

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO EN MOTORES A GAS ESTACIONARIOS DE 4 TIEMPOS

German Latorre / Ricardo Ferrero
REPSOL – YPF

Año 2003

Abstract:

El trabajo pretende mostrar la experiencia de campo obtenida por Repsol – YPF Lubricantes & Especialidades en la evaluación y medición tanto de depósitos como del desgaste en motores a gas estacionarios de cuatro tiempos

Los depósitos y el desgaste encontrado al final de una prueba son una evidencia muy importante de la performance del equipo, de las condiciones de operación de las unidades y del lubricante utilizado. Minimizando los depósitos se logra obtener una mayor vida útil del equipo logrando incrementar los intervalos de mantenimiento.

El trabajo consiste en realizar un seguimiento sobre distintas unidades a través del monitoreo de las variables de operación y de los parámetros que condenan al aceite en uso. Para ello se recurre a realizar un plan de muestreo y el posterior análisis de los lubricantes involucrados. Finalizando el período de prueba se realiza un desarme y cotación de los depósitos encontrados. Este método consiste en someter diferentes piezas a una evaluación sistemática sobre tipo, espesor y tamaño de los depósitos encontrados, siendo los mismos posteriormente cuantificados.

A través del desarme, es comprobada la existencia de una correlación entre las variables medidas en el seguimiento de los aceites , los depósitos y el desgaste generado.



Piston Ring Belt Zone Without Rings Thrust #16 PL



Combustion Chamber Without Valves Intake #5R PL

Introducción:

En la compresión y transporte de gas natural, el motor estacionario a gas por su versatilidad y posibilidad de adaptarse a distintas condiciones de operación y gas combustible, es el equipo mas utilizado para mover compresores.

En términos de lubricación, los requerimientos deben ser subdivididos en motores de dos tiempos y cuatro tiempos, siendo estos sistemas muy similares a sus afines, los motores diesel y gasolina, con ligeras diferencias dadas por factores tales como: características de la combustión, tipo de operación (carga y velocidad) y por las especificaciones particulares de los fabricantes.

En este trabajo nos ocupamos de los motores de cuatro tiempos que constituyen el mayor parque de unidades dedicadas a la compresión de gas. Sobre los mismos nos interesó establecer las influencias de las variables condiciones de operación, lubricante y equipo en la performance en cuanto a la generación de desgaste y depósitos y la consecuente vida útil de las unidades.

Desarrollo:

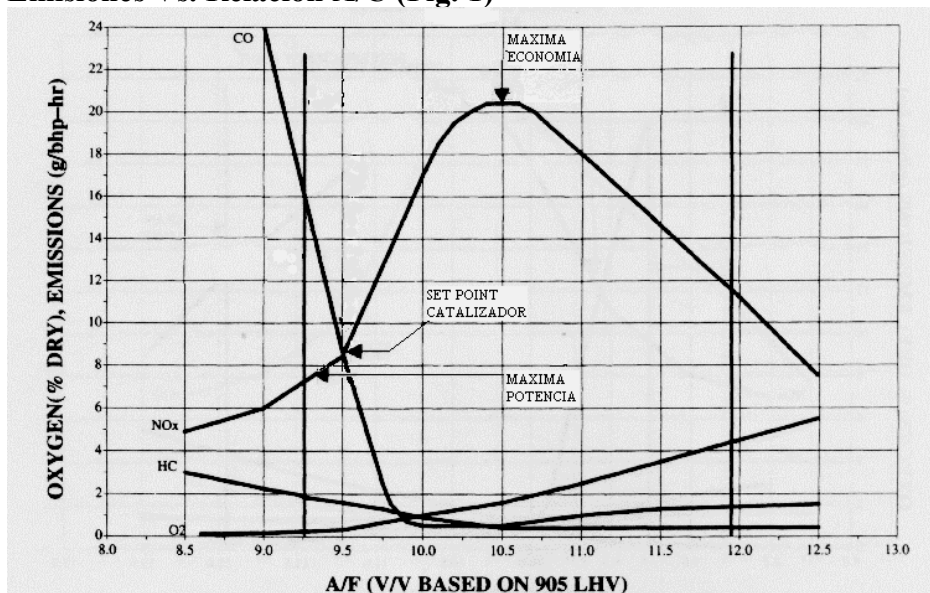
1- Variables principales

a. Equipo: Características de los motores de cuatro tiempos a gas.

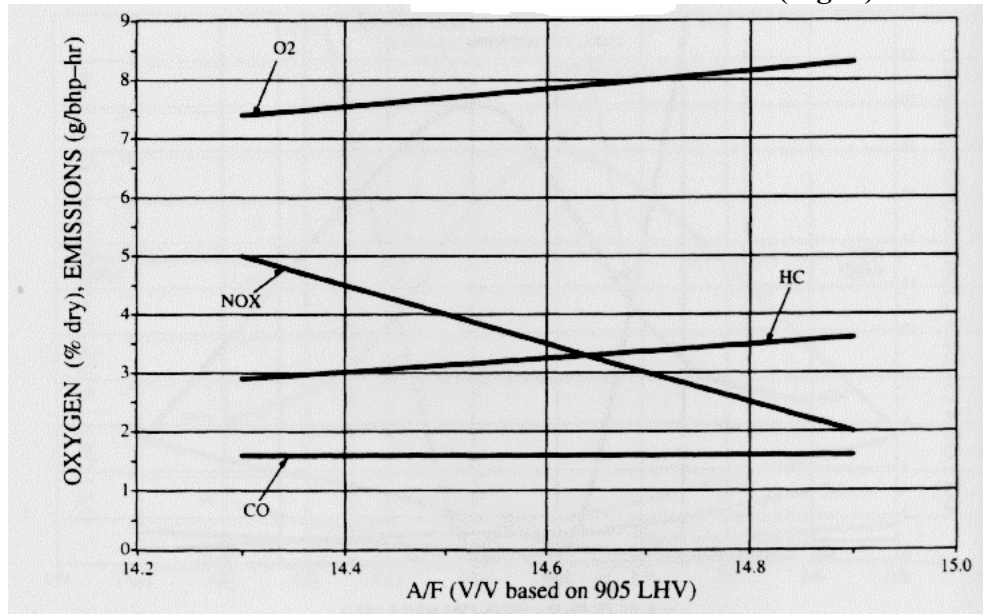
Como comentamos en la introducción elegimos motores de cuatro tiempos, en este caso la degradación del aceite es el punto primario, las altas temperaturas originadas en la cámara de combustión provocan la oxidación-nitración del lubricante, lo cual conduce a la degradación del mismo. En lo referente al requerimiento de cenizas para este motor en particular, es muy sensible a un alto contenido de las mismas ya que esto puede causar pre-ignición, detonación, obstrucción de las bujías y quemado de válvulas.

