

**RELATIONSHIP BETWEEN OIL POLLUTION WITH SILICA AND ENGINE WEAR****RELACIÓN ENTRE LA CONTAMINACIÓN DEL ACEITE CON SÍLICE Y EL DESGASTE DEL MOTOR**

**PhD. Simón J. Fygueroa Salgado, MSc. Gonzalo G. Moreno Contreras  
MSc. Juan C. Serrano Rico**

**Universidad de Pamplona.**

Ciudadela Universitaria. Pamplona. Colombia. Tel. (577) – 568 5303 Ext. 164.

E-mail: {sjfigueroa, gmoreno, jcserrano}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** Spectroscopic analysis of automotive engine oil is highly effective to detecting wear. The results obtained using this technique are the major wear metal concentrations present in used oil samples that in the case of motor vehicles are: aluminum, chromium, copper, tin, iron, nickel, lead and silicon. The aim of this paper is to carry out a statistical investigation from the results of spectroscopic analysis of a large number of used oil samples taken to different vehicle engines and stored in a database in order to relate the silicon content with wear metals content. It also considers service type influence, taking into account transport and public works vehicle engines.

**Keywords:** Predictive maintenance, fault diagnosis, oil analysis, internal combustion engines, wears, contamination, dust, silicon.

**Resumen:** La técnica de análisis espectrométrico de aceites de motores de automoción es altamente efectiva para detectar su desgaste. Los resultados de la aplicación de esta técnica son las concentraciones metálicas de los principales metales de desgaste presentes en muestras de aceite usado; en el caso de los motores de vehículos industriales se consideran aluminio, cromo, cobre, estaño, hierro, níquel, plomo y silicio. El objetivo de la presente ponencia es llevar a cabo una investigación estadística con el objetivo de relacionar el contenido de silicio con los contenidos de metales de desgaste, a partir de los resultados obtenidos del análisis espectrométrico de un elevado número de muestras de aceite usado, tomadas en motores de diferentes vehículos almacenados en una base de datos. Se considera además, la influencia del tipo de servicio, examinando por separado el caso de los motores de vehículos de transporte y el de los de obras públicas.

**Palabras claves:** Mantenimiento predictivo, diagnóstico de fallas, análisis de aceite, motores de combustión interna, desgaste, contaminación, polvo, silicio.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos tribológicos, desde el punto de vista de la economía de energía son tan importantes que la Asociación de Ingenieros Mecánicos y el Departamento de Industria y Comercio de Inglaterra

lanzaron en el lejano marzo de 1992 una campaña denominada “*Actitud Tribológica*” en la que proponían una economía de 1.5 billones de libras esterlinas, mediante su adecuada aplicación a los procesos de producción, mantenimiento y diseño (Tormos, 2005).

El desgaste definido como el proceso de pérdida gradual de materia de dos superficies sólidas deslizantes en contacto (Zmitrowicz, 2006) es una de las principales causas de las fallas de los motores. Eyre (1991) ha establecido la frecuencia con que se originan según el tipo de desgaste que los produce:

- Debidos a desgaste abrasivo 50 %.
- Debidos a desgaste adhesivo 15 %.
- Debidos a desgaste erosivo 8 %.
- Debidos a desgaste de contacto 8 %.
- Debidos a desgaste corrosivo 5 %.

El elevado porcentaje correspondiente al desgaste abrasivo demuestra que el principal factor que reduce la vida esperada de un motor, son las partículas abrasivas de polvo que ingresan a él durante su funcionamiento, el mantenimiento o la fabricación. La anterior razón es la que ha motivado la realización del presente estudio que tiene como objetivo confirmar las relaciones de causalidad del desgaste que existen entre el contenido de silicio característico del polvo atmosférico, y el de los metales que lo caracterizan, obtenidos analizando espectrométricamente muestras de aceite usado tomadas a un elevado número de motores de encendido por compresión.

