

Análisis de Aceite

Todo análisis de aceite persigue monitorear las causas de falla de los lubricantes con la finalidad de extender la vida útil de los equipos evitando su desgaste acelerado y degradación de sus componentes.

Esta búsqueda trata de identificar y eliminar las causas raíz de falla, permitiendo tomar acciones para desviar tendencias y mejorar las condiciones de operación.

Para lograr un programa efectivo y económico de MBC se debe realizar un estudio intensivo de la operación, mantenimiento e información de las fallas de los equipos más importantes de Planta. Será aconsejable considerar aquellas máquinas cuyos modos de falla tengan mayor gravedad, sus efectos y síntomas relevantes.

Pero cualquier análisis de un aceite, con el fin mencionado más arriba, se lo puede ubicar en alguna de las siguientes tres categorías.

¿Qué estamos analizando?	1. Propiedades de los fluidos.	2. Contaminación.	3. Partículas de desgaste.
	Propiedades físicas y químicas del aceite usado (proceso de envejecimiento)	Contaminantes destructivos de la máquina y del fluido.	Presencia e identificación de partículas de desgaste.
Pruebas posibles:			
Conteo de partículas	○	●	◐
Análisis de humedad	○	●	○
Análisis de viscosidad	●	◐	○
Densidad de partículas	○	○	●
Ferrografía analítica	○	◐	●
TAN/TBN	●	◐	◐
FTIR	●	◐	○
Prueba de membrana	○	●	●
Punto de inflamación	◐	●	○
Análisis de elementos	●	◐	●



Beneficio primario



Beneficio menor



Sin beneficio

Fuente: Laboratorio Dr. Lantos

1. Análisis de Propiedades de los Aceites

Las causas del envejecimiento de un aceite son:

- Fatiga por temperatura.
- Catálisis.
- Fatiga por corte.
- Aireación.
- Contaminación con Agua.

La fatiga por corte se presenta generalmente en los trenes de engranaje, aros y cilindros.

Con la presencia de agua generalmente se produce hidrólisis.

Oxidación

Los oxidantes convierten las moléculas de aceite en moléculas altamente reactivas como los peróxidos y los radicales libres.

Como oxidantes tenemos al **calor, aire, agua y catalizadores metálicos**.

La oxidación es retardada por los antioxidantes pero **no prevenida**.

Una oxidación excesiva aumenta la viscosidad del aceite por medio de la formación de lacas. En realidad a bajos niveles de oxidación el aumento de la viscosidad es leve.

Causas de oxidación

➤ **Temperatura**

La temperatura es uno de los peores enemigos del aceite en cuanto a la oxidación. Existe una regla práctica que dice que si a un aceite trabajando por encima de los 70 °C, le bajamos la temperatura de funcionamiento en 10 °C, aumentamos la vida útil al doble. Es decir que por cada 10 °C que se baje la temperatura se aumenta en una proporción de 2 su vida útil.

➤ **Agua**

El agua en el aceite puede incrementar la velocidad de oxidación en más de 10 veces. Sencillamente cuando se emulsiona con el aceite lava el paquete de aditivos antioxidantes.

➤ **Aire**

El porcentaje de aire disuelto en un aceite es proporcional al índice de acidez (TAN). Por ejemplo un aceite cuya concentración de aire pasa de 3% a 12%, aumenta en 4 veces su número ácido (el TAN pasa de 0.15 a 0.6)

➤ **Catalizadores metálicos**

Las partículas metálicas que más aumentan la acidez son las partículas de hierro, acero y cobre, sobre todo éstas últimas. En los aceites sintéticos este proceso se produce más lentamente.

Finalmente, para el estudio de la oxidación, podemos decir que monitoreando la **viscosidad** y el **TAN**, estamos en condiciones de analizar el estado del antioxidante.

Viscosidad

La viscosidad es uno de los parámetros más importantes de un aceite. Existen factores a tener en cuenta a la hora de elegir la viscosidad adecuada para una determinada aplicación.

Algunos factores que tienden a requerir viscosidades altas son abrasivos en el aceite, cargas de impacto, bajas velocidades, alta temperatura de operación. Mientras que los factores que nos permitirían seleccionar menores viscosidades son los aditivos EP, las altas velocidades, superficies suaves, y el uso de intercambiadores de calor.

