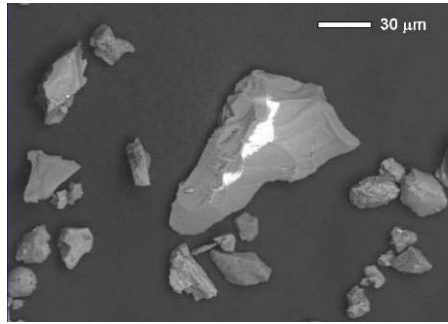


Figura D.4. Partículas de polvo ambiental.

D.4.4. Hongos en el gasóleo.

En condiciones ambientales adecuadas, la proliferación de ciertas especies de hongos es posible dentro de los depósitos de combustible, empleando como fuente de alimento el propio gasóleo. Estas condiciones se presentan en los depósitos de combustible de motores Diesel, donde se pueden dar problemas de condensaciones generando una presencia de agua en el fondo del depósito, es en esta interfase agua-combustible donde se desarrollan diferentes especies de hongos.

El aspecto de estas colonias de microorganismos suele ser gelatinoso, formado por miles de fibras orgánicas enredadas de 2 o 3 micrómetros de espesor, tal y como se presenta en la figura D.5. Debido a su consistencia, los hongos saturan el filtro de combustible impidiendo el paso de gasóleo a la bomba.

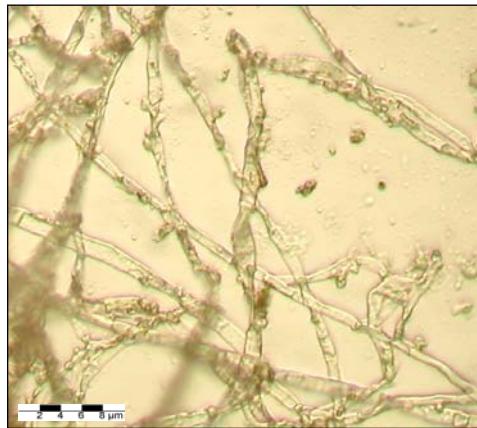


Figura D.5. Detalle de filamentos de hongos existentes en el combustible.

D.4.5. Partículas debidas al montaje de las líneas de combustible.

El montaje de las líneas de combustible es un punto crítico, que si no se realiza de manera cuidadosa puede dar lugar a la generación de partículas metálicas de tamaños superiores a los 100 micrómetros. Suelen ser partículas ferrosas de deslizamiento y corte, similares a las generadas por la bomba de alta, pero que no presentan colores de oxidación.

El sistema de filtrado no es capaz de eliminarlas, porque en la mayoría de ocasiones el racor de conexión está después del filtro, por tanto, estas partículas pasan directamente al inyector provocando fallos en la inyección por pinzamiento de la aguja.

D.5. Conclusiones.

La técnica de análisis descrita se presenta como una herramienta de diagnóstico eficaz para detectar fallos en el funcionamiento de los sistemas de inyección de combustible de motores Diesel. Sería necesario realizar un seguimiento de las partículas presentes en el combustible, no es posible introducir un elemento de filtrado después de la bomba de alta, debido a las altas presiones suministradas, se propone introducir dispositivos de análisis a la salida del retorno de combustible, de este modo, si se detecta un crecimiento en el número de partículas en el gasóleo, sería indicativo de un desgaste anormal o de la entrada de contaminantes exteriores.

D.6. Análisis de un Caso Real.

Se ha realizado el análisis individualizado de las tres muestras de combustible procedentes del depósito de combustible, de la bomba de baja y del filtro, obteniéndose unos resultados de contaminación por partículas similares tanto en nivel de contaminación como en el tipo de metales detectados. Los contaminantes han sido aislados mediante filtrado con membranas poliméricas y mediante aplicación de campo magnético. Se puede clasificar la contaminación en cuatro tipos principales de partículas.

- **Contaminación por polvo mineral (70% del total).** Muy elevada concentración de polvo mineral, con tamaño medio alrededor de 75 micrómetros, alcanzando en ocasiones tamaños superiores a los 200 micrómetros. Las elevadas dimensiones y dureza de estas partículas contaminantes puede desencadenar severos daños en el circuito de combustible.

