

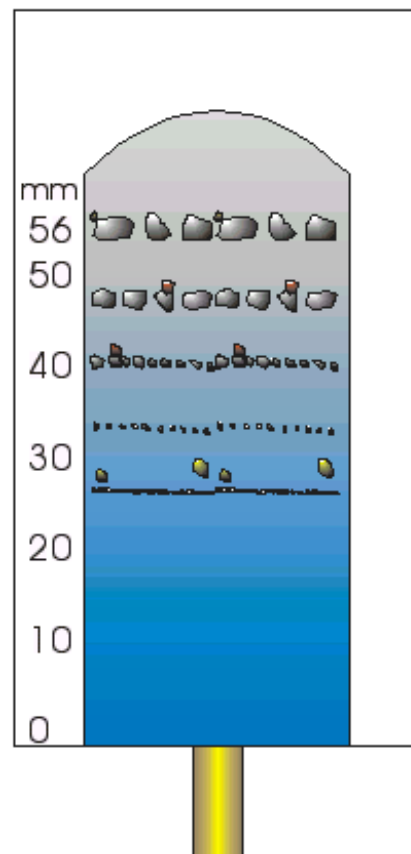


**TUTORIAL DE FERROGRAFÍA DIRECTA,  
ANÁLISIS DE ELEMENTOS PRESENTES Y  
FERROGRAFÍA ANALÍTICA**

**REALIZADO POR A-MAQ S.A.  
ANÁLISIS DE MAQUINARIA  
ING. MARCEL RUEDA**

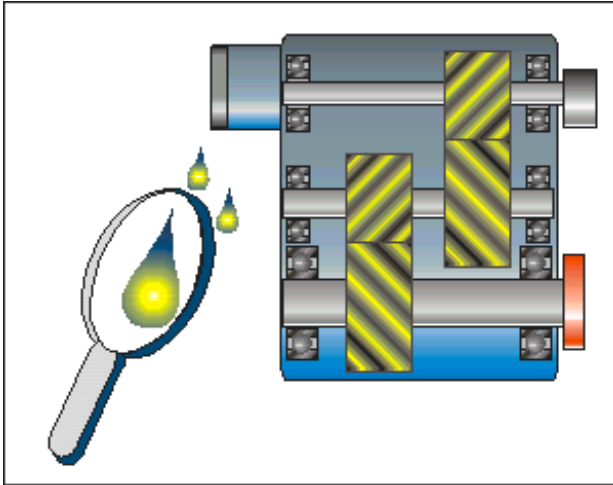
**ENERO 2005**

Visítenos en [www.a-maq.com](http://www.a-maq.com)



## ANÁLISIS DE LUBRICANTES:

Los análisis de lubricantes proveen a los grupo de mantenimiento de valiosa información respecto del proceso de lubricación. Indican principalmente el estado



del aceite y soportan en repetidas ocasiones la decisión de continuar usando o no un lubricante.

Con un cuidadoso manejo y un completo historial pueden entregar información del estado de los componentes mecánicos y apoyar estrategias de mantenimiento predictivo. Para tal efecto, deben satisfacerse las siguientes dos

condiciones: la máquina debe arrancar con sus componentes en óptimo estado y con nuevo lubricante (un excelente historial ayuda a que esto no sea indispensable) y el lubricante debe haber realizado el ciclo de lubricación dentro de la máquina varias veces, pasando por la bomba, las piezas lubricadas y los filtros.

Los análisis son muy variados: fácilmente se cuentan un centenar diferentes análisis: viscosidad, color, punto de fluidez, residuos de carbón, resistencia a la formación de espuma, herrumbre... para aceites. Otros tantos son consistencia, estabilidad a la oxidación, punto de goteo,... para grasas. que van desde posibles los cuales analizan . Los análisis requieren de cantidades importantes de lubricante, entre 250 y 500 ml para los de aceite y entre 500 y 1000g para los de grasa.

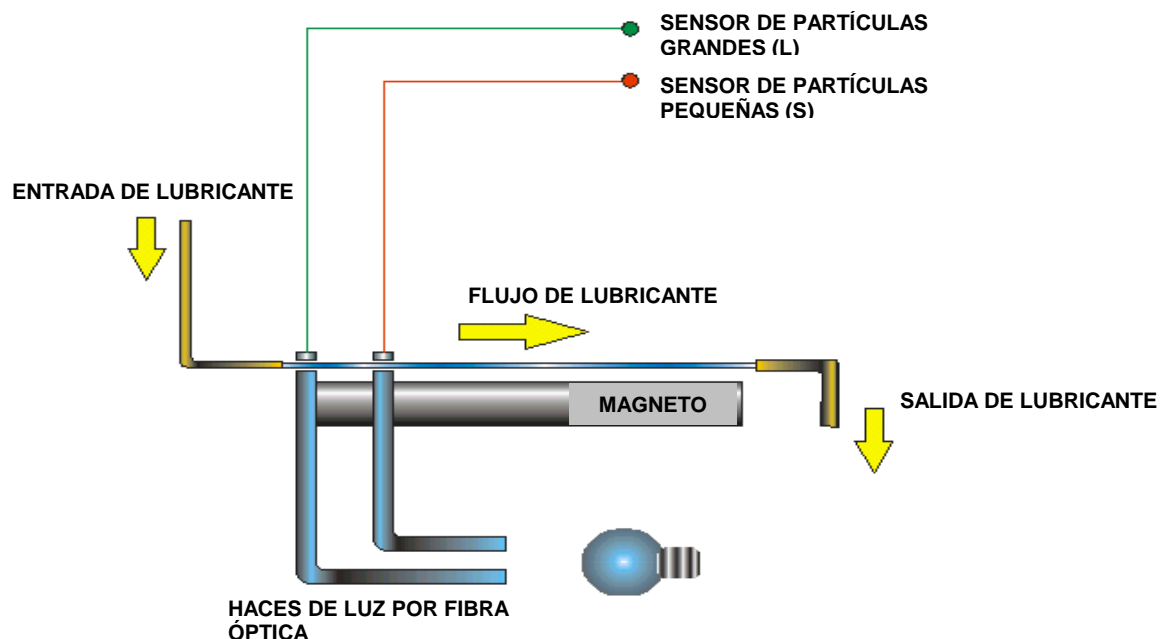
A continuación hablaremos de los análisis más representativos en nuestro día a día del mantenimiento: El conteo de partículas y el análisis de elementos presentes. Un análisis menos solicitado y más costoso es de suma importancia para el análisis de maquinaria supercrítica: La ferrografía analítica.

## FERROGRAFÍA DIRECTA (CONTEO DE PARTÍCULAS):



La ferrografía directa consiste en una medición cuantitativa de la concentración de las partículas ferrosas en una muestra de fluido a través de la precipitación de esas partículas en un tubo de vidrio sometido a un fuerte campo magnético. Dos rayos de luz transportados por fibra óptica impactan sobre el tubo en dos posiciones correspondientes a la localización en la cual las partículas grandes y las pequeñas serán depositadas por el campo magnético. La luz es reducida en relación a las partículas depositadas en el tubo de vidrio y ésta reducción es monitoreada y medida

electrónicamente. Dos conjuntos de lecturas son obtenidos de las grandes y pequeñas partículas (partículas por encima de 5 micras y partículas por debajo de 5 micras). Por lo general más de 20,000 partículas mayores de 5 micras indican una alerta de seguimiento y más de 40,000 son excesivas e indican problemas de desgaste en componentes ferrosos de la máquina.



Actualmente se impone un refinamiento de este método (otro sensor después del S) permite obtener en número de partículas en total de partículas mayores de 1.2 micras, el total de partículas mayores de 5 micras y el total de partículas mayores de 12 micras. El número de partículas tiene un código correspondiente en la norma ISO 4406 para análisis de lubricantes a través del conteo de partículas. El código no es más que un número del 8 al 24. El fabricante del lubricante recomienda unas cantidades de material particulado a través de estos códigos.