El ingreso de agua aumenta la viscosidad del aceite pues una emulsión es más viscosa que el aceite.

Equivalencia de viscosidad

ISO VG (cSt)	SAE (motor)	SAE (engranajes)	SUS (100 °C)	SUS (40 °C)
150	40	90	75	700
100	30	85 W	60	500
68	20	80 W	55	350
46	20	75 W	45	250
32	10 W	--	43	150
22	5 W	--	40	100
15	--	--	--	80
10	--	--	--	60

Para convertir cSt a SUS multiplicar cSt por 4,632 a 40 °C ó 4,664 a 100 °C

Causa de los cambios de viscosidad

	Disminución de viscosidad	Incremento de viscosidad
Cambios en el aceite base (cambios moleculares)	<ul style="list-style-type: none"> • Ruptura térmica de las moléculas. • Cizallamiento de los mejoradores de IV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Polimerización • Oxidación • Pérdidas por evaporación • Formación de carbón y óxidos insolubles
Adiciones al aceite base (contaminación)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Combustible. ▪ Refrigerante. ▪ Solventes. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agua (emulsiones) ▪ Aireación ▪ Hollín ▪ Anticongelante

Gentileza Laboratorio Dr. Lantos

Todas las causas internas del aumento de la viscosidad son irreversibles, mientras que las causas externas (excepto la contaminación con anticongelante) son corregibles por deshidratación al vacío.

A qué temperatura es mejor medir la viscosidad.

- A 40 °C vemos mejor el incremento de viscosidad producido por la oxidación del aceite o por falla térmica. También para detectar la contaminación con agua, con combustible y con refrigerante.
- A 100 °C es mejor para detectar la ruptura del mejorador de IV y para analizar el comportamiento del aceite cuando se utiliza en aplicaciones a elevadas temperaturas.

Siempre es conveniente analizar aún la viscosidad del aceite nuevo, porque las normas internacionales toleran un +/- 10% de error en los valores indicados por el fabricante.

Acidez y Basicidad

Tanto el TAN (Total Acid Number) como el TBN (Total Basicid Number) indican la tendencia al agotamiento de ciertos aditivos como el ZDDP, detergentes e inhibidores de corrosión.

Se los denomina Número de Neutralización e identifica el inicio de la corrosión del aceite básico y mide el nivel de ácidos corrosivos. A su vez con el TBN se mide el nivel de reserva alcalina.

Con la acidez medimos la degradación o envejecimiento del aceite. El valor de acidez de un aceite nuevo está compuesto por la acidez de la base más la acidez de los aditivos.

$$TAN_{(Total)} = TAN_{(base)} + TAN_{(aditivos)}$$

El valor de reserva alcalina está compuesto por la reserva alcalina de los aditivos.

$$TBN_{(Total)} = TBN_{(aditivos)}$$

El TAN es muy útil para detectar ácidos corrosivos. Veamos la siguiente tabla.

Tipo de Acido	Fuente	Aplicación del lubricante
Orgánico	Productos de las oxidación del aceite	Ambientes severos
Clorhídrico	Degradación de refrigerante freón	Compresores frigoríficos
Fluorhídrico	Degradación de refrigerante freón	Compresores frigoríficos
Sulfúrico	Contaminación con gasoil, agua y H ₂ S. Ruptura de aditivos AD y EP	Motores diesel Compresores de gas natural Sistemas hidráulicos
Nítrico	Nitración y óxidos nitrosos	Motores a gas Motor a gasolina
Fosfórico	Ambientes de minas con fosfatos	Equipos móviles, circuitos hidráulicos especiales

