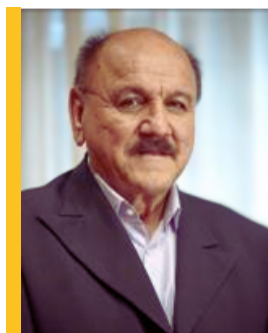


Artículo técnico TICT1YCT2ML02 - 2023

CANCER TIPO 1 Y CANCER TIPO 2 EN LOS MECANISMOS LUBRICADOS

Marzo 15 de 2023
Medellin - Colombia



PEDRO R. ALBARRACIN AGUILLON
Ingeniero Mecánico
Universidad de Antioquia, Medellín 1979
Especialista en Gerencia de mantenimiento
Universidad de Antioquia, Medellín 2020
Director Desarrollo de Tecnología
pedroalbarracin@tribosingenieria.com.co
Cel 320-6232768
Medellín, Marzo 15 de 2023

1. INTRODUCCION

Hablar de "cáncer en los mecanismos lubricados de las máquinas", parecería que no tiene sentido y es como si fuese de ciencia ficción, porque esto es propio de los seres humanos, pero en este caso se hace referencia a situaciones imperceptibles cuando comienzan, que avanzan poco a poco y cuando finalmente se quiere corregir el problema ya es demasiado tarde y la única solución que queda es la de reemplazar el mecanismo por otro nuevo porque ha quedado completamente inservible o por fuera de especificaciones. Es muy importante dejar claro que cualquiera de los 5 tipos de desgaste como el adhesivo, fatiga superficial, erosivo, abrasivo y corrosivo siempre se van a presentar, es imposible evitarlo, pero mediante el monitoreo periódico del aceite en el laboratorio y del mecanismo por

vibraciones, ultrasonido y termografía, se puede garantizar que va a ser normal y que no va a conducir a una situación de falla antes de la terminación de la Vida disponible Vd en horas de operación. El tipo de desgaste que conduce a problemas de "cáncer tipo 1" en los mecanismos lubricados es la falla por fatiga superficial y a "cáncer tipo 2" es la falla por erosión. ¿Por qué se pueden correlacionar como el "cáncer"? pues muy sencillo, porque en su etapa inicial no son perceptibles y en algunos casos es complicado detectarlos por algunas de las técnicas de monitoreo conocidas.

1.CANCER TIPO 1

El "cáncer tipo 1" en los mecanismos lubricados es el desgaste anormal o falla por fatiga superficial como resultado del aceleramiento de la fatiga superficial debido

a esfuerzos de compresión y de tensión de mayor amplitud e intensidad en la zona de fricción debido a sobrecargas dinámicas o a

la falta de amortiguamiento de la Capa fluida 3 de la película lubricante ho, ya sea porque en el caso de la lubricación hidrodinámica (HD) la capa fluida 3 está afectada por una mala selección del grado ISO 3448 (bajo o alto) del aceite que se debe utilizar, contaminación con otros fluidos como el agua o aceites de menor viscosidad, falta de enfriamiento o por problemas mecánicos como desalineamiento, desbalanceo, sobrecargas dinámicas, etc., que cambian el estado de la fricción (fluida a mixta), elevando la temperatura de operación y dando como resultado la disminución del viscosidad del aceite, o en el caso de la lubricación Elastohidrodinámica (EHD) por la utilización de un aceite de menor grado ISO 3448 o con modificadores de fricción Extrema Presión EP inadecuados esto es, si se requieren de segunda generación (EP2) con una capacidad de carga en la prueba de 4 bolas para aceites ASTM D2783 o para grasas ASTM D2596 entre 350 y 750 kgf, utilizar EP de primerageneración (EP1) con una capacidad de carga entre 150 y 350 kgf

fricción debido a sobrecargas dinámicas o a

dando lugar a una reducción severa de la Vida disponible Vd en horas de operación. El desgaste anormal por fatiga superficial se caracteriza por la aparición prematura de fisuras microscópicas debajo de la zona de fricción, que luego se unen entre sí y avanzan, formando grietas en la superficie de fricción que finalmente ocasionan descascarillado o descostrado causando la destrucción del mecanismo.