1. ANÁLISIS DE CONTEO DE PARTÍCULAS

TAMAÑO (micras)	CANTIDAD PARTÍCULAS INICIAL	RANGO DE LIMPIEZA	CANTIDAD PARTÍCULAS FINAL	RANGO DE LIMPIEZA	RANGO LIMPIEZA MEDIDO	RANGO DE LIMPIEZA RECOMENDADO
X > 1,2	18.416,0	21			21/21/21	21/20/19
1,2 < X < 5	3.210,0	19				
X > 5	15.206,0	21				
5 < X < 12	1.521,0	18				
X > 12	13.685,0	21				

ESTE LO OBTIENE EL ANÁLISIS (pointing to 'RANGO LIMPIEZA MEDIDO')

ESTE LO RECOMIENDA EL FABRICANTE (pointing to 'RANGO DE LIMPIEZA RECOMENDADO')

NORMA 4406

CODIGO	PARTICULAS DESDE	HASTA
24	80.000	180.000
23	40.000	80.000
22	20.000	40.000
21	10.000	20.000
20	5.000	10.000
19	2.500	5.000
18	1.300	2.500
17	640	1.300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	3	5
8	1,30	2,50

En el ejemplo adjunto el fabricante recomienda 21/20/19 ( no más de 20,000 partículas mayores de 1.2 micras/ no más de 10,000 partículas mayores de 5 micras / y no más de 5,000 partículas mayores de 12 micras, compare la recomendación con la tabla de la norma). Según este análisis, el aceite está para cambio o microfiltrado y puede haber un desgaste importante en la máquina.

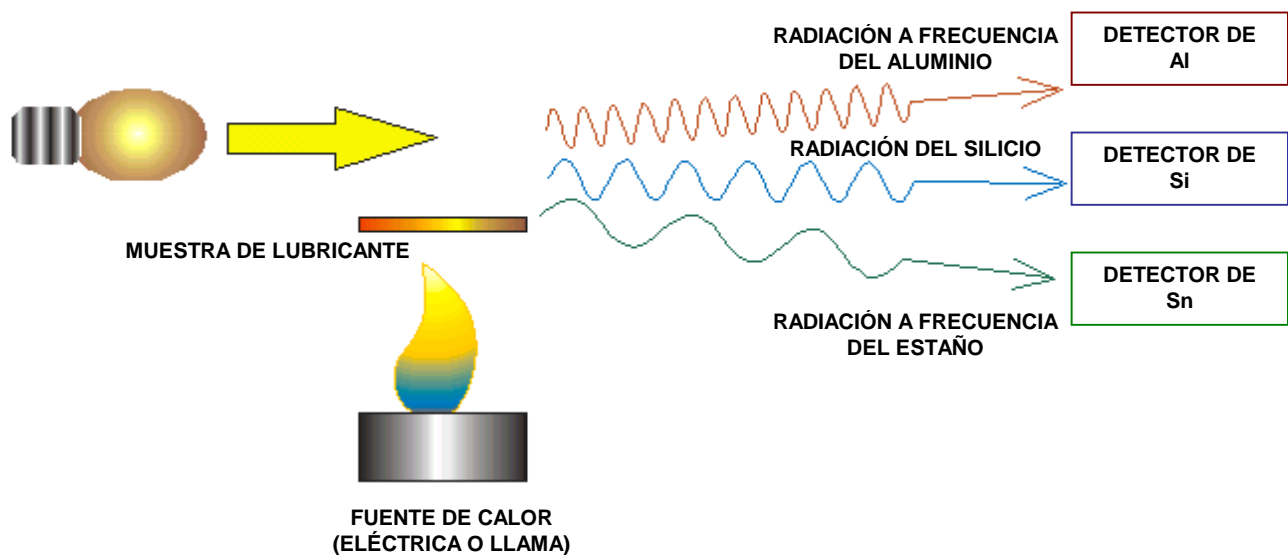
**Habilidad requerida para este análisis:** Media.

**Ventajas:** Analizador compacto, portátil, en línea, fácil de operar, poco sensible a la opacidad y contaminación con agua que oras técnicas.

**Desventajas:** Sólo mide partículas ferromagnéticas y para ser decisiva requiere de un análisis posterior de ferrografía analítica. Para que la muestra sea válida el análisis debe ser realizado sobre aceites cambiados o microfiltrados después de cada incidente y que hayan realizado el ciclo de lubricación un número representativo de veces.

## ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (DETECCIÓN DE ELEMENTOS PRESENTES):

Este análisis, en conjunto con el conteo de partículas, es el más popular en la implementación de programas de mantenimiento predictivo, debido a que en los centros industriales, los proveedores de lubricante ofrecen el servicio como un valor agregado a la venta. El principio básico consiste en someter la muestra de lubricante a una fuente alto voltaje (15 kV) en la cual se calienta y libera energía. Fenómenos especiales de radiación se generan, en los cuales se pueden diferenciar y asignar las radiaciones a diferentes frecuencias a elementos específicos constituyentes del lubricante. La intensidad de radiación a una frecuencia específica es proporcional a la concentración de su respectivo elemento.



Algunos de los elementos detectados mas importantes son:

Silicio:	polvo, aditivos antiespumantes.
Calcio:	polvo, aditivos detergentes.
Bario, Magnesio:	aditivos detergentes.
Hierro:	engranajes y rodamientos.
Cobre:	babbitt de cojinetes de fricción o separadores de rodamientos
Cromo:	anillos y camisas de pistón.
Aluminio:	pistones.
Estaño, Cobre, Plata:	cojinetes.
Plomo:	contaminación con gasolina.
Vanadio, Sodio:	combustible quemado.

El proveedor del aceite cuenta con tablas de valores máximos de elementos en el lubricante, en relación al tipo de máquina y proceso productivo. A continuación se muestra otro aparte de nuestro informe en el cual se relacionan las concentraciones medidas de diversos elementos relacionadas con los máximos permisibles (nuevamente, según el proveedor. Debemos tener en cuenta que todas las máquinas son diferentes y sus condiciones de operación en diferentes regiones también lo son!).

5. ANÁLISIS DE CONTENIDO DE METALES DE DESGASTE

PARÁMETRO	VALOR MÍNIMO	VALOR MEDIDO	VALOR MÁXIMO	UNIDAD	ESTADO
Cr	0	0	10	ppm	Normal
Cu	0	2	50	ppm	Normal
Fe	0	1	75	ppm	Normal
Al	0	0	50	ppm	Normal
Mg	0	0	5	ppm	Normal
Na	0	0	75	ppm	Normal
Ni	0	0	5	ppm	Normal
Pb	0	0	20	ppm	Normal
Si	0	4	20	ppm	Normal
Sn	0	0	10	ppm	Normal
Sb	0	0	5	ppm	Normal
Zn	0	0	5	ppm	Normal
B	0	0	20	ppm	Normal
Ag	0	0	5	ppm	Normal
Mn	0	0	5	ppm	Normal

Otro análisis generalmente incluido en este tipo de reportes es el de propiedades fisicoquímicas. Incluye referencias a la oxidación, apariencia, % agua y viscosidad.

4. ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL ACEITE

PROPIEDAD	OXIDACIÓN	APARIENCIA	CONTENIDO DE AGUA %	VISCOSIDAD
VALOR	0,00	Clara, brillante	0,00	45,1
ESTADO	Normal	Normal	Normal	Normal

**Habilidad requerida para este análisis:** Media-Alta.

**Ventajas:** Se pueden obtener las concentraciones de elementos simultáneos (20 a 60 elementos). La prueba dura alrededor de un minuto. Su costo es bajo.

**Desventajas:** Puede fallar al vaporizar partículas más grandes de 10 micras. No diagnostica por si sola el tipo de desgaste presente.

## **FERROGRAFIA ANALÍTICA**

La ferrografía analítica se posiciona como una de las técnicas más importantes para el análisis de aceite. Cuando es implementada correctamente provee gran información de causa raíz. A pesar de sus capacidades es frecuentemente excluida de los programas de análisis de aceites, debido a que comparativamente, es bastante costosa. Además, es una prueba que requiere tiempo, paciencia y alta habilidad (muy buen ojo) por parte del analista. Por lo tanto, este análisis representa costos significativos que no se presentan en otros análisis de aceites.

Por otra parte, los beneficios de la ferrografía analítica son muy representativos al lograr una clara identificación de modos de falla que ningún otro análisis provee.