Tomando como referencia los motores de cuatro tiempos podemos dividirlos en dos tipos característicos en función de la relación aire / combustible (A/C) que ingresa a la cámara de combustión. A partir de esto, podemos contar con motores de mezcla rica “rich burn”, es decir aquellos motores que combustionan una mezcla A/C bajas y motores de mezcla pobre o “lean burn” cuando combustionan relaciones A/C superiores.

Emisiones Vs. Relación A/C (Fig. 1)



Emisiones Vs. Relación A/C “Motores de Mezcla Pobre”(Fig. 2)



Es importante destacar que la elección de la relación a aire combustible incide sobre la cantidad y tipo de emisiones que el motor genera (Fig. 1, Fig. 2), la relación de compresión de los motores, la temperatura de funcionamiento, la potencia entregada, entre otros parámetros.

a. Lubricante: Degradación del lubricante

Desde el punto de vista del aceite, hasta la fecha no existen pruebas estándar para definir niveles de calidad de los mismos como consecuencia de esto las recomendaciones de los fabricantes es limitada a establecer algunos parámetros físicos como viscosidad, nivel de cenizas, contenido de zinc, TBN (número de base total) mínimo, como guía para la elección del aceite.

Los aceites para motores a gas en la actualidad, solo se dividen en cuatro categorías dependiendo del nivel de cenizas sulfatadas que poseen, los cuales son directamente proporcionales al contenido de aditivos a base de sulfonatos o fenatos de Magnesio y/o Calcio.

La aparición de aceites específicos para este tipo de motores se debe principalmente a los siguientes puntos:

- 1- Altas temperaturas de combustión que originan oxidación y nitración del lubricante con incremento de viscosidad y formación de depósitos.
- 2- Combustión prácticamente completa tiende a minimizar los depósitos carbonosos.
- 3- Bajos contenidos de azufre en el combustible requieren de bajos valores de TBN.
- 4- El gas combustible es seco, el control de la recesión de válvulas es una responsabilidad del lubricante y de su contenido de cenizas.

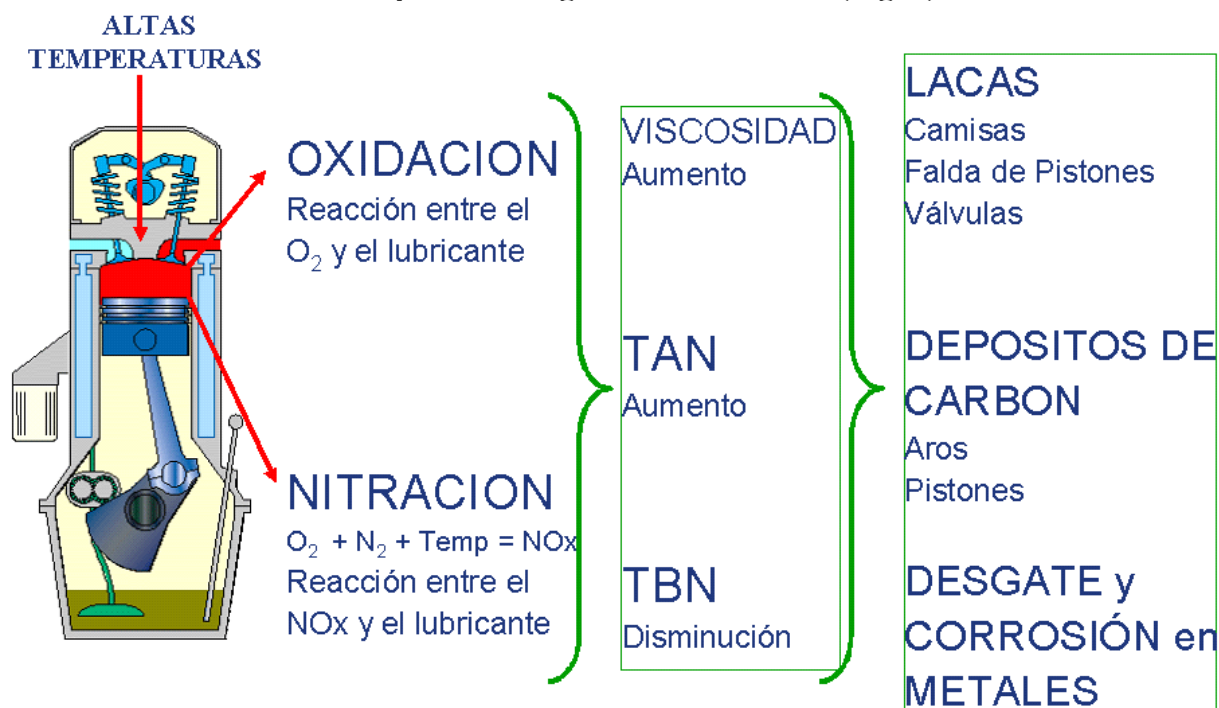
PROCESO DE DEGRADACION

La principal fuente de degradación de los lubricantes para motores a gas esta relacionada con las altas temperaturas que se generan en la cámara de combustión. Estas altas temperaturas son las responsables de generar la oxidación y nitración del lubricante.

La oxidación y nitración del lubricante están directamente relacionadas con el tipo de motor, es decir si es de mezcla rica o de mezcla pobre. Como dijimos en las figuras 1 y 2 se muestran las distintas relaciones aire / combustible versus emisiones de gases de escape, que se pueden presentar en motores de cuatro tiempos valor máximo cuando la puesta a punto seleccionada es de Máxima Economía (mezcla A/C ligeramente pobre), observándose una importante disminución cuando el motor es puesto a punto en Máxima Potencia (enriquecimiento de la mezcla A/C). Un empobrecimiento mayor de la mezcla en este tipo de motores también provoca una disminución de la generación de NOx (zona a la derecha de Máxima Economía), pero la perdida de potencia que se registra en los mismos hace que no puedan operar en esos niveles. El nivel de nitración en el lubricante y por ende la degradación del mismo, esta íntimamente relacionado con la puesta a punto del motor.