Notas sobre el monitoreo del TAN

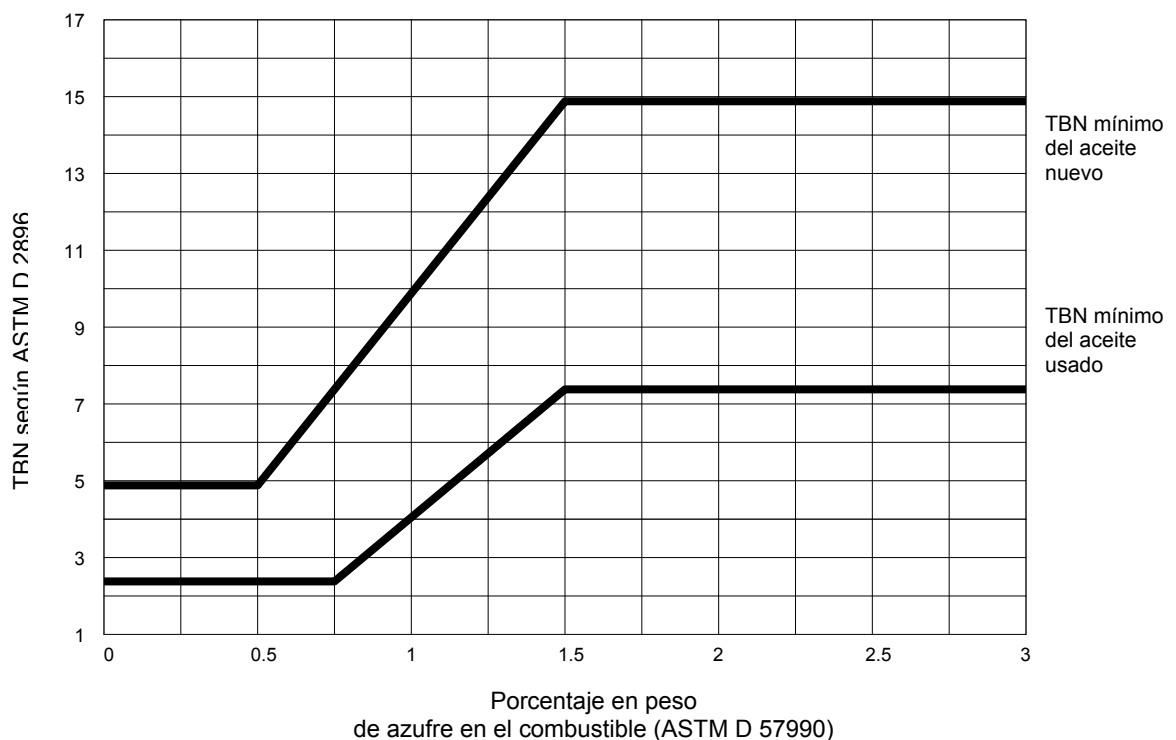
- El TAN pierde precisión en el rango 0,1 a 0,5; porque estos valores están dentro de la incertidumbre propia del método.
- Para aceites minerales, TAN > 4 se considera altamente corrosivo

- En aceites que trabajan a altas temperaturas, los ácidos de la oxidación pueden evaporarse o polimerizarse, dando como resultado la pérdida de los síntomas de oxidación.
- Cuando ingresa agua al aceite, los ácidos alcanzan el máximo potencial corrosivo.
- El TAN mide la concentración de ácido, no la potencia del mismo.

Por su lado el TBN mide la alcalinidad de los detergentes. Un valor de prevención en un TBN del 50% del valor del aceite nuevo.

Algunas causas posibles de un TBN bajo son:

- Cambios de aceite muy prolongados.
- Aceite inadecuado para esa aplicación.
- Sobrecalentamiento.
- Combustible con alto contenido de azufre.
- Excesiva fuga de gases en el motor.
- Humedad en el aceite.
- Alta contaminación metálica.



Gentileza Laboratorio Dr. Lantos

Agotamiento de aditivos

El agotamiento de los aditivos se puede dar de tres maneras diferentes. Por “descomposición”, por “separación” y por “adsorción”.

- Cuando el agotamiento se da por **descomposición**, las moléculas de aditivo cambian irreversiblemente. Se puede producir *ruptura* de las cadenas moleculares, *hidrólisis* por la combinación de las moléculas del aditivo con el agua, *degradación térmica* por la acción del calor, u *oxidación* con la formación de hidroperóxidos y radicales libres.