La Capa fluida 3 de la película lubricante ho ya sea completa en lubricación HD o parcial en EHD se comporta como miles de “resortes” que amortiguan y hacen que la energía transmitida en la zona de fricción por la carga dinámica debida al torque transmitido sea absorbida al máximo de tal manera que la intensidad de los ciclos de fatiga sobre la rugosidad de las dos superficies de fricción sometidas a deformación elástica por compresión y expansión sea mínima y el mecanismo pueda alcanzar la Vida disponible Vd en horas de operación. Ver Figura 1.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 1

Falla por fatiga superficial. (a) En los elementos rodantes de un rodamiento rígido de bolas. (b) En la pista interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos. (c) En la pista interior de un rodamiento de doble hilera de rodillos. (d) En los rodillos y en la pista interior de un rodamiento de doble hilera de rodillos.

Para evitar que se presente el desgaste anormal o la falla por fatiga superficial, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos relacionados con la lubricación del componente:

1. Utilizar el aceite del grado ISO 3448 correcto.
2. Utilizar el tipo de modificador de fricción antidesgaste AW o EP correctos.
3. Utilizar aceites con el mayor Índice de Viscosidad (IV) posible.
4. Catalogar el aceite ISO 3448 para el componente lubricado.

Mantener permanentemente la temperatura de operación Top en la zona de fricción dentro de la ventana operativa OC (Operación Confiable) que debe ser como máximo de 65°C, preferiblemente que no sea superior a 55°C. En este aspecto se debe tener en cuenta que entre mayor sea la temperatura de operación, la capacidad de carga del material del mecanismo en la zona de fricción disminuye y la deformación elástica por compresión y expansión de

las crestas de la rugosidad de las dos superficies de fricción será mayor, acelerando la formación de fisuras y grietas por debajo de la superficie de fricción lo que conllevará a un desgaste anormal o falla por fatiga superficial.

6. Verificar el estado de los enfriadores de aceite (en caso de que el sistema de lubricación sea por circulación de aceite y los tenga) y mantenerlos en óptimas condiciones de limpieza, además de hacerles la prueba hidrostática según ASTM E1003-05, tanto por el lado casco como por el lado tubos, como mínimo cada 2 años.

7. Monitorear por Espectrofotometría de Emisión Atómica EEA el contenido de metales de desgaste provenientes de los mecanismos lubricados, presentes en el aceite, por lo menos cada tres meses y cada año por ferrografía analítica y estar atentos a los valores hallados en ppm y a los ferrogramas. Si la cantidad reportada de metales de desgaste se sale del rango de desgaste normal (OC) puede ser que se esté presentando un desgaste superficial.

8. adhesivo incipiente que incentiva el desgaste anormal o la falla por fatiga superficial.

En los sistemas de lubricación por circulación de aceite que cuentan con un volumen de aceite importante, por ejemplo, 100 o más galones de aceite, es factible que el monitoreo del contenido de metales de desgaste por EEA no reporte algún metal en ppm debido a que en un volumen tan importante de aceite como éste, los metales de desgaste que puedan haber se hayan diluido y no muestre alguna cantidad; esto conlleva a que en el caso de máquinas críticas se deba incluir el análisis de laboratorio por ferrografía analítica cuando los valores de vibración monitoreados den en alarma (OF) o en corte (EF) o como un análisis de laboratorio incluido en las pruebas especiales de laboratorio anuales.

9. Tomar valores de vibración y termografía con la misma frecuencia de los análisis de laboratorio, con el fin de verificar si hay problemas de sobrecargas dinámicas en la zona de fricción del mecanismo o si la temperatura de operación Top está por encima del valor normal (OC) lo cual puede ocasionar disminución en la viscosidad del aceite y por lo tanto de la Capa fluida 3 de la película lubricante ho, reduciendo el amortiguamiento.