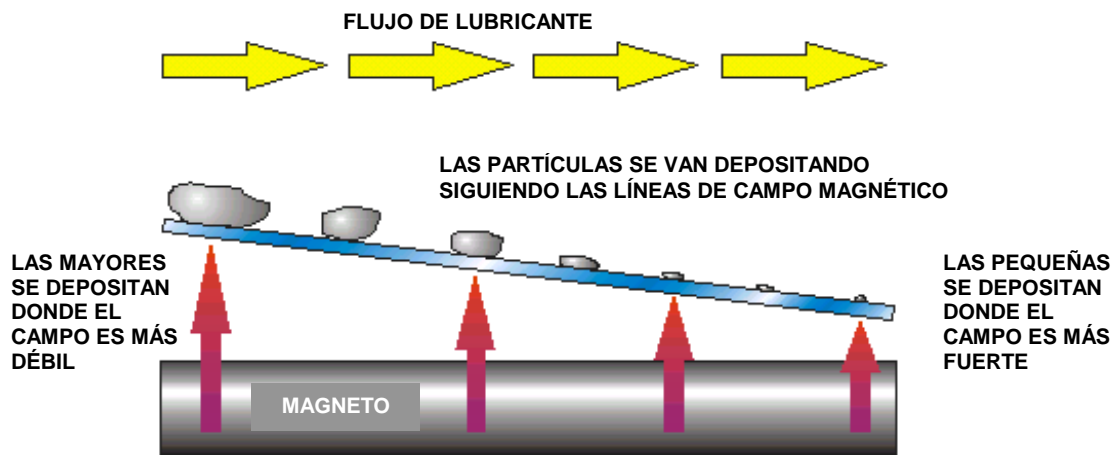
### **¿QUÉ ES UNA FERROGRAFÍA ANALÍTICA?**

El principio de la ferrografía analítica consiste en separar sistemáticamente el material particulado suspendido en el lubricante, sobre una plaqueta de vidrio. La plaqueta es examinada bajo el microscopio para distinguir tamaño, concentración, composición, morfología y condición superficial de las partículas ferrosas y no ferrosas que caracterizan el desgaste.

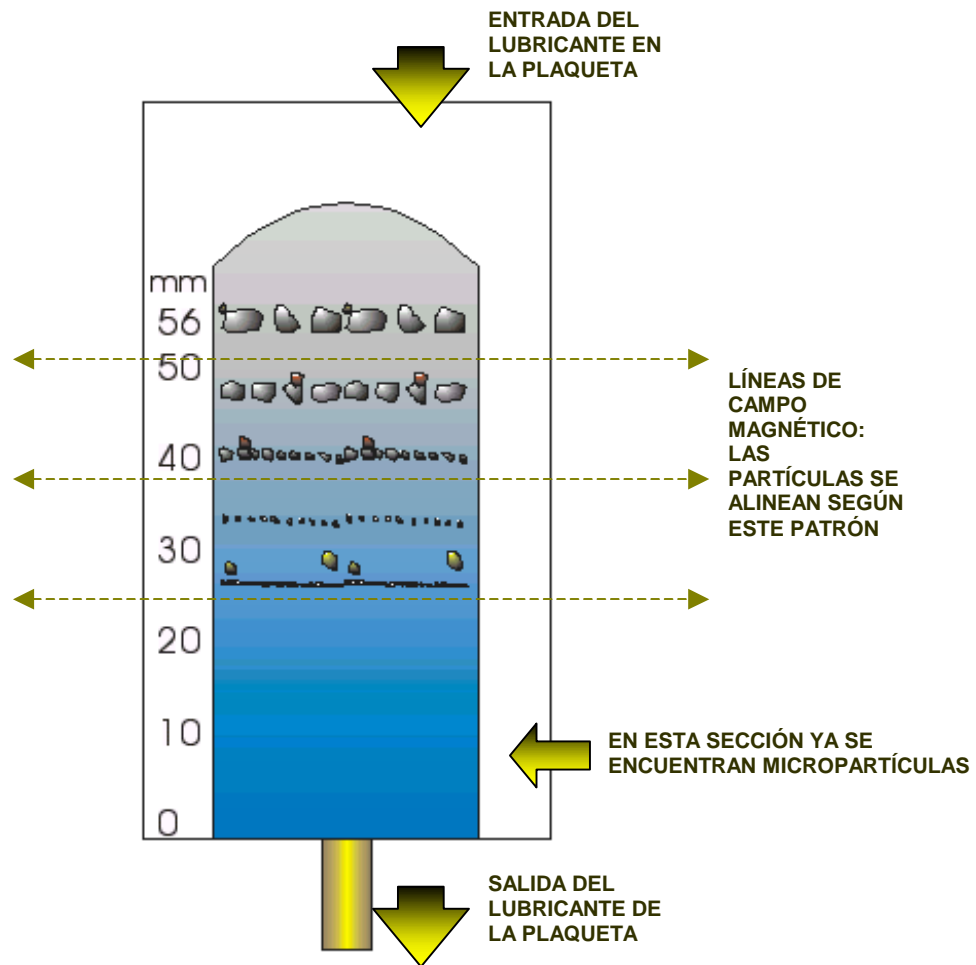
El examen detallado descubre los misterios de las condiciones de desgaste anormal apuntándolo hacia el componente fuente, con un excelente acercamiento a la causa raíz del problema.

## PREPARANDO EL FERROGRAMA...

La ferrografía analítica con la separación magnética de los residuos encontrados en el lubricante. El lubricante es diluido para mejorar la precipitación de partículas y la adhesión a la plaqueta. La muestra diluida se hace fluir sobre la plaqueta por gravedad (la plaqueta se posiciona inclinada). La plaqueta a su vez descansa en un magneto el cual atrae las partículas ferrosas y permite la adherencia en la plaqueta.



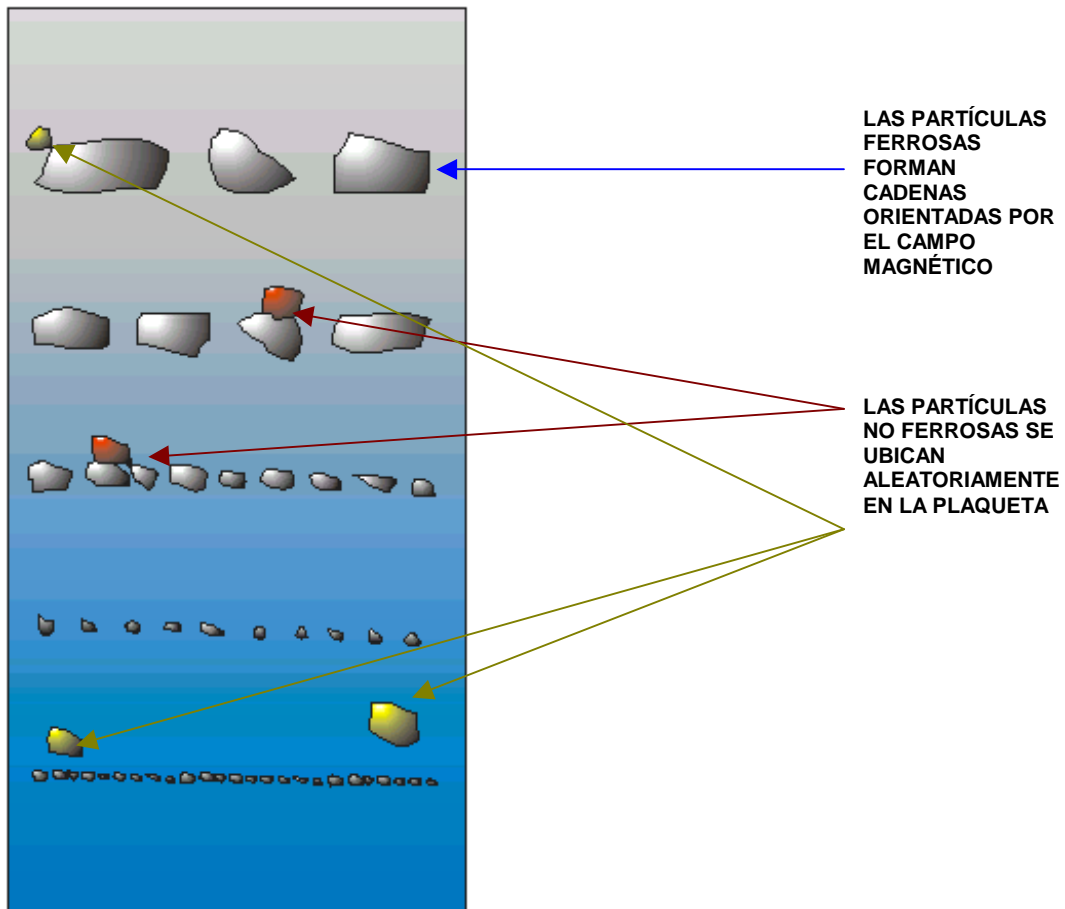
Debido al campo magnético las partículas ferrosas se alinean en cadenas horizontales a lo largo de la plaqueta; las partículas más grandes se depositan hacia el punto de entrada y las pequeñas hacia el punto de salida. Las no ferrosas se depositan aleatoriamente en toda la plaqueta acumulándose sobre las cadenas de partículas ferrosas las cuales actúan como diques. La ausencia de partículas ferrosas reduce sustancialmente la efectividad del análisis de las no ferrosas.