Para determinar el contenido de partículas de desgaste presentes en un lubricante, el método que mas se emplea actualmente es la espectrometría que puede emplear dos tipos de espectrómetros:

- Espectrómetros de emisión
- Espectrómetros de absorción

Los primeros aprovechan la propiedad de los átomos, que al ser excitados emiten una radiación compuesta por longitudes de onda características, cuyos rasgos son función de su configuración electrónica; por esta razón, elementos diferentes emiten radiaciones diferentes. Esta técnica que permite el análisis de las muestras tal como se toman, por lo que se utiliza en laboratorios con grandes volúmenes de trabajo, proporciona resultados simultáneos de varios elementos en menos de un minuto.

Los segundos utilizan el principio según el cual la cantidad de luz monocromática absorbida por los átomos de un elemento excitado es proporcional a su concentración. Esta técnica relativamente simple y de bajo costo solo se usa en pequeños volúmenes de trabajo debido a que su capacidad de análisis es mono elemental y a que no se debe diluir la muestra para analizarla.

Para analizar las muestras de aceites usados, se utilizó un espectrómetro de emisión con fuente de plasma acoplado por inducción, que emplea para la excitación de la muestra, una técnica moderna consistente en someter el Argón que fluye por un tubo de cuarzo, a un campo magnético oscilante producido por un campo eléctrico de alta frecuencia, para formar un plasma que se halla a una temperatura del orden de 10.000 K, suficiente para disociar y excitar la muestra que se inyecta en el centro del tubo de cuarzo. Este método de ensayo polielemental posee una excelente repetitividad, precisión y límites de detección pero presenta la desventaja de no detectar partículas de tamaño superior a 5  $\mu\text{m}$ .

Los resultados obtenidos de los análisis espectrométricos son las concentraciones en ppm (partes por millón o mg/l) de los siguientes elementos: aluminio, cobre, estaño, hierro, níquel, plomo y silicio; sus valores se almacenan en una base de datos que contiene los resultados de cerca de 7500 muestras analizadas, correspondientes a 2300 vehículos de 80 marcas diferentes (Macián et al., 1992).

## 2. PROCEDIMIENTO

Se llevó a cabo un estudio estadístico sobre una población seleccionada de la base de datos. La primera constituida por los resultados de los análisis espectrométricos de los motores de vehículos de transporte con más de 9 muestras; en total 923 muestras correspondientes a 98 motores con periodos de utilización entre 15.000 y 600.000 kilómetros.

La segunda con condiciones de funcionamiento más críticas, compuesta por las muestras de motores pertenecientes a maquinarias de obras públicas que están sometidas a un servicio muy severo por trabajar en entornos altamente polvorientos; se han considerado 177 muestras de 17 vehículos con periodos de utilización del motor comprendidos entre 236 y 24.000 horas.

Primeramente se comprobó mediante diagramas probabilísticos que cada variable de las dos poblaciones se ajustaba a una distribución lognormal. A continuación se efectuó un análisis exploratorio de los datos para detectar los valores aberrantes y prescindir de ellos. Este análisis previo se hizo utilizando diagramas de caja y bigotes para cada uno de los elementos de desgaste de las dos poblaciones. Finalmente los datos remanentes se ajustaron por regresión lineal.

### 3. RESULTADOS

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las regresiones sobre cada uno de los metales de desgaste (coeficientes de correlación, error estándar y pendiente e intercepto de la recta de regresión) respecto al sílice, cuya presencia en el aire es una de las principales causas del desgaste abrasivo del motor, para el caso de los motores de vehículos de transporte.

*Tabla 1. Resultados de las regresiones lineales sobre motores de vehículos de transporte*

Metal	Coefficiente de correlación	Error estándar [ppm]	Intercepto [ppm]	Pendiente
Al	0.61	4.12	0.94	0.40
Cr	0.40	0.89	0.81	0.09
Cu	0.34	2.16	2.23	0.18
Sn	0.10	0.09	0.51	$4.5 \cdot 10^{-3}$
Fe	0.52	14.30	20.40	2.04
Ni	0.05	0.18	0.51	$2.0 \cdot 10^{-3}$
Pb	0.37	3.06	1.24	0.27

En la Figura 1 aparecen los resultados gráficos más representativos de las regresiones, los correspondientes a las concentraciones de aluminio y hierro respecto al sílice.