10. En caso de que el aceite se contamine con otro de menor viscosidad, cambiarlo y si es con agua someterlo a un proceso de diálisis por termovació hasta dejarlo completamente seco.

11. Si cambian las condiciones operacionales de la máquina y las cargas dinámicas aumentan se debe hacer un análisis tribológico con el fin de determinar si la viscosidad del aceite es la misma al igual que los requerimientos de los modificadores de fricción AW y EP. En la mayoría de los casos cuando se presenta este tipo de situaciones, la viscosidad y el tipo de modificadores de fricción son diferentes a los que inicialmente tuvo en cuenta el fabricante de la máquina.

12. Se debe verificar que el componente lubricado tenga venteo, ya que en caso contrario, se presuriza la carcasa y el aire caliente al enfriarse genera agua, la cual se mezcla con el aceite disminuyendo su viscosidad.

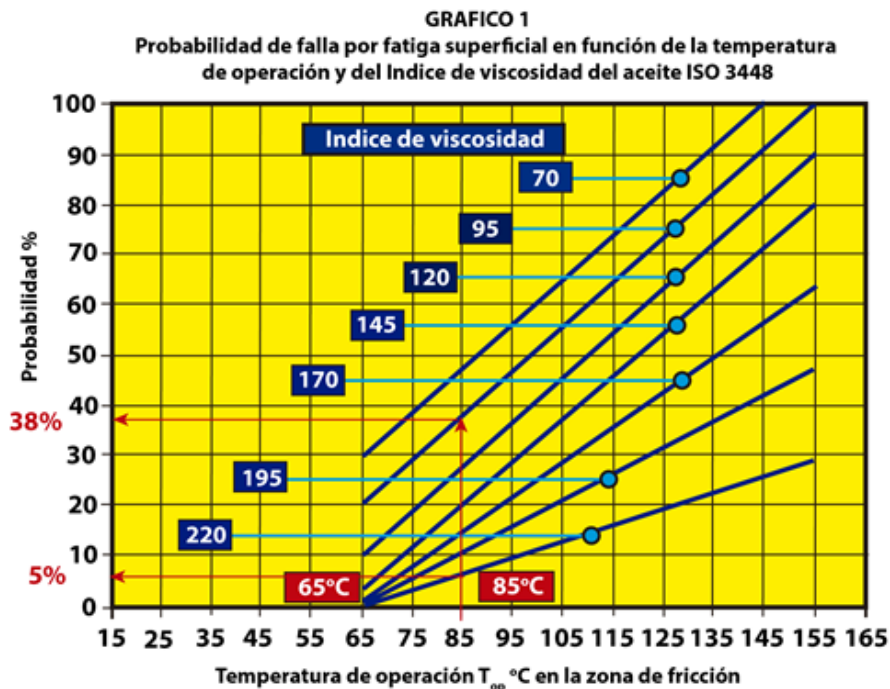
Se debe tener claro que el desgaste por fatiga superficial es una situación normal e inherente a la Vida disponible, Vd del mecanismo, que de todas maneras, después de que ésta se cumpla y si el mecanismo no se cambia, se presentará la falla por fatiga superficial. Son dos conceptos que tienen que ver con lo mismo, pero el primero es una condición normal e inevitable, mientras que el segundo es anormal y controlable.

La probabilidad de que ocurra la falla por fatiga superficial también depende entre otros factores del Índice de Viscosidad (IV) del aceite ISO 3448, de acuerdo con la prueba ASTM D2270 y de la temperatura de operación, °C en la zona de fricción y de qué magnitud de incremento de la Top se puede presentar en un momento dado como resultado del aumento de la misma por un enfriamiento inadecuado o por un incremento de la fricción por afectación de la película lubricante ho o por sobrecargas dinámicas.