La plaqueta preparada de esta manera con estas cadenas de partículas, se denomina **ferrograma**. Después de que las partículas son depositadas en el ferrograma la plaqueta se lava y las partículas quedan permanentemente adheridas. El ferrograma está ahora listo para inspección óptica utilizando un microscopio bicromático.

## IDENTIFICACION DE PARTICULAS.

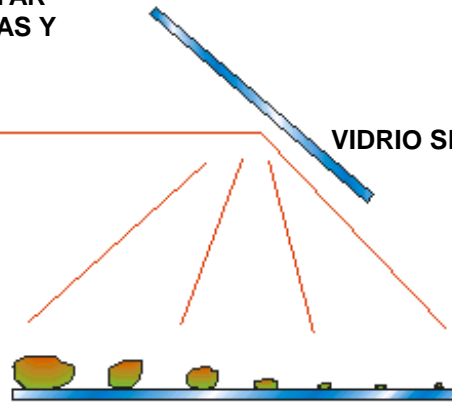
El ferrograma es examinado bajo un microscopio bicromático polarizado equipado con una cámara digital. El microscopio utiliza dos luces: una superior de color rojo (reflejada) y una inferior de color verde (transmitida). Este juego de luces ayuda a distinguir tamaño, forma y geometría de las partículas ferrosas y no ferrosas. Las partículas son clasificadas para determinar el tipo de desgaste y su causa. Para ayudar a la identificación de la composición el analista puede calentar el ferrograma por dos minutos a 600 °F.



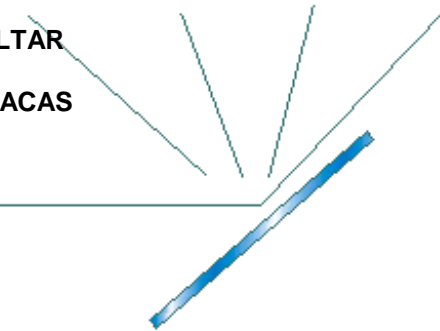
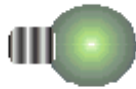
LUZ ROJA PARA RESALTAR  
LAS PARTÍCULAS OPACAS Y  
GRANDES



VIDRIO SEMI TRASLUCIDO

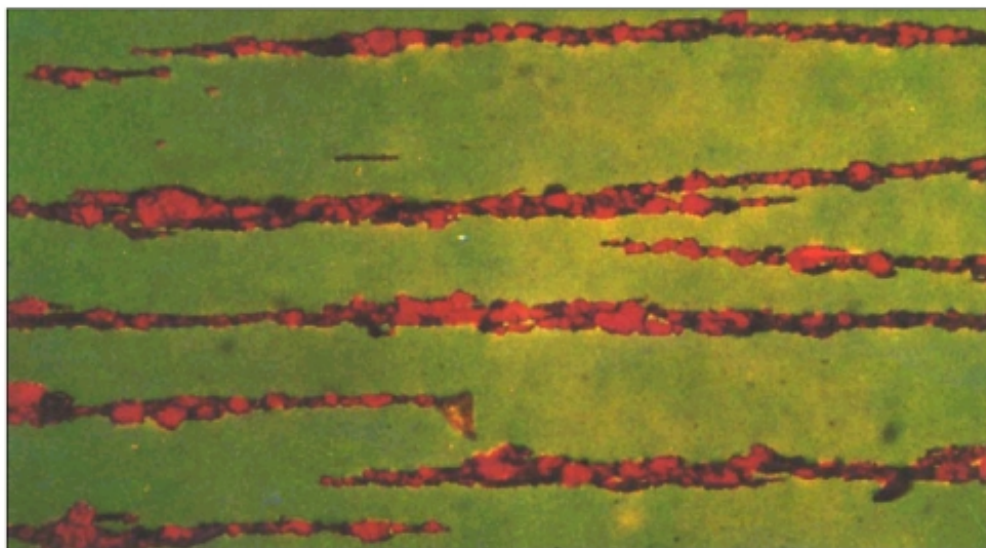


LUZ VERDE PARA RESALTAR  
LAS PARTÍCULAS  
TRASLUCIDAS, SEMI-OPACAS  
Y PEQUEÑAS





Opt. M. 225X |— 100 $\mu$ m —|



## COMPOSICION DE PARTICULAS.

Se identifican seis categorías de partículas:

1. Partículas blancas no ferrosas: frecuentemente son aluminio o cromo. Aparecen blancas brillantes antes y después del tratamiento térmico. Están depositadas aleatoriamente en la plaqueta con grandes partículas detenidas por las cadenas de las partículas ferrosas.
2. Partículas de cobre: usualmente aparecen como amarillo brillante antes y después del tratamiento térmico, aunque puede cambiar a verde-gris. Esta también estará depositada aleatoriamente en la plaqueta con partículas grandes a la entrada y pequeñas a la salida.
3. Partículas del babbitt: consisten en partículas delgadas de color gris (se ven como trozos de lata). Después del tratamiento siguen grises pero con puntos azules y rojos, y mas pequeñas con apariencia motosa. Su distribución es aleatoria.
4. Contaminantes: usualmente son residuos de polvo principalmente silicio. Aparecen como unos cristales que son fácilmente identificados con la luz transmitida (verde). Su distribución es aleatoria.
5. Fibras: causadas por desprendimientos de filtros y contaminación externa. Son largas cadenas en variedad de colores y usualmente no cambian su apariencia después del tratamiento térmico. Algunas veces esas partículas actúan como filtro colectando otras partículas. Pueden aparecer en cualquier parte del ferrograma, aunque tienden a estar en la salida.
6. Partículas ferrosas: se identifican principalmente usando la luz roja (reflejada) y la luz blanca del microscopio. La luz transmitida es totalmente bloqueada por la partícula. Se dividen en cinco diferentes categorías:
  - a. Acero de alta aleación: las partículas son encontradas en cadenas de color gris-blanco antes y después del tratamiento. La forma de diferenciar entre los aceros con alta aleación y las partículas blancas no

- ferrosas es la posición en la plaqueta. Si aparece en cadena es un acero, de otro modo es considerado un blanco no ferroso. Su aparición en ferrogramas es rara (es lo último que se espera que se desgaste).
- b. Acero de baja aleación: las partículas se encuentran en cadenas gris-blancas, pero después de tratamiento térmico aparecen azules, rosas o rojas.
  - c. Óxidos metálicos negros: depositados en cadenas de color gris oscuro o negros antes y después del tratamiento térmico. La cantidad de negro determina la severidad de oxidación.
  - d. Fundición de hierro: aparece gris antes del tratamiento y amarillo opaco después.
  - e. Óxidos rojos (Herrumbre): la luz polarizada los identifica rápidamente. Pueden ser encontrados en cadenas con otras partículas ferrosas o depositadas aleatoriamente en la plaqueta. Una gran cantidad de óxidos rojos de pequeño tamaño en la salida de la plaqueta son consideradas como un signo de desgaste corrosivo. Aparece como una playa de arena roja.

Después de la clasificación e identificación de la composición el analista pondera el tamaño de las partículas usando una escala micrométrica en el ocular del microscopio. Partículas con un tamaño mayor de 30 micras definen condiciones severas o anormales. Frecuentemente la forma de la partícula es una clave importante sobre el origen del desgaste. ¿La partícula es laminar o rugosa? Las partículas laminares indican aplastamiento en las áreas de rodamientos por alta presión o contacto lateral. ¿La partícula tiene una forma curva similar a una hoz? Esto caracteriza desgaste cortante producido por contaminantes abrasivos. ¿Tiene la partícula estrías en su superficie? Las estrías son signos de desgaste por arrastre sin lubricación. Puede ser generado en un área donde ocurren arranques de superficies metálicas. ¿La partícula es esférica oscura con centro blanco? Las

esferas son generadas en presencia de fatiga en los rodamientos. Un incremento en ellas indica exfoliación.