En la siguiente figura (Fig 3) se muestra el esquema de degradación de los aceites que lubricantes motores a gas estacionarios.

Esquema de degradación del aceite (Fig. 3)



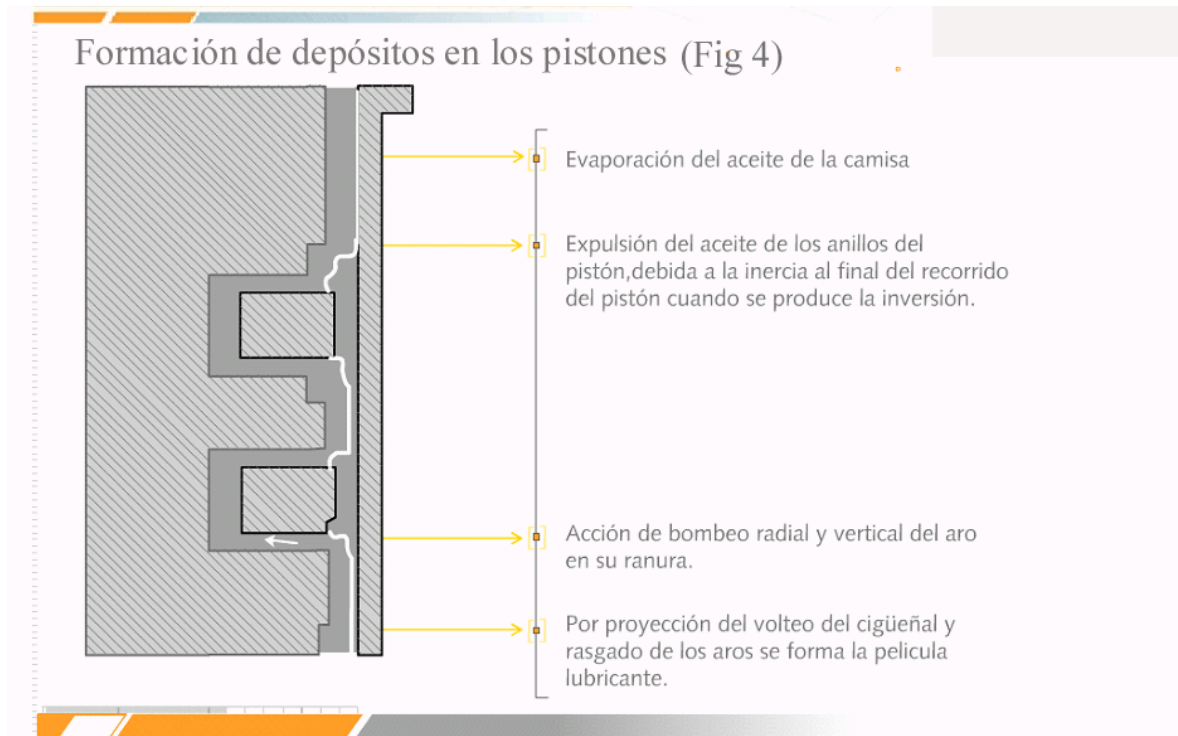
La oxidación del aceite provoca un incremento de la viscosidad del mismo debido a la aparición de productos solubles e insolubles que se generan por tal fenómeno. Los productos insolubles son los que en función a la temperatura que estén expuestos, definida por las distintas zonas de los motores, generan distintos tipos de depósitos que van desde las lacas y barnices hasta los depósitos de carbón. Además estos productos de oxidación provocan la acidificación del aceite y el incremento del TAN (número de ácido total) que es la responsable de la corrosión de los metales.

La nitración influye principalmente en la acidificación del aceite. Es controlada por el aceite mediante lo que se llama su reserva alcalina o TBN (número básico total), la que es responsable de generar una reacción de neutralización ácido / base en el aceite.

FORMACIÓN DE DEPÓSITOS

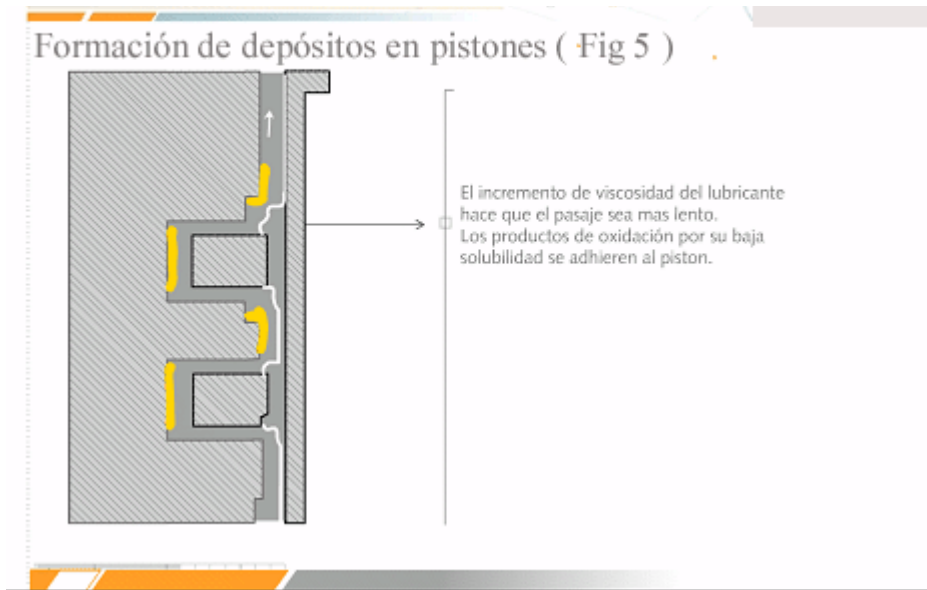
Como dijimos en el punto anterior los productos insolubles generados por la oxidación son la materia prima para la generación de los depósitos.