Por ejemplo, si la temperatura de operación Top en la zona de fricción del cojinete liso en el lado de alta presión de una turbina de vapor es de 65°C y el Índice de Viscosidad del aceite de grado ISO 68 AW que se está utilizando es de 220, la probabilidad de que se presente la falla por fatiga superficial es del 0%. Ver Gráfico 1. En este caso, si la temperatura de operación Top, por alguna razón en la zona de fricción aumentará 20°C como resultado de problemas de enfriamiento, o sea pase de 65°C a 85°C, se tendría que la probabilidad de que se presente la falla por fatiga superficial con el aceite de grado ISO 68 AW con el IV de 220 sería del 5% y a la misma temperatura de

operación, si se utilizase un aceite de grado ISO 68 AW pero con un IV de 95, la probabilidad de que se presente la falla por fatiga superficial es del 38%. En este caso, con fines didácticos y para facilitar la explicación, se omitió el análisis de si a estas condiciones de temperatura de operación Top

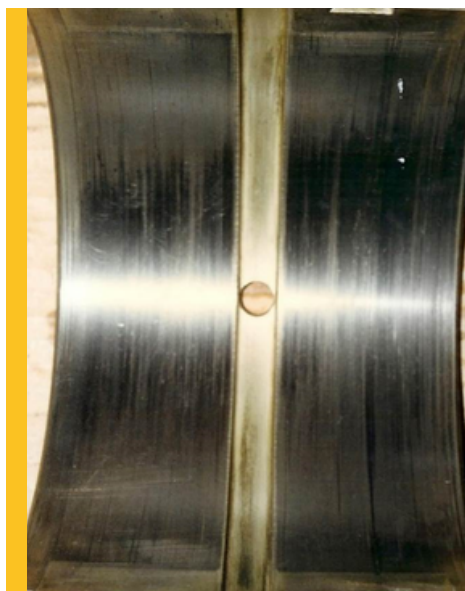
se rompe la Capa fluida 3 de la película lubricante ho y se presenta primero la falla por adhesión, antes que la falla por fatiga superficial (este análisis se hace calculando el factor de seguridad de la película lubricante, λ , para la nueva temperatura de operación en la zona de fricción).



1.CANCER TIPO 2 EN LOS MECANISMOS LUBRICADOS

El cáncer tipo 2 en los mecanismos lubricados es la falla por erosión, la cual conlleva a la pérdida de tolerancias entre las superficies de fricción, afectando el espesor de la Capa fluida 3 de la película lubricante ho al evitar que el aceite tenga el tiempo suficiente de residencia en la zona de fricción para absorber la máxima cantidad de calor posible y mantener de esta manera la temperatura de operación dentro del rango confiable y por lo tanto la viscosidad del aceite y la dilatación de las superficies de

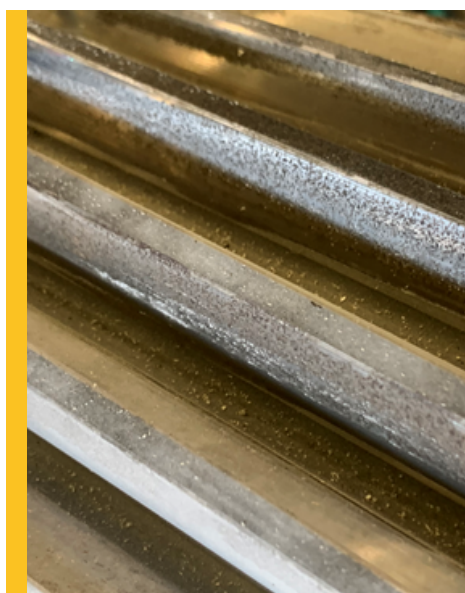
fricción. La falla por erosión no es perceptible por ninguna de las técnicas utilizadas para la evaluación del desgaste como la espectrofotometría de emisión atómica EEA, el conteo de partículas ISO 4406-99, la ferrografía analítica, etc, lo que hace más difícil poderla detectar a tiempo y evitarla. Más aún si se hace una inspección visual, como en el caso de engranajes y cojinetes lisos, las superficies afectadas por la erosión muestran un aspecto suave y brillante que pueden conducir a pensar que el mecanismo está operando correctamente y que antes por el contrario el desgaste por erosión es normal. Ver Figura 2.