Algunos Ejemplos son:

1. Desgaste laminar de un rodamiento partículas menores de una micra:

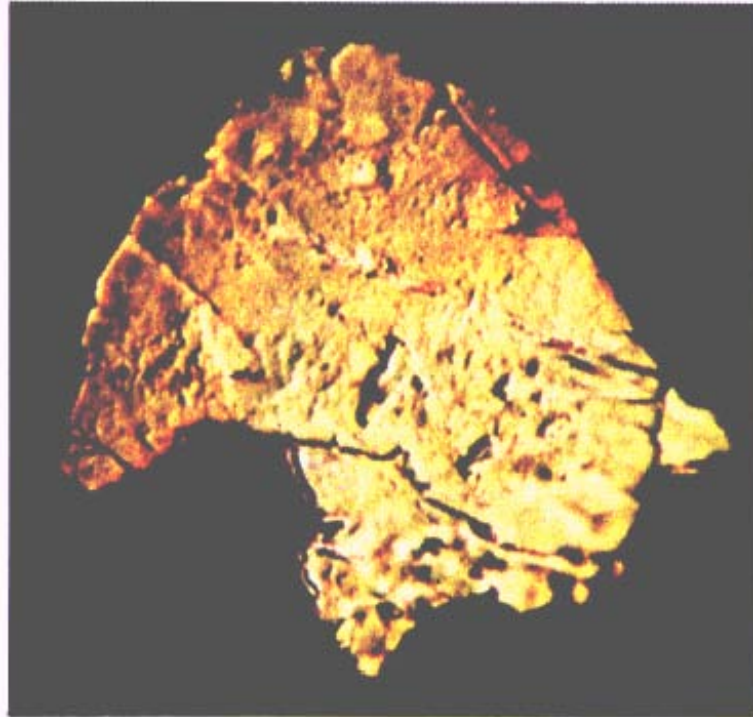


Fig. 1.3.18 Opt. M.  $1000\lambda$   $\text{---}20\mu\text{m}\text{---}$

2. Desgaste por arranque de material en caja reductora. Partículas de 10 micras

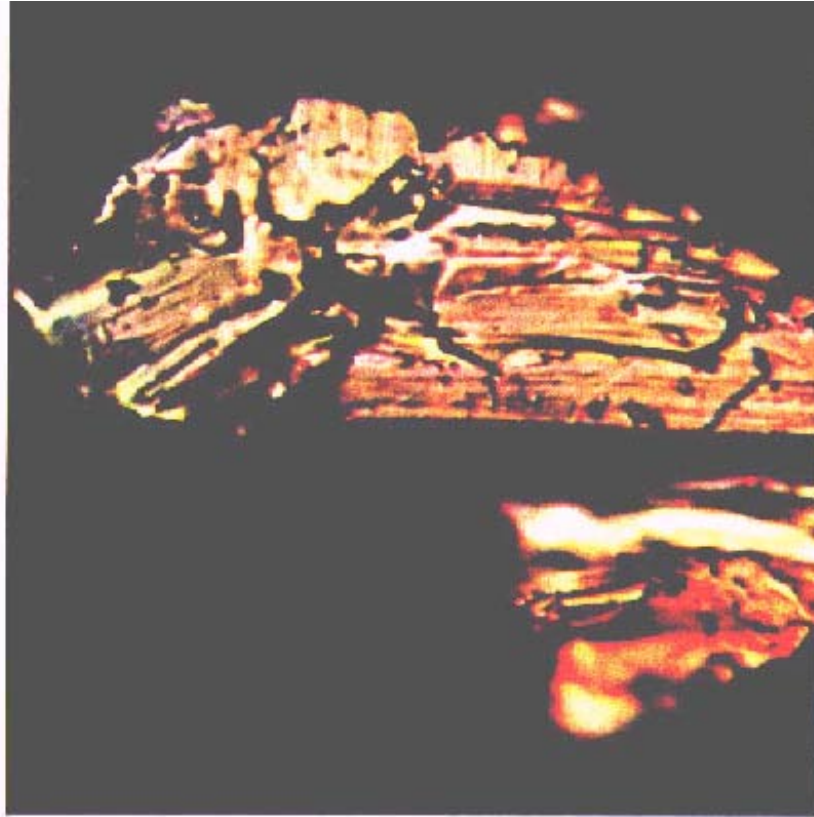


Fig. 1.5.6 Opt. M. 1000X  $\text{—} 20\mu\text{m} \text{—}$

3. Inicio de desgaste por fatiga en rodamiento. Partículas esféricas.

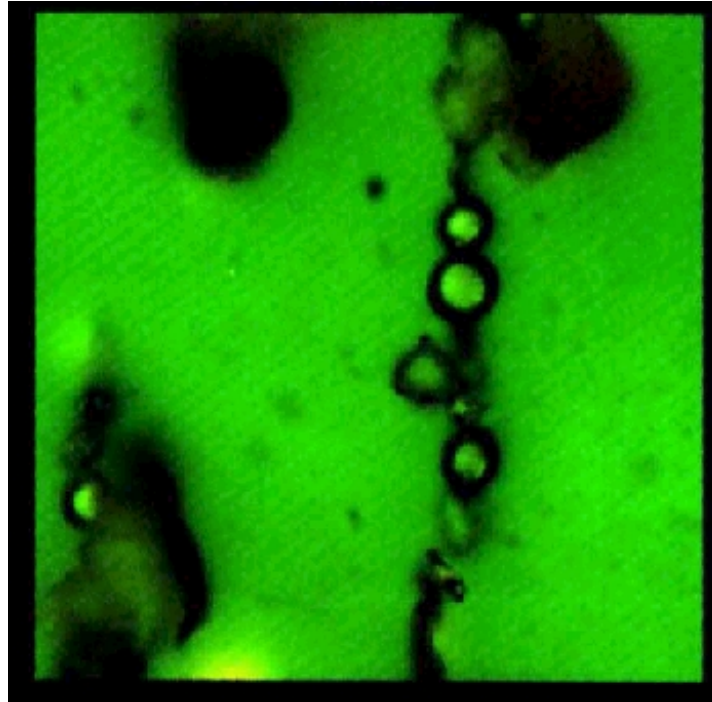
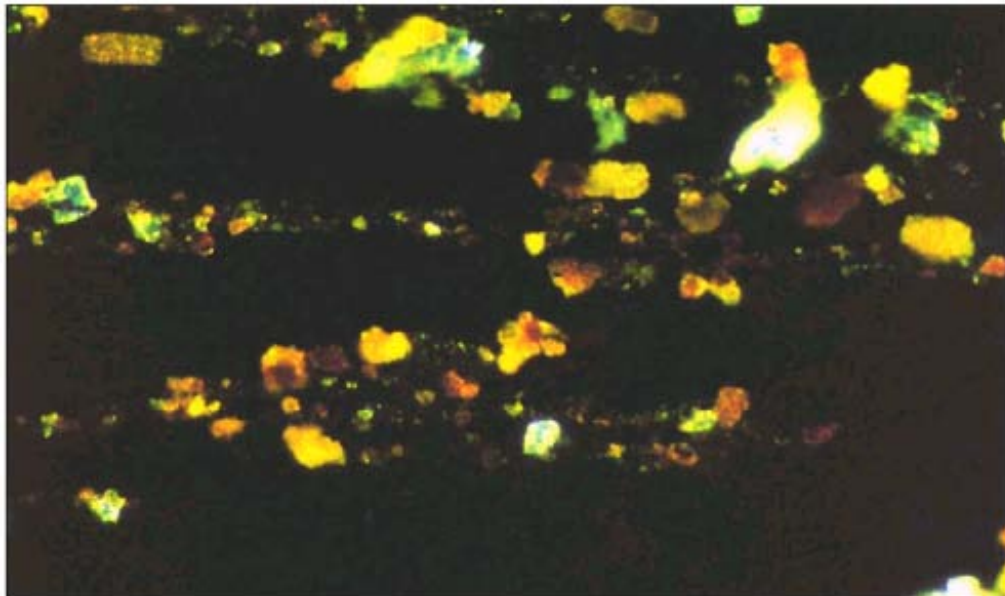


Fig. 1.3.14 S.E.M. 2500X |—— 10 $\mu$ m ——|

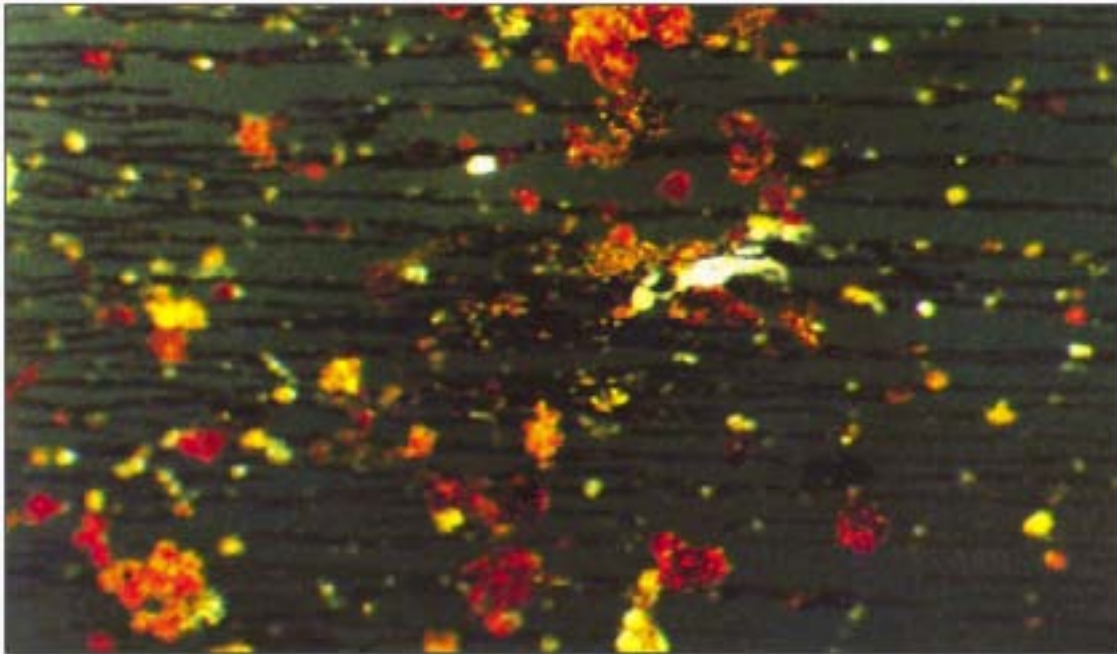
4. Desgaste cortante producido por contaminantes abrasivos.