- Cuando ocurre una **separación** del aditivo se presenta o bien un asentamiento por *condensación* (los aditivos se vuelven insolubles y precipitan); por *filtración*; por *evaporación* (los deshidratadores de vacío evaporan los aditivos), o por *centrifugación* (los aditivos órgano-metálicos de alta densidad se separan bajo altas fuerzas centrífugas)
- Si ocurre el agotamiento por **adsorción**, los aditivos “dan un paseo” en las partículas o en las gotas de agua o se adhieren a las superficies.
El agua arrastra los aditivos polares al fondo del tanque (*lavado por agua*), las partículas atrapan los aditivos en los filtros o los arrastran al fondo del tanque (*separación por partículas*), los aditivos polares se adhieren a las superficies del equipo (*adsorción superficial*), o bien los aditivos AD y EP forman películas jabonosas (*contactos de rozamiento*).

Una prueba de campo común para detectar la presencia de carbón acumulado, es utilizar una hoja de papel secante y verter una gota de lubricante. Después de transcurrido unos minutos, el centro de la gota nos indica la presencia de carbón.

Pruebas comunes en aceites usados

Viscosidad (ASTM D445) a 40 °C y/o 100 °C

Neutralización (ASTM D974). Acidez (TAN) y Alcalinidad (TBN)

Punto de inflamación (ASTM D92). Presencia de fracciones de aceites ligeros que se vaporizan fácilmente.

Análisis de elementos (ASTM D5185). Presencia de elementos inorgánicos que producen cenizas, típicamente aditivos.

FTIR para aditivos. Localización por infrarrojos de aditivos antioxidantes y aditivos antidesgaste (moléculas)

Estabilidad a la oxidación (ASTM D2272). Condiciones altamente estresantes, determinan la vida oxidativa restante del aceite.

FTIR para oxidación. El infrarrojo determina varios componentes de la oxidación en el aceite.

Propiedades dieléctricas. Evalúa las propiedades aislantes de un aceite influenciado por óxidos y otras moléculas polares.

Resistividad/Conductividad (ASTM D1169). Evalúa la tendencia de conductividad de un aceite (similar a las propiedades dieléctricas)

Color (ASTM D1500). Color del aceite influenciado por degradación oxidativa, térmica y por contaminantes.

2. Análisis de Contaminación de Aceites

En el punto anterior se analizaron las maneras de evaluar las propiedades físicas y químicas del aceite. Si observamos el gráfico de la página 1, vemos que además es necesario monitorear los contaminantes que pueden estar afectando a la máquina y al propio aceite.

El análisis de la contaminación de los fluidos apunta a combatir la principal causa de desgaste y falla del lubricante, y constituye la estrategia central de un mantenimiento proactivo.

Observemos el siguiente cuadro:

Contaminantes	Cambios en la química del aceite	Cambios en las propiedades físicas del aceite	Químicamente atacan la superficie de la máquina	Mecánicamente destruyen la superficie de la máquina
Sólidos	Oxidación Agotamiento de aditivos	Efectos de la viscosidad	Barniz adherente	Abrasión Fatiga de la superficie
Agua	Oxidación Agotamiento de aditivos	Efectos de la viscosidad	Destrucción ácida Herrumbre	Cavitación Rayado
Combustible	Agotamiento de aditivos Aromáticos	Punto de inflamación Viscosidad	Acido sulfúrico	Pérdida de la resistencia de película
Glicol (anticongelante)	Oxidación Lodo	Incremento de la viscosidad	Herrumbre y corrosión Cavitación	Pérdida de la resistencia de película
Aire	Oxidación	Incremento de la acidez	Lacas/Carbonización	Fatiga de la superficie
Calor	Degradación térmica Oxidación	Incremento de la viscosidad	Barniz Acidez	Pérdida de la resistencia de película

2.a) Sólidos

De las partículas contaminantes importan cinco características:

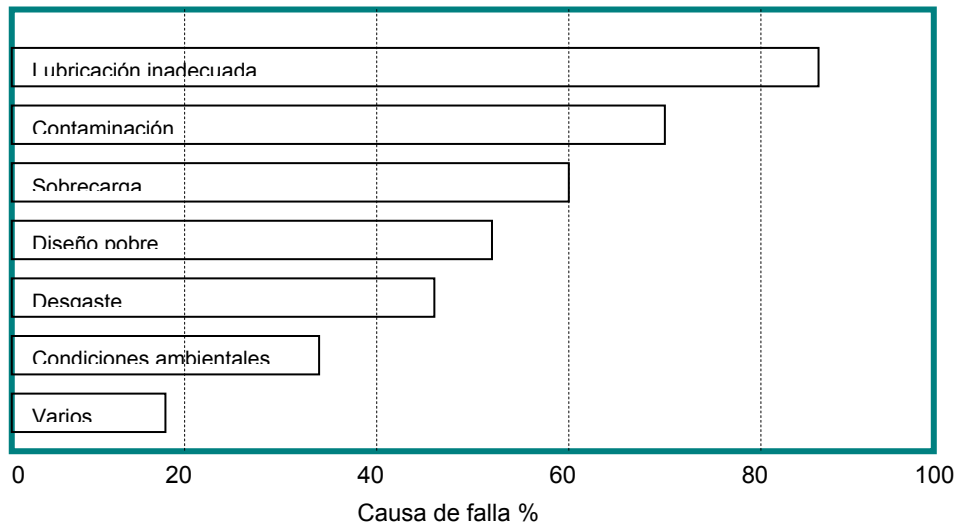
- 1) DUREZA**
- 2) CANTIDAD**
- 3) TAMAÑO**
- 4) PESO**
- 5) ANGULARIDAD**

Cuando las partículas contaminantes ingresan a las máquinas sufren un proceso de fragmentación y propagación. Las partículas de mayor tamaño al entrar en contacto con los mecanismos producen un mayor número de partículas de menor tamaño. Algunas partículas serán eficazmente transportadas a los elementos filtrantes mientras que otras se sedimentarán.

Según General Electric “La confiabilidad y el mantenimiento son una función del control de la contaminación y el control de la contaminación conduce a una vida más larga”.

“Los rodamientos podrían tener una vida infinita si las partículas más grandes de la película lubricante fueran eliminadas”. S.K.F.

Causas de falla en los rodamientos (SKF)



La limpieza de los lubricantes se mide en unidades de limpieza. La limpieza de los lubricantes o su nivel de limpieza afecta positiva y directamente a la vida de la máquina.

Se dice que una unidad de mejora en la limpieza del lubricante produce cinco unidades de extensión de vida de la máquina.

Veamos algunos valores relativos sobre el tamaño de las partículas. La pregunta sería ¿cuán grande es una partícula de 10 micrones?

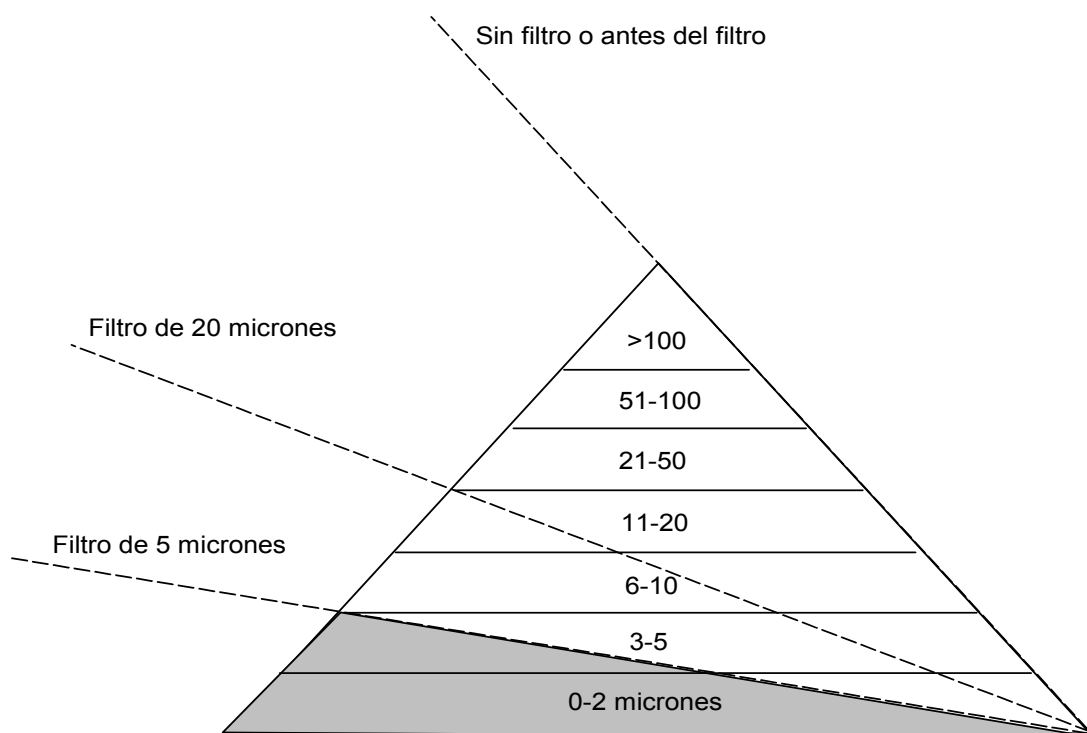
El ojo humano no es capaz de ver por debajo de los 40 micrones. Un micrón es igual a 0,001 mm, es decir una milésima de milímetro.