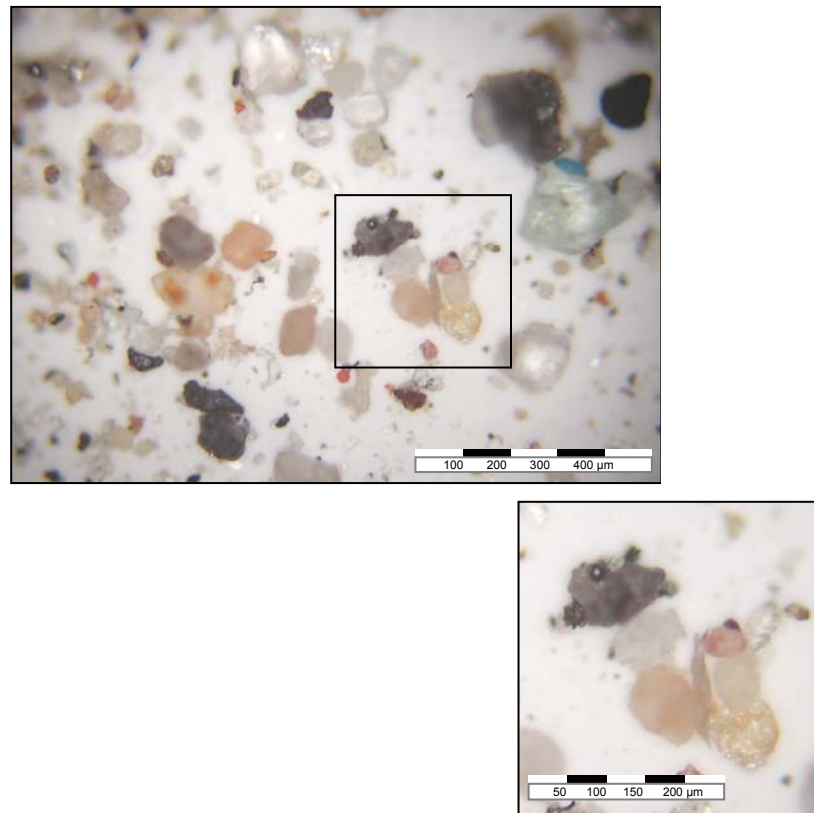


Figura D.6. Partículas de polvo mineral presentes en el combustible.

Dado que estas partículas de polvo mineral son las mayoritarias respecto al total de contaminantes del combustible, se ha procedido a su estudio detallado mediante microscopía electrónica de barrido.