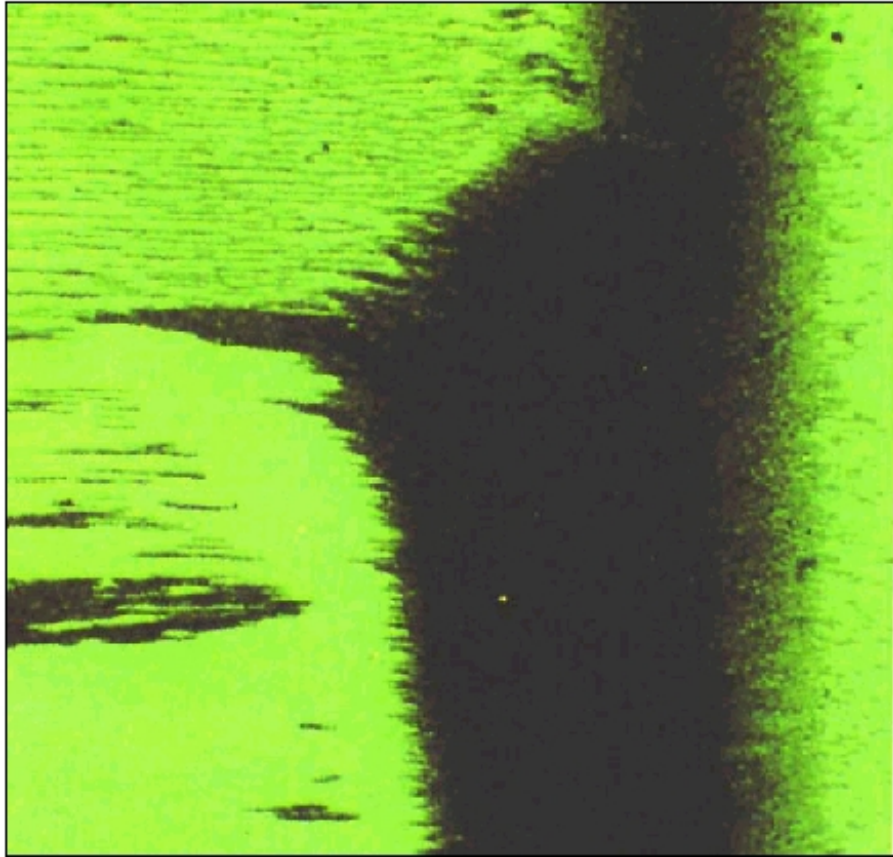
5. Óxidos rojos bajo luz polarizada

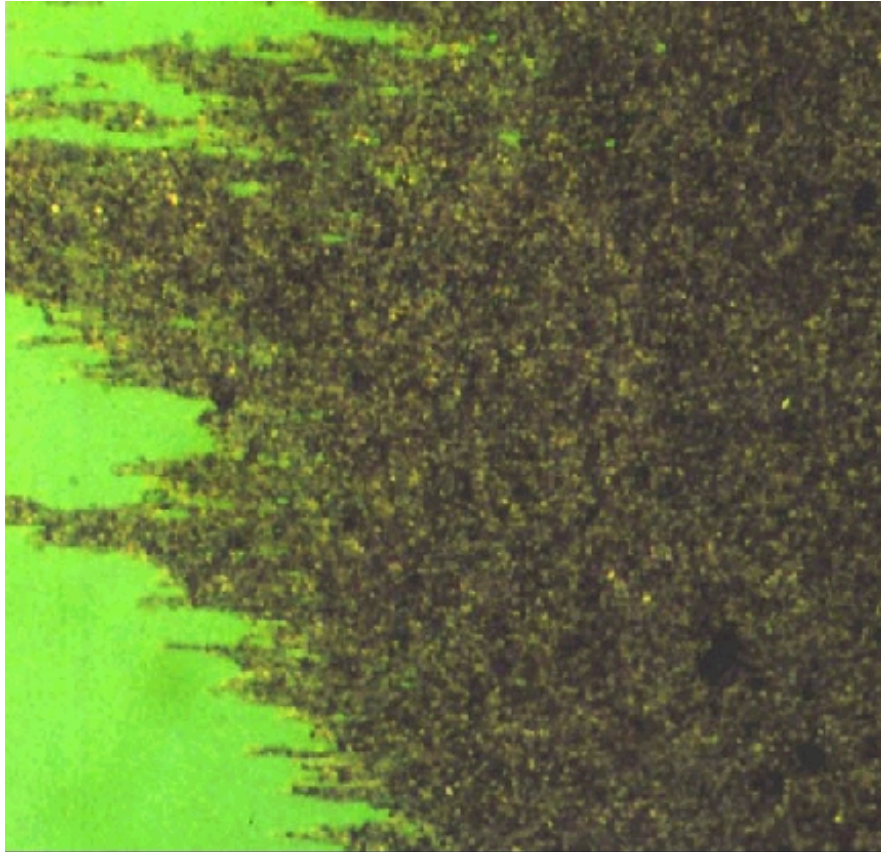


6. Óxidos rojos y desgaste abrasivo.