En las siguientes figuras (Fig. 4, Fig. 5 y Fig. 6)se esquematiza el proceso de formación de depósitos en un pistón. Las temperaturas reinantes en un pistón de motor a gas estacionario varían desde la falda hasta la corona superior entre 150°C y 300°C siendo la temperatura mas alta la que se observa en la corona superior. A este rango de temperaturas es el que coloquialmente se lo denomina como temperatura intermedia. Los depósitos que se generan en esta zona en función a las temperaturas existentes pueden ser desde Lacas (en zonas de bajas temperaturas) hasta carbón (en zonas de altas temperaturas).



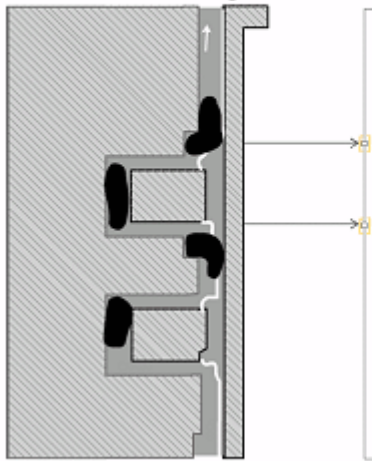
La figura 4 resume el proceso de lubricación existente en un sistema pistón – camisa. En primer lugar el lubricante llega a la camisa por proyección del volante del cigüeñal y el rasgado de los aros

distribuye este aceite sobre la superficie de la misma, generando de esta manera una película lubricante. Los aros provocan una acción de bombeo del lubricante debido a sus movimientos radial (dilatación) y transversal (acompañando al movimiento del piston). Este aceite bombeado circula entre las ranuras y anillos provocando una acción refrigerante de esta zona del piston. Luego parte del aceite es expulsado hacia la camara de combustión producto de la inercia y cambio de velocidad del piston cuando llega al punto muerto superior.



Como ya dijimos a medida que el aceite se va degradando (oxidando) va incrementando su viscosidad. Esta degradación conlleva la presencia de insolubles en el aceite estos productos se van adheriendo a las partes componentes del pistón. En la figura 5 estos productos están representados en color amarillo. La presencia de estos productos provoca que el flujo de aceite que circula por efecto del bombeo sea cada vez menor y por consiguiente la refrigeración de la zona también sea menor y mayor el incremento de temperatura de las partes. Debido a este fenómeno se genera un circulo de degradación en donde al ir incrementándose la temperatura en la zona los productos insolubles adheridos se van transformando en depósitos de lacas y carbón.

Formación de depósitos en pistones (Fig. 6)



El incremento de viscosidad del lubricante hace que el pasaje sea mas lento. Los productos de oxidación por su baja solubilidad se adhieren al pistón.

La alta temperatura transforma a estos productos en depósitos de carbón.

Luego estos depósitos (Fig. 6) continúan obstruyendo el flujo de aceite y generando mayor temperatura en la zona hasta el extremo de llegar al pegado de aros y a lograr que el flujo de aceite entre aros y ranuras sea prácticamente nulo, comenzando a pasar aceite directamente a la camara de combustión entre la camisa y el pistón. Este fenómeno provoca un incremento importante del consumos de aceite.

Viendo este fenómeno, desde el punto de vista del desgaste, provoca el rayado / pulido de las camisas y el desgaste de los aros pudiendo quedar estos parámetros fuera de los límites y tolerancias máximas admitidas por los fabricantes

a. Condiciones de operación: control de la operación de las unidades.

Las condiciones de la operación de las unidades son un factor preponderante en la vida útil de las mismas y del lubricante. El control de dichas condiciones se debe efectuar rigurosamente acorde a un plan preestablecido y conocido. Ya hemos hablado en el punto 1 sobre la influencia de la carburación en la generación de Nox (óxidos de nitrógeno), estos afectan directamente al aceite lubricante provocando su degradación mas o menos vertiginosamente acorde al nivel de los mismos. Es por esto que mantener una carburación controlada en el tiempo es importante para lograr un funcionamiento correcto del equipo..

Otros parámetros a controlar son la temperatura de agua y la de aceite. La temperatura es el factor crítico desde el punto de vista del lubricante. Pequeños incrementos de temperatura provocan aceleraciones importantes de la degradación en los aceites, pudiendo acelerar el fenómeno de formación de depósitos descrito en el punto anterior.

También hay que tener en cuenta parámetros tales como avance de encendido, presión de aceite, carga, cantidad de paradas y arranques, todos son influyentes y una variación en los mismos incide sobre la performance tanto de los equipos como de los lubricantes.

1- Resultados de las pruebas de campos

a. Selección de los equipos:

Para el desarrollo del presente trabajo se han seleccionados motores de cuatro tiempos turboalimentados. El motivo de esta elección se debe a que a los efectos de generación de depósitos y niveles de exigencia de estos motores son los mas importantes y nos representan valores límites para evaluar performance. En los ensayos se han incluidos tanto motores nuevos como en uso y en distintas condiciones.

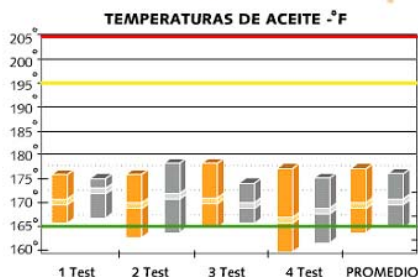
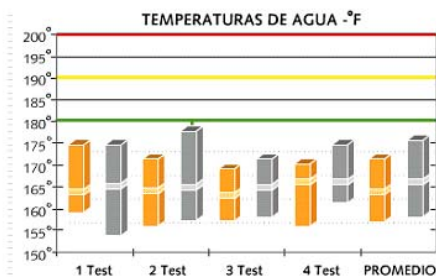
Se tomaron en los ensayos como mínimo 2 unidades idénticas y se realizaron cotaciones y seguimientos comparativos entre ellas , variando la calidad de los aceites y dejando constante las variable relacionadas a las condiciones de operación de las mismas.

b. Seguimiento de las condiciones de operación:

Las condiciones de operación de las unidades se controlaron y siguieron en todos los ensayos. Se trabajó intensamente en la puesta a punto de los equipos para asegurarnos que todos estuviesen en las mismas condiciones de exigencia. Para los ensayos la carburación se controló en forma permanente a través de la medición de gases de escape, para lo que se realizaban mediciones periódicas.