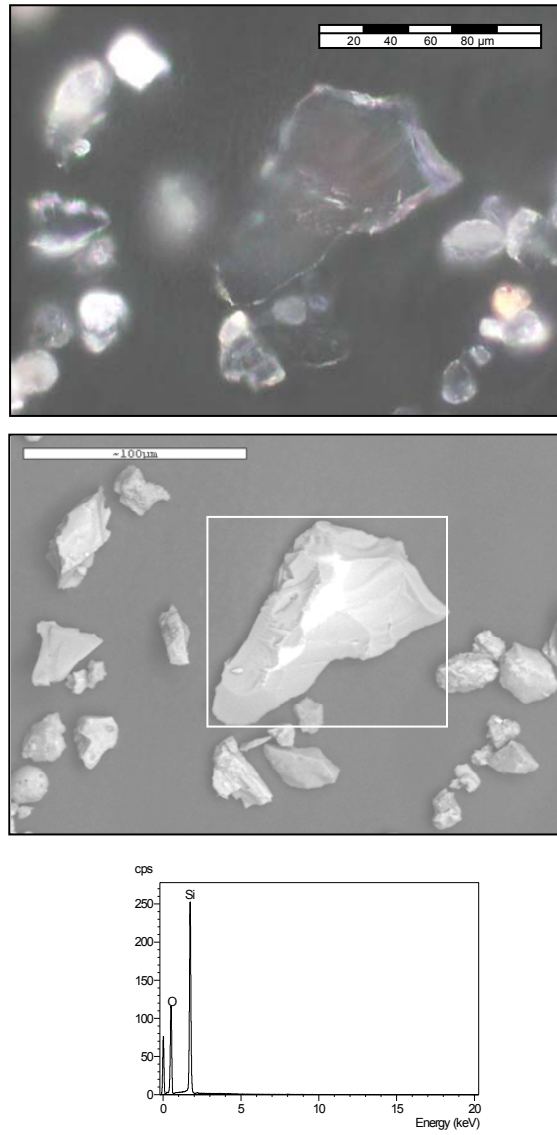


Figura D.7. Partículas de polvo mineral presentes en el combustible observadas con el microscopio óptico (arriba) y mediante microscopía electrónica de barrido (abajo). La figura inferior muestra el espectro de rayos X correspondiente a la partícula de mayor tamaño.

Se ha realizado un barrido global sobre una muestra representativa del total de partículas de polvo presente en el combustible, permitiendo conocer la composición elemental de cada una de ellas. Se ha centrado el estudio en el análisis de silicio (Si), calcio (Ca) y aluminio (Al), metales que suelen formar parte del polvo atmosférico.

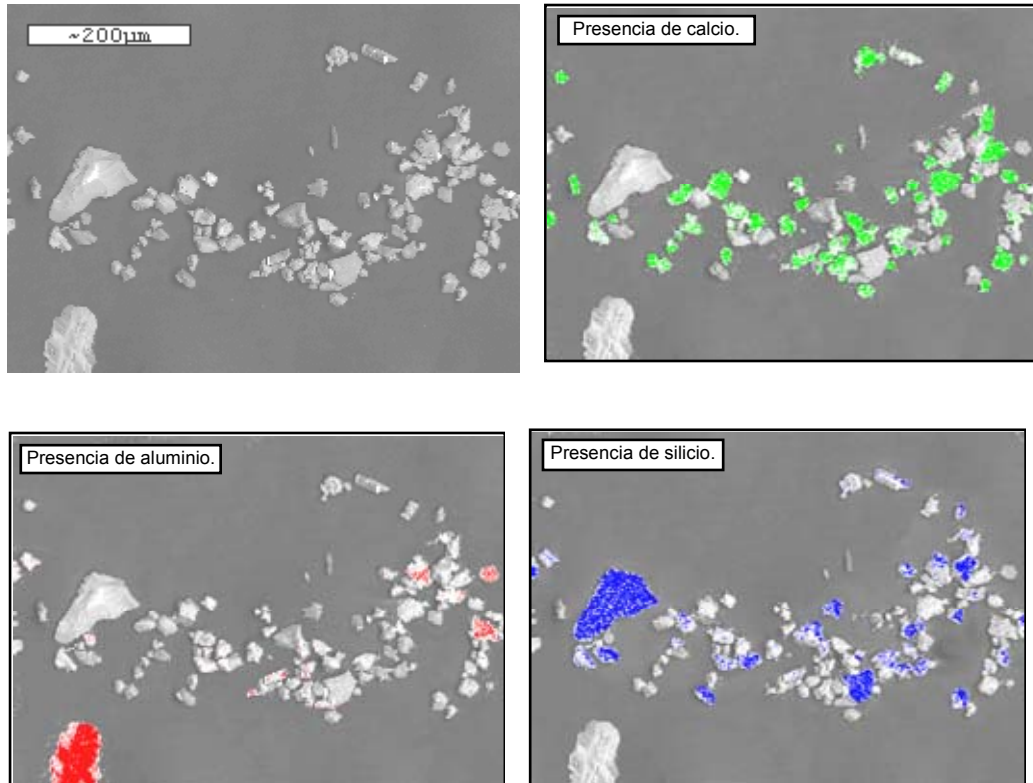


Figura D.8. Barrido global sobre la muestra para determinar la presencia de calcio, aluminio y silicio en las partículas de polvo.

Se puede concluir que el polvo mineral existente en suspensión en el gasóleo es tanto de naturaleza silíceo como calcáreo y una baja concentración de alúmina.