En la Tabla 2 se resumen los principales resultados de las regresiones y en la Figura 2 los gráficos de las más representativas: aluminio y hierro respecto al sílice, para el caso de los motores de maquinarias de obras públicas.

*Tabla 2. Resultados de las regresiones lineales sobre motores de obras públicas*

Metal	Coefficiente de correlación	Error estándar [ppm]	Intercepto [ppm]	Pendiente
Al	0.91	5.40	0.30	0.4
Cr	0.87	1.50	0.90	0.07
Cu	0.69	11.5	7.80	0.30
Sn	0.71	1.10	1.30	0.03
Fe	0.85	60.0	39.3	2.70
Ni	0.59	2.6	1.80	0.05
Pb	0.72	8.50	4.90	0.20

### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para las regresiones de los motores de vehículos de transporte se obtuvieron coeficientes de correlación muy variables, comprendidos entre 0.05 para el níquel y 0.61 para el aluminio y errores estándar entre 0.09 ppm para el estaño y 14.3 ppm para el hierro.

Se observa que las correlaciones más representativas son las del aluminio, hierro y ligeramente la del cromo; es decir, que el desgaste de la parte alta del motor está más justificado por la presencia en el aceite del sílice del aire, que el desgaste de la parte baja del motor.

Los metales del motor más propensos al desgaste abrasivo son por lo tanto, el hierro, el aluminio y el cromo que se encuentran presentes en anillos, camisas y pistones. Se puede afirmar que si las camisas fuesen cromadas se incrementaría la correlación entre el cromo y el sílice.

La correlación entre el sílice y los materiales característicos de los cojinetes (cobre plomo y estaño) es bastante baja; esto es posible que se deba a que las partículas de sílice que son muy duras, se incrustan en el material de los cojinetes que es muy blando y no producen abrasión. El desgaste predominante en los cojinetes es el corrosivo y el erosivo.