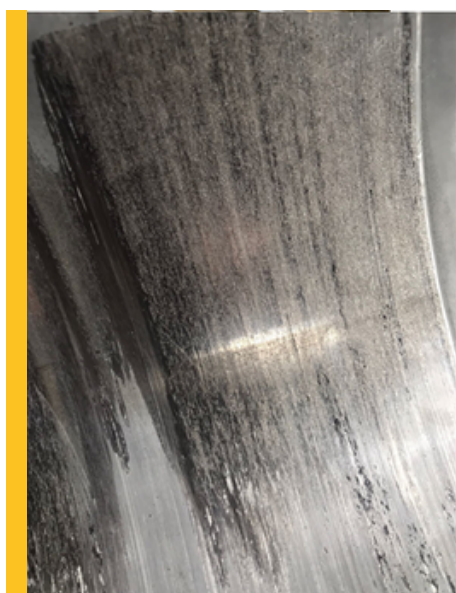
(a)



(b)



(a)



(b)

FIGURA 2

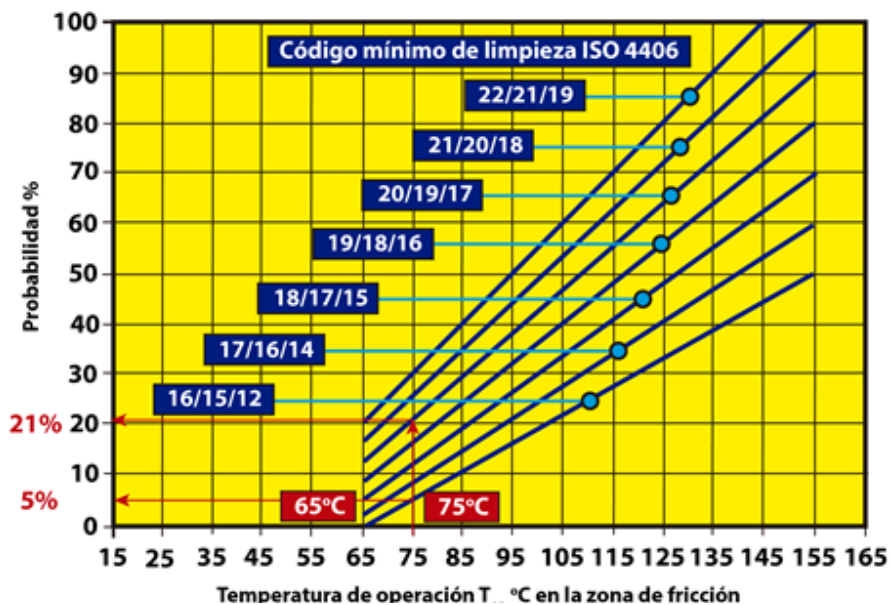
Desgaste erosivo anormal en la superficie de fricción. (a) Cojinete liso (b) Rodillos de un rodamiento de rodillos cilíndricos. (c) Dientes de un engranaje helicoidal. (d) Cojinete liso.

El desgaste erosivo con el tiempo conlleva a pérdida normal de material en la zona de fricción y a cambios dimensionales que definen el valor de la Vida disponible V_d en horas de operación. El desgaste anormal o la falla por erosión acelera la pérdida de material y el cambio dimensional entre las superficies de fricción, lo cual se puede ver reflejado en la rata o cantidad de partículas metálicas de desgaste en partes por millón (ppm) presentes en la muestra de aceite analizada en el laboratorio por Espectrofotometría de Emisión Atómica (EEA) que va a ser mayor que la tendencia al desgaste en ppm para los diferentes metales que constituyen la metalurgia del mecanismo;