Valores relativos:

Elementos	Tamaño (micrones)
Cabello humano	80
Polvo fino del piso	40
Glóbulo blanco	20
Polvo de talco	10
Glóbulo rojo de la sangre	5
Bacteria	3

Una relación interesante es que mientras la partícula se hace grande.....la cantidad se hace pequeña.

Que podemos esperar durante un conteo de partículas de un aceite después del filtro.



Conteo de partículas después de un filtro de 5 micrones.

Código ISO de contaminación de sólidos

Ejemplo de un conteo de partículas (cerca de una parte por millón)	
Tamaño (micrones)	Cantidad de partículas mayores que (por ml)
1	1752
4	1396
6	517
10	144
14	55
20	25
50	1.3
75	0.27
100	0.08

$R_4/R_6/R_{14}$

ISO 16/13

Cantidad de partículas por ml		
Mayores que	Hasta e inclusive	Número R
80000	160000	24
40000	80000	23
20000	40000	22
10000	20000	21
5000	10000	20
2500	5000	19
1300	2500	18
640	1300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2.5	5	9
1.3	2.5	8
0.64	1.3	7
0.32	0.64	6
0.16	0.32	5
0.08	0.16	4
0.04	0.08	3
0.02	0.04	2
0.01	0.02	1

Particularidades del código ISO

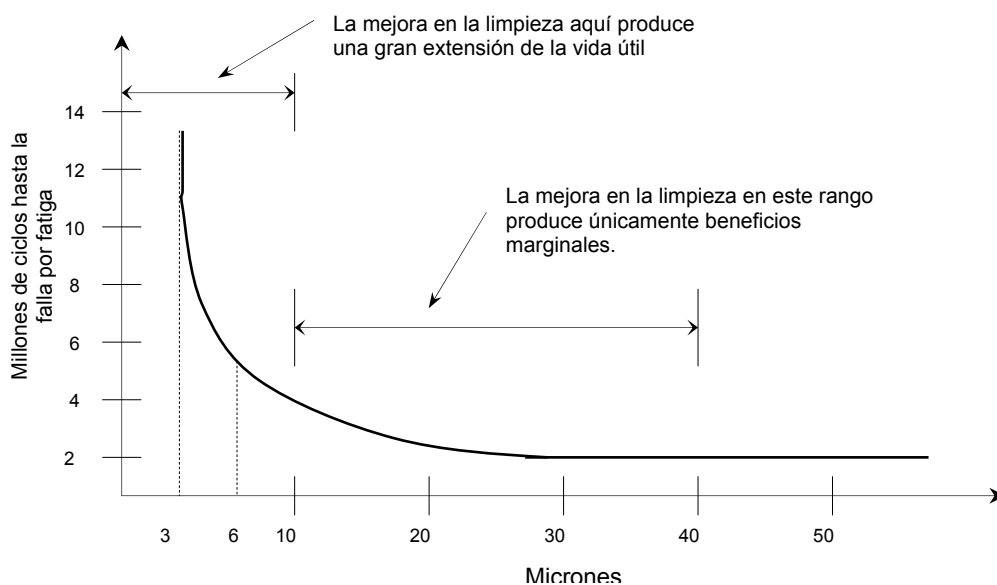
4 micrones	6 micrones	14 micrones	Código ISO
2501	321	41	19/16/13
5000	640	80	19/16/13
5001	641	81	20/17/14
10000	1300	160	20/17/14

En la tabla de la página anterior aparece un ejemplo de un conteo de partículas cerca de una parte por millón. Aproximadamente 10 ppm es equivalente a 0,001%.