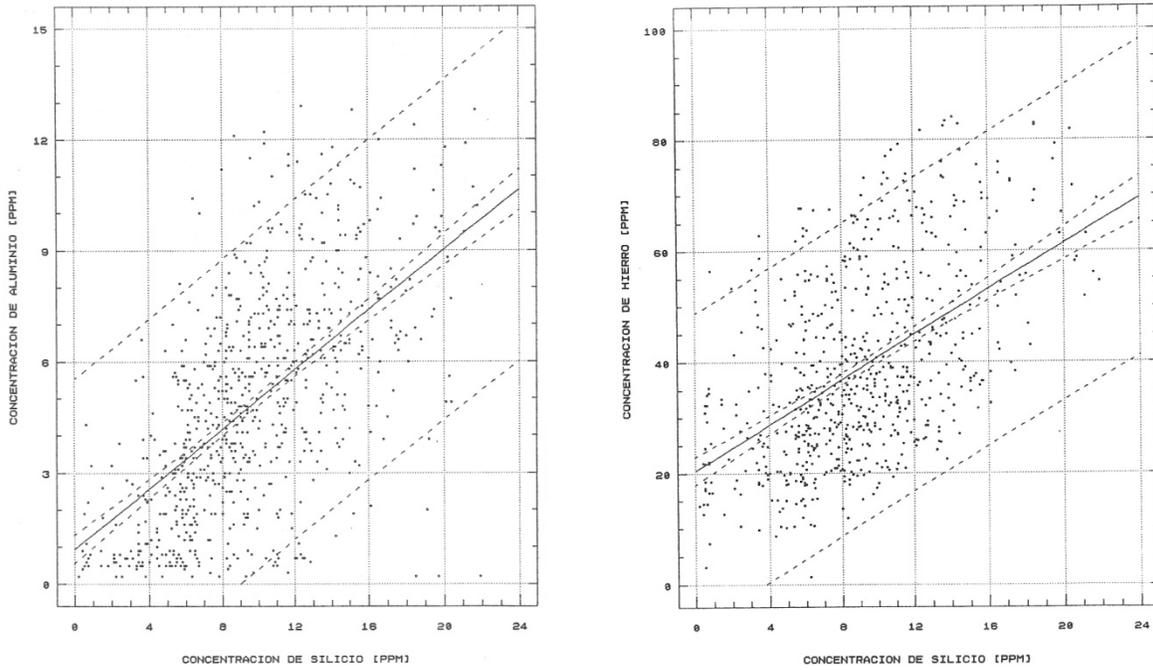


Fig. 1 Regresiones lineales del aluminio y hierro respecto al silicio (vehículos de transporte)

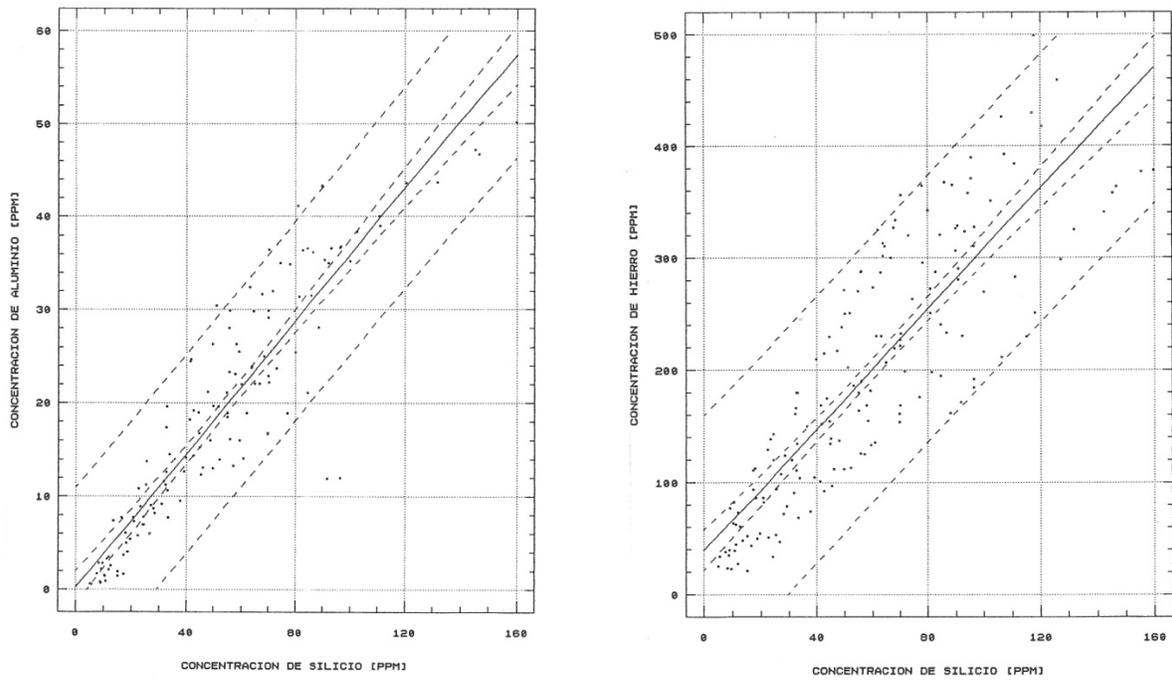


Fig. 2 Regresiones lineales del aluminio y hierro respecto al silicio (maquinaria de obras públicas)

El coeficiente de correlación entre el níquel y el silicio es prácticamente nulo quizás debido a que este metal proviene del desgaste de empujadores y levas del sistema de distribución, en los cuales el mecanismo de desgaste predominante es el de fatiga por esfuerzos hertzianos y el abrasivo es prácticamente despreciable.