también puede ocasionar alteraciones irregulares en la rugosidad de las superficies de fricción alterando en algunos casos significativamente el acabado superficial ISO 468 que conlleva a un aumento en la distancia entre las superficies de fricción del mecanismo como por ejemplo el backlash entre los dientes de los engranajes y el juego diametral J_d en cojinetes lisos, que dentro de una frecuencia de inspección determinada estarán por encima del valor normal para el número de horas de trabajo que tengan. Más aún, es factible que en la evaluación del desgaste anormal por erosión, éste pase inadvertido, cuando se hace teniendo en cuenta la cantidad de partículas metálicas presentes en el aceite si el volumen de aceite conque trabaja el componente es alto, ya que entre mayor sea éste, el contenido de partículas metálicas de desgaste presentes en el aceite se diluyen más, por ejemplo no es lo mismo que el mecanismo afectado por erosión anormal o dentro de un proceso de falla por erosión desprenda 100 ppm de cobre (Cu) y se diluyan en 10 galones de aceite que en 2000 o más galones. El desgaste normal por erosión es difícil de controlar pero no imposible, debido a que se genera como resultado del paso de partículas sólidas de una dureza mayor que la del material con el cual friccionan, de un tamaño menor que el espesor de la Capa fluida 3 de la película lubricante h_o , las cuales al entrar en la zona de fricción se desordenan debido a la tendencia que tiene la base lubricante del aceite a cambiar su condición de flujo laminar, en el cual la Capa límite del fluido no se mueve a turbulento, donde la Capa límite del fluido se mueve haciendo que las partículas sólidas contaminantes presentes en el aceite erosionen la rugosidad de las dos superficies de fricción, desgastándolas y aumentando de esta manera las tolerancias entre ellas. El problema es más crítico en aquellos mecanismos donde la condición de fricción es mixta y la lubricación es EHD debido a las menores tolerancias que hay entre las dos superficies de fricción y a las altas temperaturas de operación como resultado del torque transmitido que da lugar a elevadas cargas dinámicas y alta fricción.

La probabilidad de que ocurra el desgaste anormal o falla por erosión depende entre otros factores del nivel de limpieza ISO 4406-99 mínimo con que se debe mantener el aceite ISO 3448 y de la temperatura de operación $^{\circ}\text{C}$ en la zona de fricción. Ver Gráfico 2.

GRAFICO 2
Probabilidad de desgaste anormal o falla por erosión en función de la temperatura de operación y del nivel de limpieza ISO 4406-99 mínimo del aceite



Por ejemplo, si la temperatura de operación Top en la zona de fricción del cojinete liso de alta presión de una turbina de vapor es de 65°C y el nivel de limpieza ISO 4406-99 del aceite de grado ISO 68 AW que se está utilizando es de 18/17/15, la probabilidad de que se presente un desgaste anormal por erosión es del 5%. Ver Gráfico 2. Si por alguna razón, la temperatura de operación Top en la zona de fricción aumentará 10°C, o sea de 65°C a 75°C y el nivel de contaminación del aceite ISO 68 AW fuera de 20/19/17, se tendría que la probabilidad de que se presente un desgaste anormal por erosión sería del 21%. Se puede observar cómo la probabilidad de que se presente un desgaste anormal por erosión aumenta con la temperatura de operación Top y con el nivel de contaminación ISO 4406-99 que tenga el aceite.

Es muy importante tener claro, que el desgaste por erosión es una condición normal que se va a presentar aun cuando el aceite ISO 3448 se mantenga dentro del rango de limpieza ISO 4406-99 recomendado de acuerdo con el tipo de componente;