Tamaño de partículas vs. vida de un rodamiento

Macpherson probó la vida de un rodamiento utilizado en una caja de engranajes de un helicóptero, filtrando el aceite a diferentes tamaños.

Curva de Macpherson



Se pueden establecer algunas relaciones que se verifican en la mayoría de los casos. Por un lado tenemos que mientras más pequeñas son las partículas, mayor cantidad habrá.

A su vez, mientras más pequeña es la partícula, mayor es su dureza.

Lo anterior significa que controlar la población de las partículas pequeñas es la clave para el control del desgaste.

Tres pasos fáciles para el Mantenimiento Proactivo de aceites

- 1) **Establecer los objetivos o metas de limpieza. Los nuevos objetivos deberán mostrar mejoras en la limpieza.**

Engranajes Industriales	17/16/13
Caja engranajes móviles	17/16/13
Rodamientos de bolas	15/13/11
Rodamientos de rodillos	16/14/12
Motor diesel	17/16/13
Turbina de vapor	18/15/12
Máquina de papel	19/16/13
Circuitos hidráulicos	16/14/11
Compresores	17/15/12

2) Tomar acciones específicas para lograr los objetivos.

- a) Reducir el ingreso de contaminantes
- b) Mejorar la filtración

Algunos valores de limpieza que se pueden obtener en función del tipo de filtro.

Filtro	ISO
25 μ nominales	21/18
10 μ nominales	19/16
10 μ absolutos	16/13
6 μ absolutos	14/11
3 μ absolutos	12/9

3) Medir los niveles de contaminación frecuentemente

- a) Lo que se puede medir, se puede controlar
- b) Exhibir las cartas de control con los resultados de las mediciones

Medios Filtrantes

Fibra de vidrio	Celulosa (pulpa de papel)
Más poros por cm^2	El medio se obtura por el tamaño de la fibra
Tamaño de poro consistente	Porosidad inconsistente
Mayor capacidad de retención de tierra	Absorbe agua
Tolerante a altas temperaturas	Sujeto a la fatiga y falla por alta temperatura
	Económico

Los elementos filtrantes pueden ser de tasa nominal o de tasa absoluta.

Tasa nominal: unidad en micrones que indica el porcentaje de remoción de contaminante. No es representativa por su falta de reproducibilidad.

Tasa Absoluta: es el tamaño en micrones de la partícula dura más grande y esférica que pasa por el elemento filtrante.

Tasa Beta (β_x): Es el cociente del número de partículas iguales o mayores a un tamaño dado (x) en el fluido entrante con respecto a las partículas del mismo tamaño (x) en el fluido saliente.

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{\beta - 1}{\beta} \times 100$$

2.b) Agua

El agua es el segundo contaminante más destructivo, aunque frecuentemente es ignorada como una causa primaria de falla. Dentro de las mejores prácticas para evitar la contaminación debemos restringir su ingreso y reconocer su presencia. Además debemos analizar su estado y concentración, y por último eliminarla.

El agua puede encontrarse en diferentes estados de coexistencia. Partiendo de la concentración tenemos que el agua puede estar disuelta (invisible). En este caso las moléculas de agua están dispersas una por una en todo el aceite como humedad. Su concentración puede estar entre 0 y 500 ppm, dependiendo del tipo de aceite, su vejez y su temperatura.

Luego podemos encontrar agua emulsionada (estado nebuloso). El agua se encuentra formando glóbulos microscópicos dispersos en una suspensión estable como niebla. Puede haber entre 200 y 1.000 ppm, variando esta cantidad en función del envejecimiento del aceite.

Por último el agua se puede encontrar libre, cuando se mezcla con el aceite se asienta en el fondo del tanque / depósito como lluvia. Puede estar en concentraciones mayores a 1.000 ppm.