El valor del intercepto es el desgaste promedio de los motores cuando la concentración de silicio es nula y debe de corresponder a la cantidad producida por desgaste mecánico puro no inducido por el sílice. La pendiente puede tomarse como el valor medio del desgaste por ppm de silicio presente en el aceite y por tanto es un índice de la severidad del desgaste inducido.

En los resultados gráficos de las regresiones de los motores de obras públicas (Fig. 2), lo primero que salta a la vista es la fuerte variación (aumento) de la magnitud de las concentraciones tanto metálicas como del silicio; lo cual era de esperarse, ya que este último al aumentar por las condiciones del entorno produce un mayor desgaste abrasivo con el consiguiente incremento del contenido metálico del aceite.

Los coeficientes de correlación han aumentado en todos los casos y nuevamente se observan dos grupos de metales: el de los característicos del desgaste de la parte alta del motor con elevados coeficientes de correlación y el de los correspondientes al desgaste de los cojinetes con menores valores de este estadístico. Puede concluirse que al aumentar el contenido de sílice en el aire crece la importancia del desgaste abrasivo frente a los otros tipos de desgaste aún en los cojinetes.

Comparando la pendiente de las rectas de regresión de las poblaciones investigadas, se deduce que la intensidad del desgaste de la parte alta del motor, es prácticamente independiente del tipo de servicio, mientras que para la parte baja y el sistema de distribución aumenta apreciablemente al crecer la severidad de las condiciones del entorno. Esto quiere decir, que el desgaste de la parte alta del motor se incrementa cuantitativamente, mientras que el de la parte baja y el sistema de distribución lo hace cualitativamente al pasar de servicio liviano a servicio pesado.

Para hacer más vistosa la relación existente entre el desgaste abrasivo de la parte alta del motor, caracterizado por el contenido de hierro y de aluminio de las muestras de aceite, al aumentar el

carácter abrasivo del aire de admisión se presenta la gráfica tridimensional de la Fig. 3 que ilustra claramente este comportamiento.

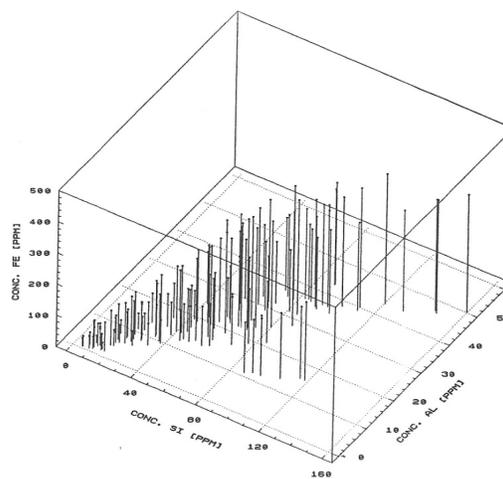


Fig. 3 Variación de las concentraciones de aluminio, hierro y silicio

## 5. CONCLUSIONES

En cualquier condición del entorno de servicio la sílice del aire produce preferencialmente un desgaste de la parte alta del motor de intensidad constante.

Cuando la condición del entorno de servicio es muy severa, aumenta el desgaste de la parte baja del motor y del sistema de distribución.

Al aumentar la severidad del entorno de trabajo crece la importancia del desgaste abrasivo frente a los otros tipos de desgaste, aún en los cojinetes.

## REFERENCIAS

- Eyre, T. (1991). Friction and wear control in industry. *Metals and Materials*. Vol. 7, No. 3, pp. 143-148.
- Macián, V; Fygueroa, S y Ontiveros, L. (1992). Estudio sobre los análisis de desgaste de motores de vehículos industriales. X Congreso de Ingeniería Mecánica. Madrid.
- Tormos, B. (2005). Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado. Editorial Reverté. Barcelona.
- Zmitrowicz, L. (2006). Wear patterns and laws of wear - a review. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 44, 2, pp. 219-253, Warsaw.