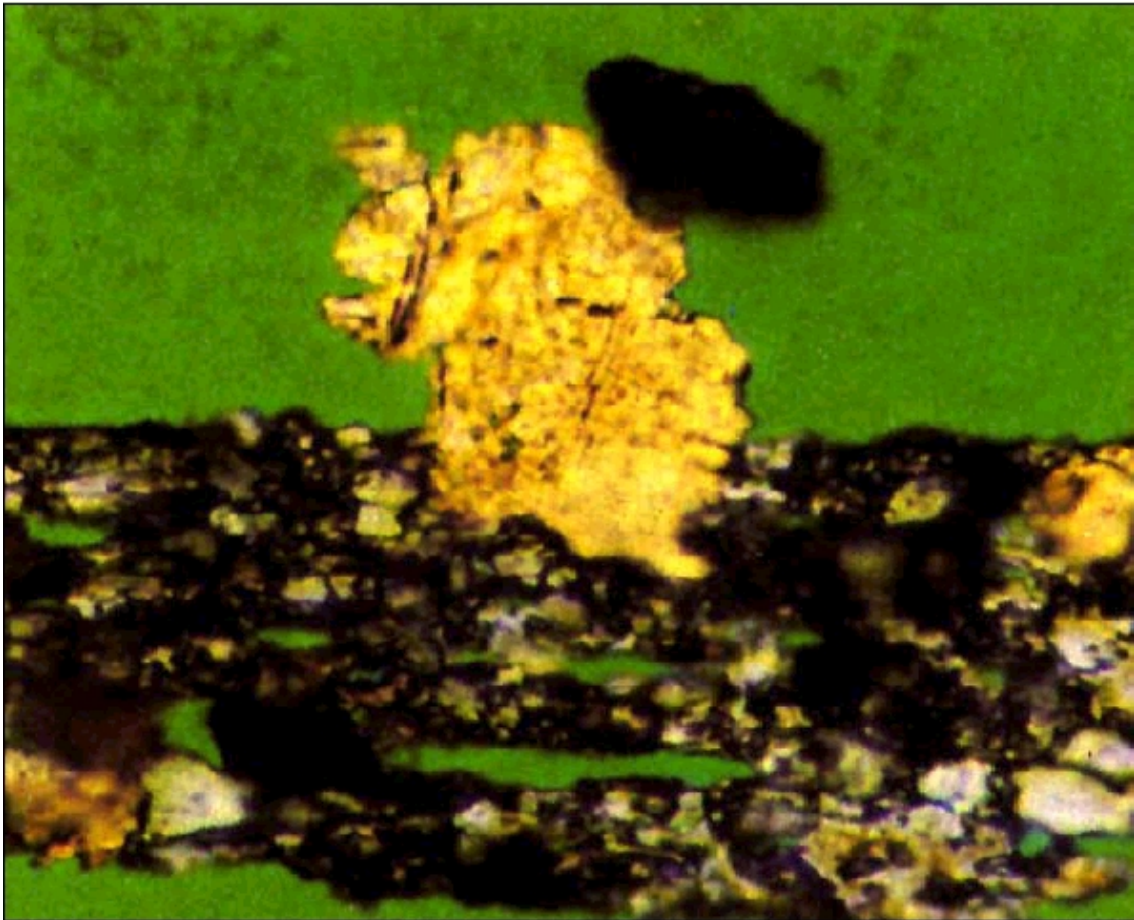


7. Partículas indicando desgaste corrosivo, cerca de la salida de la probeta.

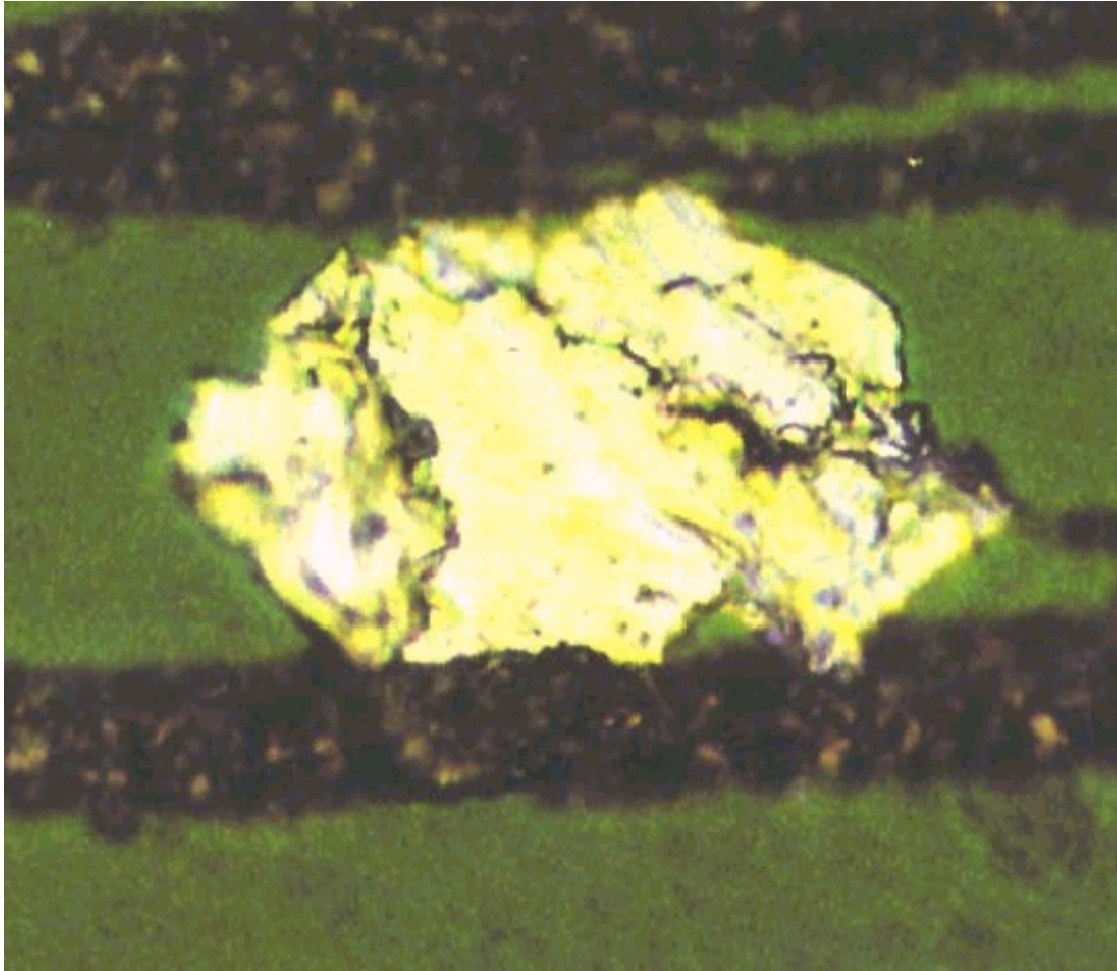




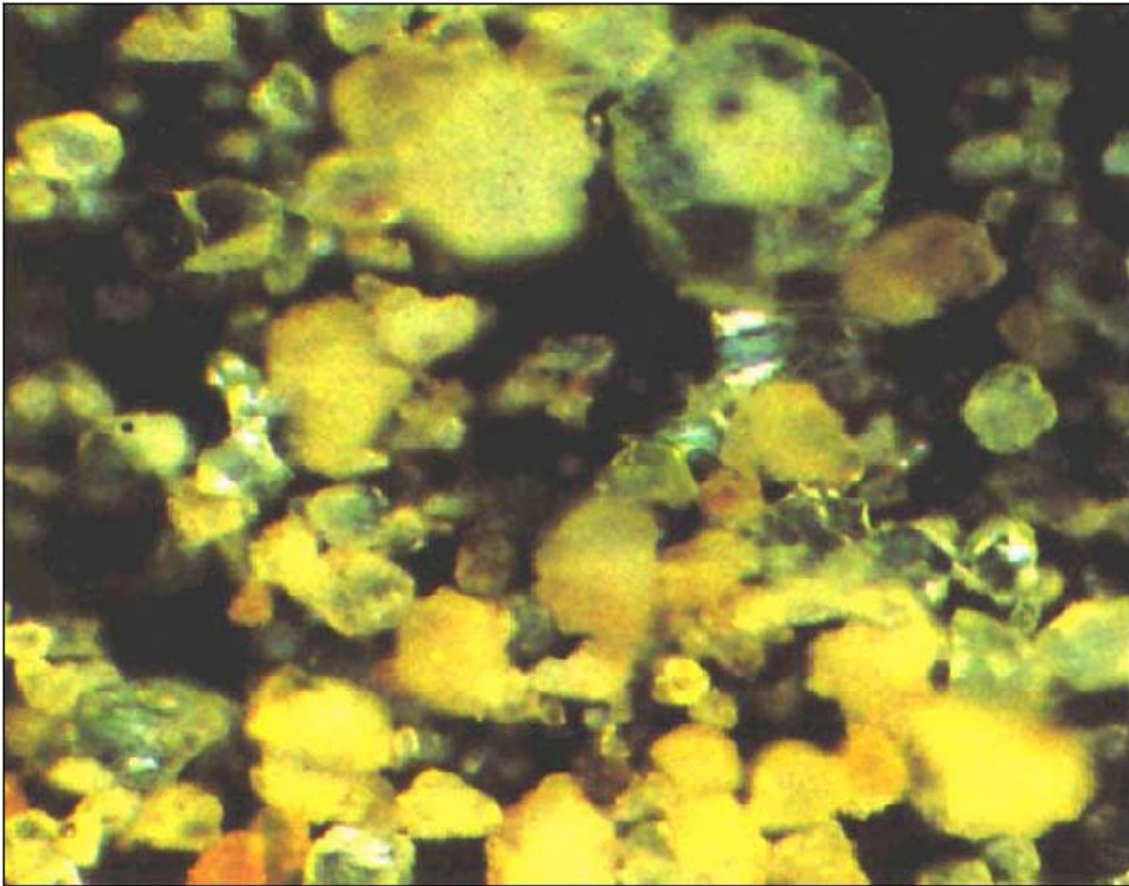
8. Partículas de cobre.