Los efectos del agua se manifiestan tanto en el aceite base como en los aditivos. En la base por medio de la hidrólisis y la oxidación. Además fomenta los problemas de aireación y tienen efectos devastadores sobre la viscosidad. Por último afecta a las propiedades dieléctricas porque reduce la capacidad aislante del aceite.

Por otra parte ataca a los aditivos. A los antioxidantes formando hidrólisis, es decir una reacción química con el agua, forma sedimentos y ácidos. Los detergentes y dispersantes se lavan formando lodos, sedimentos, bacterias, etc. Es característico el mal olor de las bacterias en los filtros cuyo aceite contiene bacterias. El aditivo ZDDP se ve seriamente afectado, dando como resultado sulfuro de hidrógeno y ácido sulfúrico.

2.c) Aire

El aire puede encontrarse en cuatro (4) estados de coexistencia. Puede estar **disuelto**, en niveles normales de hasta un 10% para aceites minerales. No hay nebulosidad. De esta forma se acelera el proceso de agotamiento de los aditivos y la oxidación.

Otro estado posible es el **atrapado**, donde se forman burbujas de aire microscópicas inestables. Ya hay nebulosidad. Tiene efectos sobre la compresibilidad del aceite. Pobre transferencia de calor, falla de la resistencia de la película, oxidación, cavitación y formación de barniz. Puede estar **libre**, como bolsas de aire atrapadas en zonas muertas, regiones altas y tuberías. Trae efectos de compresibilidad hidráulica, corrosión, pérdida de los controles del sistema.

Por último la podemos encontrar como **espuma**, en los tanques altamente aireados y superficies de los contenedores (> 30%). Los inconvenientes sobre la maquinaria son los mismos que en el caso del agua en estado libre.

2.d) Calor

Generalmente hay que pagar un alto precio por operar el aceite a altas temperaturas. Ya se mencionó anteriormente que para un aceite que trabaja por encima de los 70 °C, si logramos bajar su temperatura de operación en 10 grados, aumentamos su vida útil al doble. Son numerosas las desventajas, pero las principales son:

agotamiento de aditivos, oxidación acelerada, barniz, carbonización, pérdida de la resistencia de película e incremento de la corrosión.

2.e) Contaminación con Glicol/anticongelante

Dentro de sus efectos encontramos el espesamiento del aceite, emulsiones y geles, formación de ácidos, falla de filtros y pobre lubricación.

2.f) Combustible

La contaminación por combustible en un aceite se da por dilución. En un motor de combustión interna puede haber fuga de gases, excesiva marcha en vacío, anillos y/o camisas dañados. Junto con posibles defectos en inyectores y bomba de combustible son las principales causas que pueden dar origen a la contaminación por dilución.

Los efectos sobre el aceite son la pérdida de viscosidad, dilución de aditivos, pérdida de película lubricante, oxidación prematura del aceite y formación de azufre en el aceite con riesgo de corrosión.

3. Análisis de Partículas de Desgaste

El tercer segmento en el análisis de los aceites es determinar todas las características posibles de las partículas de desgaste.

Lo que se intenta determinar es origen del desgaste, cuán avanzado se encuentra, cuál es la velocidad y como pudo haberse evitado el problema.

El desgaste generalmente comienza en forma lenta con pocas partículas para luego terminar en la falla catastrófica con una densidad de población de partículas extremadamente grande.

Algunas de las tecnologías utilizadas para analizar las partículas de desgaste son:

- **Análisis espectrométrico:** Los resultados que se obtienen son en ppm. Se puede determinar los elementos que constituyen la partícula, la metalurgia y la concentración.
- **Análisis de densidad ferrosa:** Se trata de una trampa magnética, permite determinar tamaño, metalurgia y concentración.
- **Ferrografía analítica:** Tiene gran utilidad para tamaños mayores a 8 micrones. Es un método visual y se puede determinar concentración, metalurgia, tamaño, textura, etc.

Fuente:

Aceites y Lubricantes Industriales.- Y.P.F.

Seminario de Mantenimiento Proactivo y Análisis de Aceites.- Laboratorio Dr. Lantos y Noria Asoc.

Informes Técnicos y Publicaciones de la firma S.K.F.