- **Partículas ferrosas (20 % del total).** Elevada concentración de partículas ferrosas de fatiga, principalmente esferas y fragmentos. Las esferas tienen un tamaño medio de 10÷15 micrómetros mientras que los fragmentos se sitúan entre los 20 y 50 micrómetros. También se ha detectado la presencia de partículas ferrosas de corte con un tamaño generalmente superior a los 100 micrómetros. Las partículas de fatiga van asociadas a sobrecargas durante el funcionamiento de ejes, bombas o engranajes y las de corte se relacionan con la presencia de contaminantes de elevada dureza que realizan abrasiones sobre las superficies ferrosas.

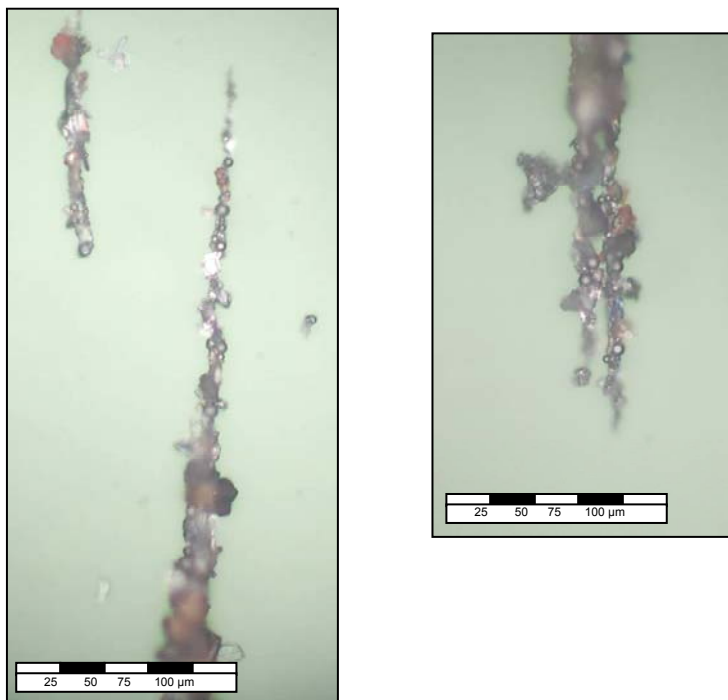


Figura D.9. Esferas y fragmentos de fatiga aislados del combustible mediante separación magnética.



Figura D.10. Partículas ferrosas de corte.

- **Partículas de cobre de deslizamiento (5% del total).** La presencia de este tipo de partículas indica un desgaste en elementos antifricción, provocado por la presencia de contaminantes en el combustible.