la Vida disponible Vd del mecanismo lubricado se calcula con base en el nivel mínimo de limpieza ISO 4406-99 permisible que es igual al código de limpieza ISO 4406-99 recomendado según el tipo de mecanismo más un código, o sea, que si el recomendado es un 16/15/12 el mínimo permisible es 17/16/13; pero el desgaste erosivo anormal es una condición que conlleva a la disminución de la Vida disponible Vd, en un porcentaje que depende del valor de la temperatura de operación Top en la zona de fricción y del nivel de limpieza ISO 4406-99 con que se trabaje el aceite ISO 3448. En la Tabla 1 se especifican las recomendaciones del nivel de limpieza ISO 4406-99 con que se debe trabajar el aceite ISO 3448 dependiendo del componente donde trabaje el mecanismo lubricado, con sus respectivos límites de operación Confiable (OC), Operación en Falla (OF) y en Falla (EF) y en la Tabla 2 se dan los rangos de la cantidad de partículas por cm³ o por cada 100 cm³ que contiene cada código de contaminación de acuerdo con la especificación ISO 4406-99.

TABLA 1
Código de limpieza ISO 4406-99 de acuerdo con el tipo de
componente y mecanismos lubricados

No	Componente	Mecanismos	Sistemas hidráulicos Presión del sistema Psig		Condición de lubricación		Condición de limpieza ISO 4406-99	
			Hasta 3000	Más de 3000	Hidrodinámica HD	Elastohidrodinámica EHD	OC: Operación Confiable	OF: Operación en Falla
			Nivel de limpieza ISO 4406-99 estándar				EF: En falla	
01	Sistema hidráulico con bomba de engranajes.	Engranajes.	18/17/15				OC	19/18/16
							OF	20/19/17 - 21/20/18
							EF	22/20/19
				17/16/14			OC	18/17/15
							OF	19/18/16 - 20/19/17
02	Sistema hidráulico con bomba de pistones, paletas.	Pistones, paletas, rodamientos.	17/16/14				EF	21/19/16
							OC	18/17/15
							OF	19/18/16 - 20/19/17
				16/15/13			EF	21/20/18
							OC	17/16/14
03	Transmisión mecánica, reductor de velocidad, motorreductor, compresor de tornillo CCS, compresor de pistón simple y doble efecto, bomba de pistones.	Engranajes, rodamientos, cojinetes lisos.			19/18/16		OF	18/17/15 - 19/18/16
							EF	20/19/17
							OC	20/19/17
							OF	21/20/18 - 22/21/19
						18/17/15	EF	23/22/20
04	Transmisión automática, compresor de tornillo CCH, axial, centrífugo, bomba centrífuga, soplador de lóbulos.	Engranajes, cojinetes lisos, de empuje, rodamientos, sincronizadores, tornillos.			17/16/14		OC	19/18/16
							OF	19/18/16 - 20/19/17
							EF	21/20/18
							OC	18/17/15
							OF	19/18/16 - 20/19/17
05	Motor eléctrico, ventilador, turbina de vapor, a gas, turbina hidráulica.	Cojinetes lisos, de empuje, guía, rodamientos.			18/17/15		OC	19/18/16
							OF	20/19/17 - 21/20/18
							EF	22/21/19
							OC	19/18/16
						18/17/15	OF	20/19/17 - 21/20/18
06	Molino de cemento, papelerero, azucarero.	Rodamientos, cojinetes lisos.					EF	23/22/19

Tabla 2
Nivel de limpieza ISO 4406-99
para aceites ISO 3448

Código ISO	Número de partículas por cada 100 cm³		Número de partículas por cada 1 cm³		Código ISO	Número de partículas por cada 100 cm³		Número de partículas por cada 1 cm³	
	Más de	Hasta	Más de	Hasta		Más de	Hasta	Más de	Hasta
24	8'000.000	16'000.000	80.000	160.000	12	2.000	4.000	20	40
23	4'000.000	8'000.000	40.000	80.000	11	1.000	2.000	10	20
22	2'000.000	4'000.000	20.000	40.000	10	500	1.000	5	10
21	1'000.000	2'000.000	10.000	20.000	9	250	500	2,5	5
20	500.000	1'000.000	5.000	10.000	8	130	250	1,3	2,5
19	250.000	500.000	2.500	5.000	7	64	130	0,64	1,3
18	130.000	250.000	1.300	2.500	6	32	64	0,32	0,64
17	64.000	130.000	640	1.300	5	16	32	0,16	0,32
16	32.000	64.000	320	640	4	8	16	0,08	0,16
15	16.000	32.000	160	320	3	4	8	0,04	0,08
14	8.000	16.000	80	160	2	2	4	0,02	0,04
13	4.000	8.000	40	80	1	1	2	0,01	0,02