Otras de las condiciones de operación controladas fueron las temperaturas tanto de agua como de aceite. Para lo que se tomaron mediciones diarias verificando, por un lado la uniformidad de las mismas entre distintas máquinas durante el período de prueba, y por otro que las mismas se encuentren dentro de las temperaturas normales de funcionamiento que establecen los fabricantes de los equipos.

En la siguiente figura (Fig. 7) se puede observar la evolución de estos parámetros durante un ensayo de 1 año de duración . Se observan los promedios obtenidos en cada test llamando test al período entre cambios de lubricante en carter.



Condiciones de Operación (Fig. 7)

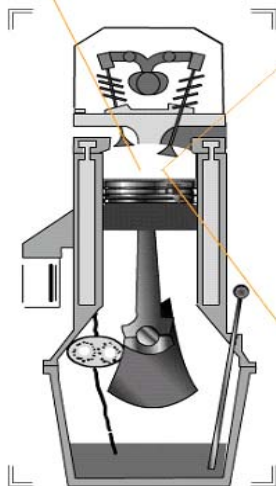
a. Evaluación de la degradación de los lubricantes por ensayos de laboratorio

Los parámetros críticos a controlar en laboratorio son los que definimos en el punto 1 cuando se desarrollo el proceso de degradación de los aceites. Estos son la oxidación, nitración, incremento de viscosidad, perdida de reserva alcalina o TBN. Adicionalmente con la intención de evaluar desgaste se evaluaron las tendencias de los metales de desgaste en el aceite. Los resultados de esta evaluación para uno de nuestros ensayos se presentan en las figuras 8, 9 y 10. En este ensayo se comparó la performance de dos unidades de mezcla rica turboalimentadas lubricadas con aceites de distintas calidades. Es importante destacar que el seguimiento de las unidades se realizó cada 250hs. con el propósito de establecer con mayor precisión como evolucionaron los parámetros.

COMPORTAMIENTO DE LOS LUBRICANTES

Fig. 8

ALTAS TEMPERATURAS

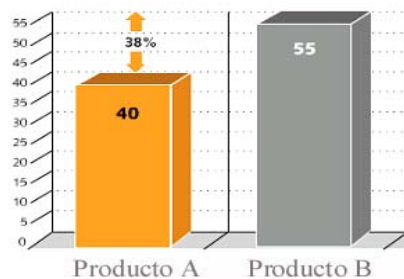
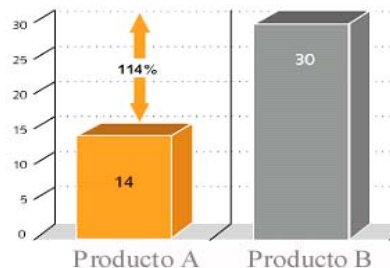


OXIDACION

- Reacción entre el O_2 y el lubricante
- Medida por FT-IR en Abs/cm.

NITRACION

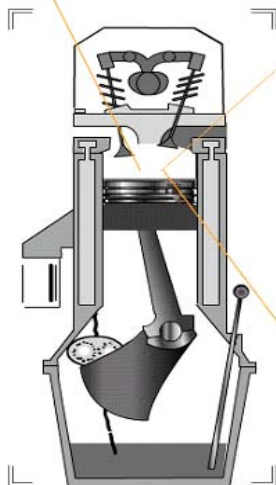
- $O_2 + N_2 + Temp = NO_x$
- Reacción entre los NO_x y el lubricante
- Medida por FT-IR en Abs/cm



COMPORTAMIENTO DE LOS LUBRICANTES

Fig. 9

ALTAS TEMPERATURAS

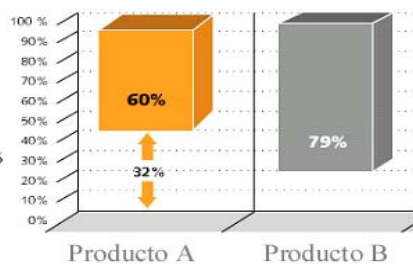
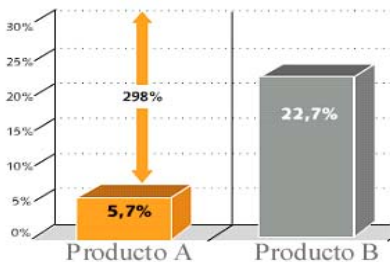


VISCOSIDAD

- Porcentaje de incremento de la Viscosidad
- Medida a $100^\circ C$ en cSt

TBN

- Disminución en porcentaje respecto del aceite sin uso
- Medido por ASTM D-2896

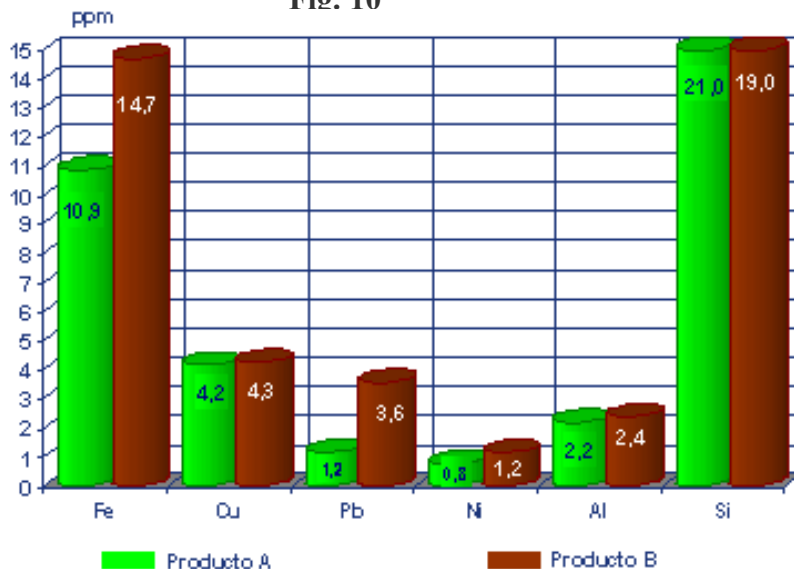


Para esta comparativa vale la pena destacar la marcada diferencia encontrada en ensayos de laboratorio entre la performance de los aceites en cuanto a oxidación (Fig. 8) (mas del 100%) y su inferencia en el incremento de viscosidad (Fig. 9) en donde la diferencia es prácticamente del 300%. Con estos datos de laboratorio era esperable encontrar una mayor cantidad de depósitos en el caso del motor lubricado con Producto B que el lubricado con Producto A. En el punto d) se evalúa dicha diferencia para este caso.