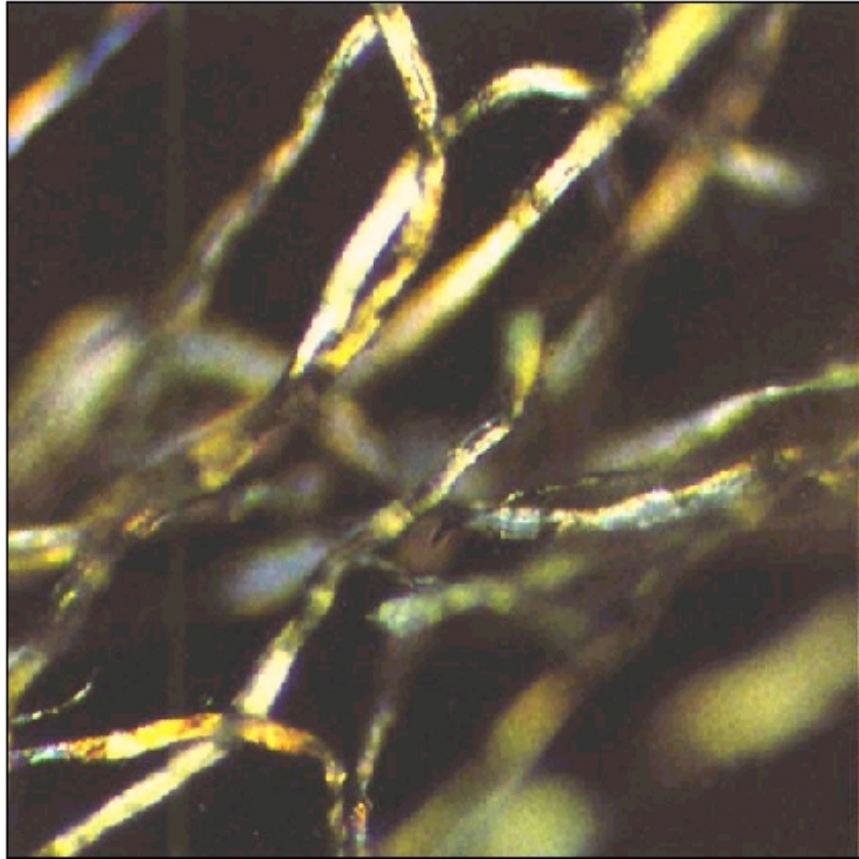
9. Partícula de aluminio.



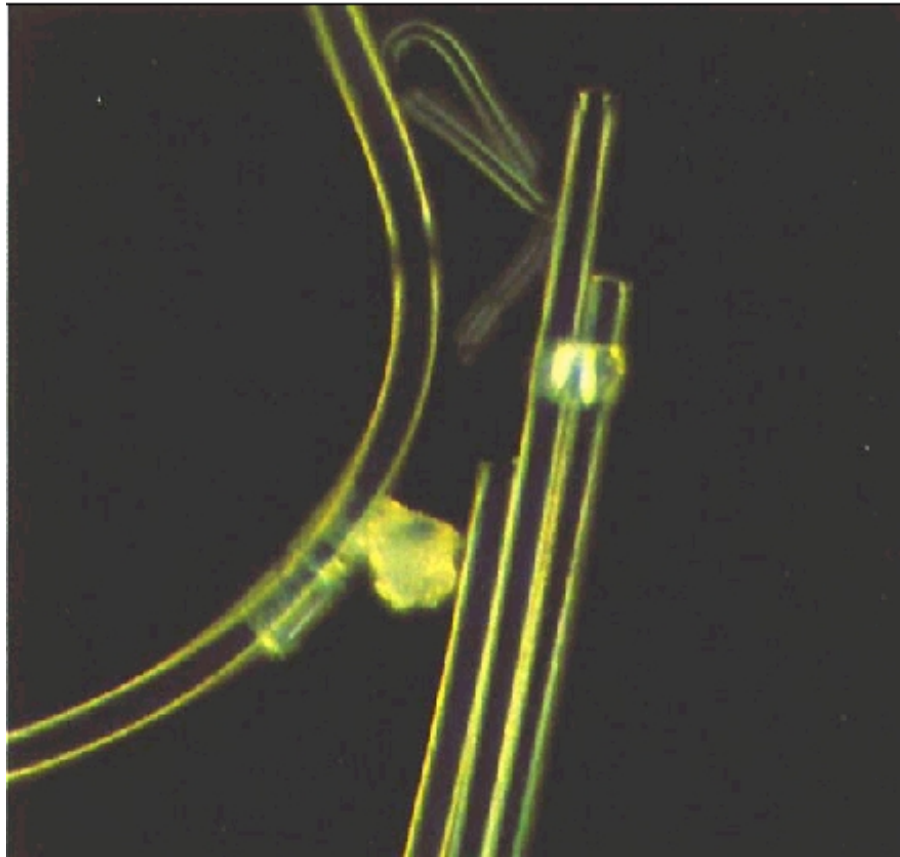
10. Silicio.



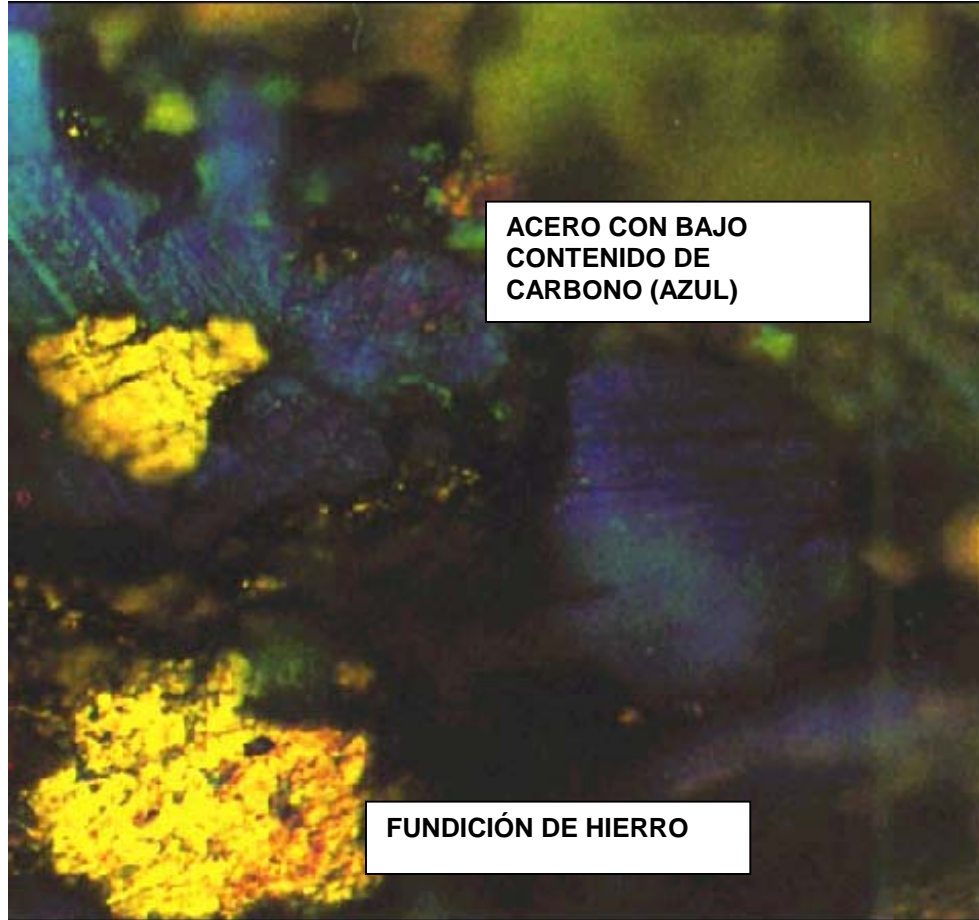
11. Fibras de celulosa.



12. Fibra de vidrio.



13. Después del tratamiento. Aceros aleados.



**Habilidad requerida para este análisis:** Se requiere un experto y un atlas de partículas.

**Ventajas:** El análisis del tamaño, color, forma, cambios en tratamiento térmico y efectos de luz de las partículas de desgaste indica al analista experto la naturaleza, severidad y causa raíz de un desgaste anormal. Esta información habilita al grupo de mantenimiento para implementar acciones correctivas y preventivas con excelente acertividad. Se detectan problemas mucho mas tempranamente que con el análisis de emisión y espectrometría. Acerca al analista a la causa raiz del problema.

**Desventajas:** Se requiere gran experiencia para la lectura del ferrograma. La preparación de la muestra requiere tiempo. Los equipos son bastante costosos comparados con los de otros análisis.

### BIBLIOGRAFÍA

1. ANALYTICAL FERROGRAPHY. MICHAEL BARRET AND MATT MCMAHON, INSIGHT SERVICES. OCT 2002
2. DIRECT READING AND ANALYTICAL FERROGRAPHY. JONATHAN SOWERS. POLARIS LABORATORIES LLC. SEPT 2002.
3. WEAR PARTICLE ATLAS. TELUS INC.
4. RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE. JOHN MOUBRAY. 2001
5. INFORMES MARSAL CONCESIONARIO SHELL MEDELLÍN COLOMBIA.

Envíenos sus comentarios sobre este tutorial a nuestro sitio web [www.a-maq.com](http://www.a-maq.com)