1.RECOMENDACIONES PARA EVITAR EL DESGASTE EROSIVO ANORMAL

1. Mantener la temperatura de operación Top en la zona de fricción dentro del valor confiable de 65°C, con tendencia a que no sea superior a 55°C.
2. Utilizar aceites ISO 3448 con el mayor Índice de viscosidad posible.
3. Verificar que el componente lubricado tenga venteo, que haya sido seleccionado correctamente y que esté en buen estado.
4. Seleccionar correctamente el nivel de limpieza ISO 4406-99 del aceite ISO 3448 de acuerdo con el tipo de componente y mecanismos lubricados.
5. Verificar que el aceite ISO 3448 nuevo cumpla con el nivel de limpieza ISO 4406-99 requerido.
6. Mantener el aceite ISO 3448 dentro del valor de limpieza mínimo permisible, valor OC, especificado en la Tabla 1, en caso contrario filtrarlo hasta garantizarlo.
7. Monitorear el nivel de limpieza ISO 4406-99 del aceite ISO 3448 con una frecuencia máxima de 3 meses.
8. Garantizar el almacenamiento, manejo y uso correcto del aceite ISO 3448.
la Vida disponible Vd del mecanismo lubricado se calcula con base en el nivel mínimo de limpieza ISO 4406-99 permisible que es igual al código de limpieza ISO 4406-99 recomendado según el tipo de mecanismo más un código, o sea, que si el recomendado es un 16/15/12 el mínimo permisible es 17/16/13; pero el desgaste erosivo anormal es una condición que conlleva a la disminución de la Vida disponible Vd, en un porcentaje que depende del valor de la temperatura de operación Top en la zona de fricción y del nivel de limpieza ISO 4406-99 con que se trabaje el aceite ISO 3448. En la Tabla 1 se especifican las recomendaciones del nivel de limpieza ISO 4406-99 con que se debe trabajar el aceite ISO 3448 dependiendo del componente donde trabaje el mecanismo lubricado, con sus respectivos límites de operación Confiable (OC), Operación en Falla (OF) y en Falla (EF) y en la Tabla 2 se dan los rangos de la cantidad de partículas por cm³ o por cada 100 cm³ que contiene cada código de contaminación de acuerdo con la especificación ISO 4406-99.

9. Hacer flushing al depósito o carter de la máquina, cada vez que se le cambie el aceite ISO 3448.

1.CONCLUSIONES

1. El Cáncer tipo 1 en los mecanismos lubricados que es el desgaste anormal o falla por fatiga superficial y el Cáncer tipo 2 que es el desgaste anormal o falla por erosión, son silenciosos, imperceptibles y en la mayoría de los casos no se detectan en la etapa inicial con las técnicas de monitoreo conocidas hasta el momento como son el análisis de laboratorio al aceite usado, termografía y vibraciones. Solo se reflejan en los mecanismos lubricados cuando ya no hay solución y es necesario reemplazarlos, en algunos casos muy por debajo de su Vida disponible, Vd en horas de operación.
Lo más indicado para evitar que se presente el Cáncer tipo 1 y el Cáncer tipo 2 en los mecanismos lubricados es la prevención, para lo cual la clave es utilizar el aceite ISO 3448 dentro del código de limpieza ISO 4406-99 recomendado, mantener la temperatura de operación Top en la zona de fricción dentro del rango confiable de 45° a 65°C 1. o preferiblemente entre 45°C y 55°C y utilizar aceites ISO 3448 con el mayor Índice de viscosidad posibles.