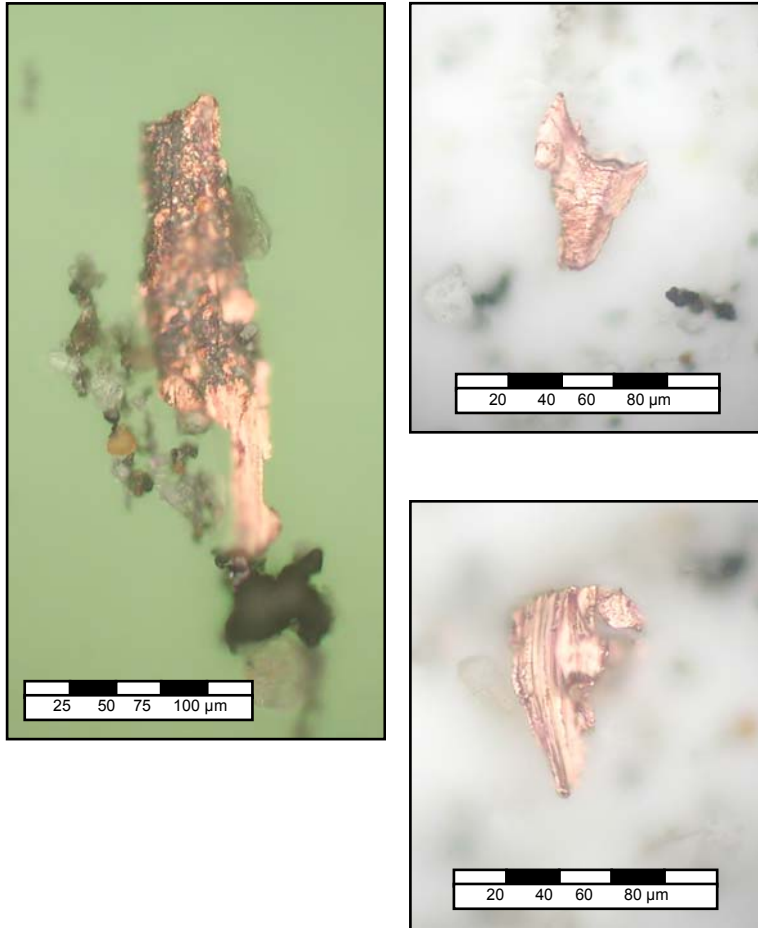


Figura D.11. Partículas de cobre generadas en procesos de desgaste adhesivo severo.

- **Partículas de aluminio (5% del total).** También se han detectado partículas de aluminio de tamaños por encima de los 100 micrómetros y dada su morfología, generadas por un desgaste adhesivo severo.

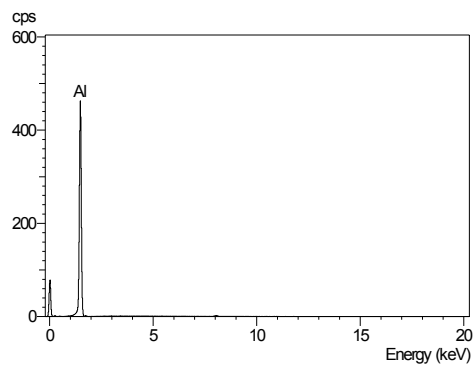
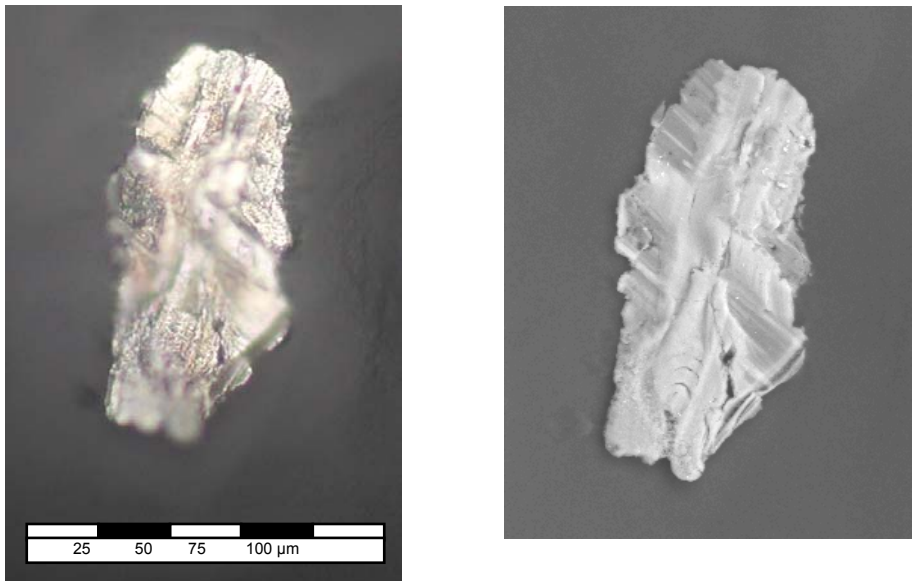


Figura D.12. Partícula de aluminio observada mediante microscopía óptica y electrónica de barrido.

Ante los resultados del estudio microscópico del combustible se puede emitir el siguiente diagnóstico:

- Existe una contaminación muy elevada de partículas en el combustible, mayoritariamente polvo mineral, la presencia de este polvo de origen silíceo y calcáreo, de elevada dureza y con tamaños superiores a los 100 micrómetros, puede provocar serios fallos en el sistema de inyección de combustible.
- El resto de partículas de desgaste detectadas en el combustible podrían ser consecuencia del desgaste abrasivo de los elementos mecánicos del circuito de combustible provocado por la presencia del polvo mineral.