Comportamiento de los lubricantes

METALES DE DESGASTE

Fig. 10



Para este caso se puede observar en la figura 10 la diferencia en metales de desgaste es poca entre los dos productos, se puede inferir que la performance en términos de desgastes de los aceites no siempre va de la mano a la performance en términos de generación de depósitos de los mismos

a. Evaluación y cuantificación de los depósitos y desgaste.

Como dijimos anteriormente no existe una metodología establecida a nivel mundial para calificar la calidad de los aceites para motores estacionarios a gas. Por tal motivo es que elegimos una metodología de calificación que es aplicable a este tipos de motores, se trata del método “CRC (Coordinating Research Council) Diesel Engine Rating Manual No. 18”. Este método es utilizado para evaluar el desempeño de motores diesel en relación a depósitos generados.

El método consiste en calificar las piezas visualmente tomando como parámetros el área cubierta con depósitos y que tipo de depósitos las cubre. Para realizar lo mismo se procede a segmentar las piezas en sub-zonas que facilitan dicha evaluación. Por ejemplo para la evaluación de los depósitos en pistones el mínimo números de sub-zonas de circunferencias recomendadas por el método es de cuatro.

En todos los casos se procede a evaluar mérito o demérito de limpieza de la pieza. Ambas (mérito o demérito) son escalas inversas de evaluación, por ejemplo una pieza que

posee un merito de 10 en limpieza quiere decir que el demérito en tales términos es 0 y viceversa.

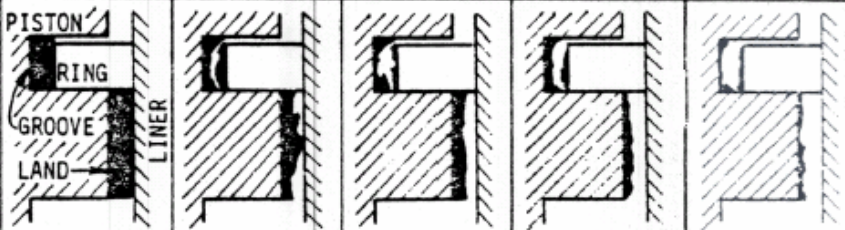
Por ejemplo para la evaluación de los depósitos en pistones el mínimo números de sub-zonas de circunferencias recomendadas es de cuatro.

DEPÓSITOS DE CARBON Y LACAS

Los tipos de depósitos de carbón se evalúan mediante una escala (Tabla 1) que define distintos coeficientes (Factores) a afectar a la cuantificación de los mismos.

Tabla 1 "Clasificación de Depósitos"		
Nombre	Símbolo	Factor
Heavy Carbon	HC	1
Medium Heavy Carbon	MHC	0,75
Medium Carbon	MC	0,5
Light Carbon	LC	0,25
Very Light Carbon	VLC	0,15

Fig. 11

TYPICAL ILLUSTRATION					
CLEARANCE FILL	100%	>2/3	1/3-2/3	1/6-1/3	<1/6
SYMBOL	HC	MHC	MC	LC	VLC
DEPOSIT FACTOR	1.00	0.75	0.50	0.25	0.15

La figura 11 define los distintos tipos de depósitos carbonosos en función del porcentaje de espesor que ocupan.

En el caso de las lacas la definición de tipo y severidad se realiza evaluando el color de las mismas. El rango de severidad de depósitos de lacas y barnices es dividido en una escala continua que se representa mediante incremento de intensidad de grado de color . (Fig. 12)

CRC RUST/VARNISH/LACQUER RATING SCALE FOR NON-RUBBING PARTS

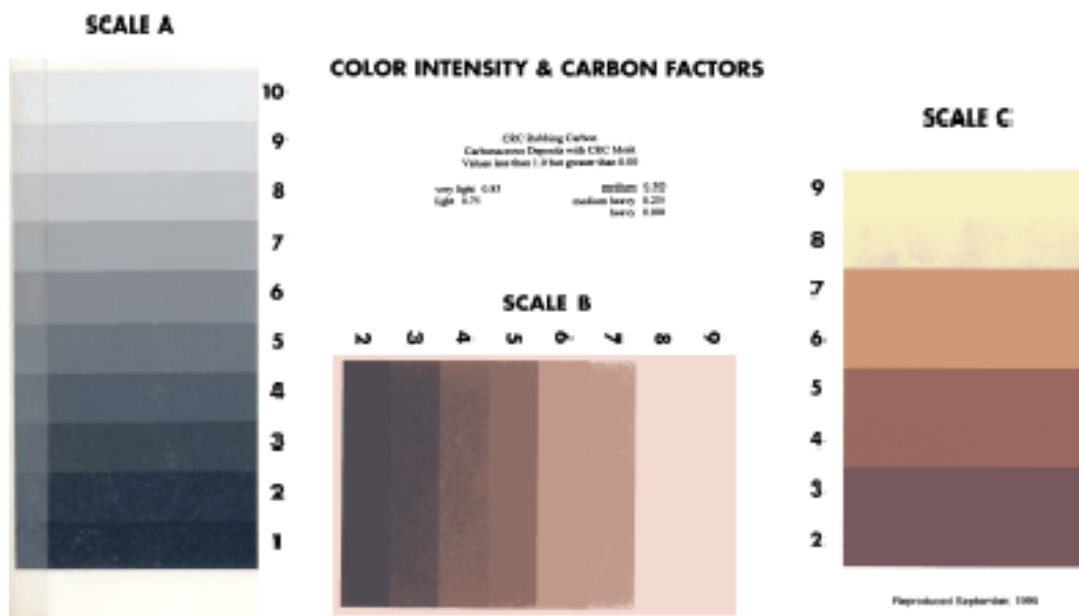


Fig. 12

La escala establece un 10 para el caso de limpieza perfecta y va disminuyendo a medida que va aumentando la severidad hasta llegar a 1 máxima intensidad. El valor obtenido por dicha escala es un valor de mérito de la pieza. Para convertir este valor a escala de demérito se usa la siguiente formula:

$$\text{Performance Laca} = \text{Área (\%)} \times (10 - \text{performance en Mérito})$$

Ejemplo una zona en donde se evaluó la presencia en un área de un 15% de laca tipo 8.5 el valor de demérito de dicha zona es : Demérito = 15% X (10-8.5)

Un ejemplo de evaluación es el que se muestra en la Tabla 2 en la que se puede observar una valoración puntual de un pistón en donde se procedió a dividir al mismo en tres anillos y cada superficie anular en cuatro cuartos a 90°. Se evaluó cuarto por cuarto considerando que porcentaje de cada uno de los tipos de carbones y lacas están presentes de acuerdo a la metodología descrita en los párrafos anteriores.

PISTON NO.
FIELD TEST:
TEST OIL:
ADDITIVE:

BASE OIL:
ENGINE TYPE:
ENGINE NO.:

ENGINE HOURS:
TEST HOURS:
INSPECTION DAT

DEP	FACTOR	GROOVE 1				GROOVE 2				GROOVE 3				SKIRT			
		1ST Q	2ND Q	3RD Q	4TH Q	1ST Q	2ND Q	3RD Q	4TH Q	1ST Q	2ND Q	3RD Q	4TH Q	1ST Q	2ND Q	3RD Q	4TH Q
HC	1.000	98	98	40	30			35	2								
MHC	0.750	2	2														
MC	0.500			40	55			15	8								
LC	0.250			10	10		5	25	5								
VLC	0.150			5	5	10	5	20									
LACQUER DEPOSITS																	
AREA, % LEVEL				5		25	30	5	35	100	100	100	100	100	100	100	100
				3.4		1.5	1.3	7.4	7.7	9.1	9.5	9.2	9.1	9.9	9.9	9.9	9.9
						65	60		50								
						8.8	9.0		2.6								
AREA, % LEVEL																	
AREA, % LEVEL																	
CLEAN	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL DEMERITS		80.833				18.313				0.775				0.100			
CARBON LACQUER TOTAL	99.50	99.50	63.25	60.75		1.50	2.00	51.75	7.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.33	0.00		2.91	3.21	0.13	4.51	0.90	0.50	0.80	0.90	0.10	0.10	0.10	0.10
	99.50	99.50	63.58	60.75		4.41	5.21	51.88	11.76	0.90	0.50	0.80	0.90	0.10	0.10	0.10	0.10
DEMERITS		80.833				18.313				0.775				0.100			

CROWNLAND SCUFFING				CROWNLAND CUTTING, %			
1ST Q	2ND Q	3RD Q	4TH Q	1ST Q	2ND Q	3RD Q	4TH Q
Light	Medium	Light	N/A	50	60	25	0

Tabla 2 – “Planilla evaluación de depósitos en pistones”

A continuación en la fig. 13 se presentan los valores obtenidos en una evaluación de depósitos en donde se cuantificaron bajo esta metodología.

Evaluación de depósitos en pistón “Meritos”

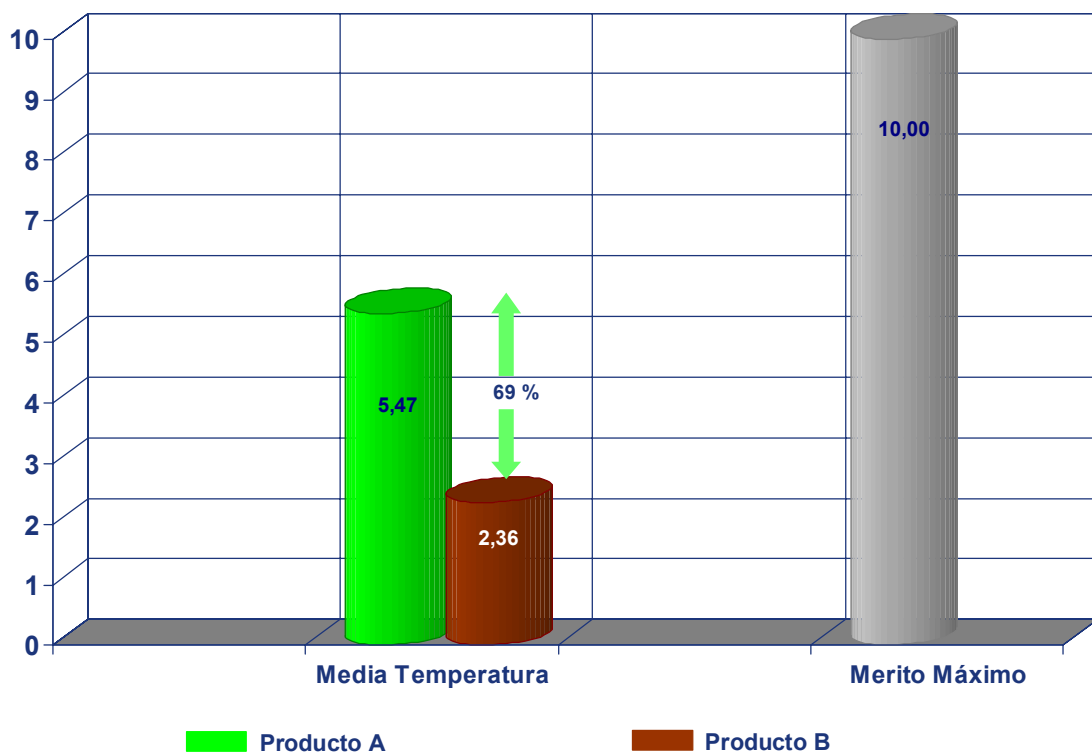


Fig. 13

Se puede observar la evaluación en escala de méritos de la zona de temperatura media (es decir zona de pistones) en donde el merito máximo, es decir limpieza perfecta es un 10. Se puede observar como distintas calidades de aceites evidencian una diferencia de performance en depósitos importante (cercana al 70 %).

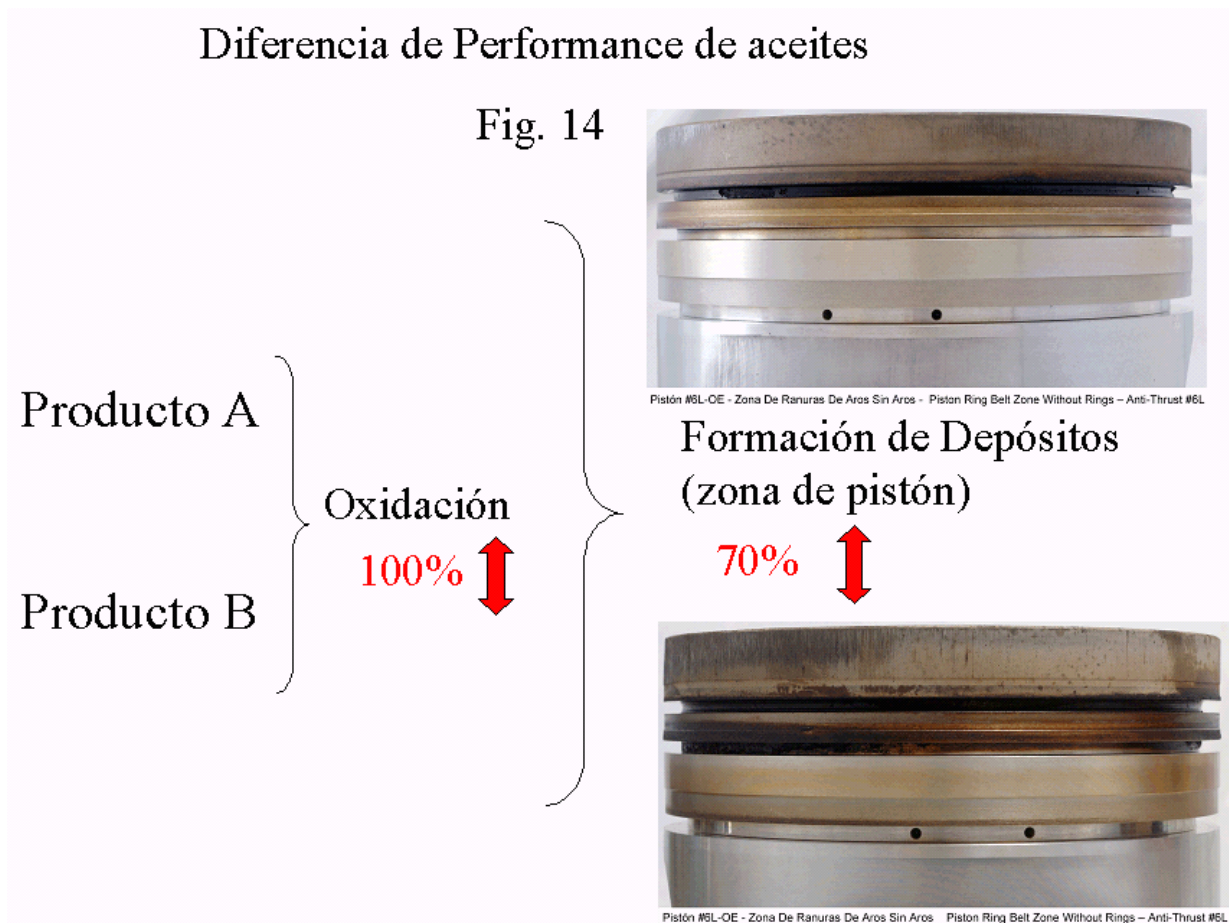
1- Relación entre degradación de aceite, generación de depósitos y desgaste.

Conclusiones

Como hemos visto en el desarrollo del trabajo hay una relación directa entre los niveles de degradación del aceite y la cantidad y calidad de los depósitos que se generan en un motor a gas estacionario.

A través de lo observado se comprueba que distintas performance en parámetros de laboratorio evidencian muy distintas cantidades de depósitos encontradas en los motores. Hay que destacar que esto se verifica habiendo respetando los límites condenatorios de parámetros de laboratorio y períodos de cambio que establecen los fabricantes de equipos para el aceite.

Por ejemplo un resumen de una de nuestras experiencias se presenta en la figura 14.



En la figura se puede apreciar que un aceite que tuvo un 100% mejor performance en el parámetro de oxidación repercutió en un 70% mas de formación de depósitos en zona de pistón para este caso.

En términos de desgaste, se pueden observar los valores obtenidos del mismo en una prueba de campo en donde la performance entre los lubricantes fueron distintas en relación a la cantidad de depósitos en zona de pistón. (Fig. 15)

Para este caso se midió sobre la camisa el porcentaje de pulido del bruñido original, midiendo la performance de los distintos lubricantes.



Lubricante A

- ✓ **Empuje = 10 % pulido**
- ✓ **Opuesto = 7 % pulido**

Lubricante B

- ✓ **Empuje = 85 % pulido**
- ✓ **Opuesto = 20 % pulido**

Fig. 15

Se puede resumir diciendo:

Conclusión 1: distintos valores de oxidación del aceite repercuten en distintas performance en términos de depósitos.

Conclusión 2: respetando siempre los límites condenatorios que establecen los fabricantes hay diferencias significativas en termino de generación de depósitos.

Conclusión 3: los depósitos en zona de pistón son los responsable del desgaste en camisas por abrasión. Este desgaste no se evidencia en la determinación de tendencia de metales de desgaste por laboratorio.

Por último es importante destacar que la mayor limpieza en pistones y el menor pulido de las camisas permitirá un menor incremento en el consumo de lubricante (parámetro medido en los ensayos) y el blow-by, disminuyendo también la perdida de compresión de los cilindros. Todos estos factores redundaran en una mayor vida útil del equipo y en un incremento en el intervalo de overhaul.



Piston Ring Belt Zone Without Rings Thrust #6L PL



Combustion Chamber Without Valves Thrust #6L PL