



POLITÉCNICA



## **La Macrografía como Método de Análisis y Prevención de Roturas en Servicio. Caso Práctico: Camisas de Cilindro**

**Elena Cerro Prada, Luís B. López Vázquez y Rosario Torralba Marco**

Grupo de Investigación TEMATMA “Tecnología de Materiales y Medio Ambiente”

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil

Universidad Politécnica de Madrid, España

### **RESUMEN**

En este trabajo se analizan las características metalúrgicas y geométricas de las camisas de cilindro, así como su influencia en la aparición de diversos tipos de fallos y/o un elevado consumo de aceite. Los parámetros esenciales en las medidas de estas características son analizados a partir de la inspección macrográfica de la pieza. El fenómeno de cavitación, proceso de corrosión específico de materiales metálicos en contacto con líquidos, es estudiado en profundidad y su incidencia en el funcionamiento de las camisas de cilindro. Se proponen las características óptimas que debe tener una camisa de cilindro con el objetivo de evitar la incidencia de fallos internos así como la aparición de cavitación.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La camisa de cilindro es una pieza fundamental cuya principal función es garantizar un correcto deslizamiento de los segmentos y pistones sobre su superficie interna, de ahí que sus características superficiales sean vitales. Además, sobre su superficie externa, si la refrigeración es directa, se presenta un tipo específico de corrosión llamado cavitación, ya tratado en otros artículos (López-Vázquez, 1982a, 1982b).

### **2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS**

Las características que podríamos considerar son de dos tipos, *metalúrgicas* como son material, composición y estructura, y *geométricas* tanto a nivel macrogeométrico (forma, anclaje, etc.), como microgeométrico (textura superficial y rugosidad). Cada una de las características mencionadas puede influir en la aparición de uno o más tipos de fallo o excesivo consumo de aceite.

## 2.1 Características metalúrgicas

Desde el punto de vista estructural, la camisa de cilindro es pues una fundición gris hipoeutéctica con grafito laminar forma I ó forma II, si se ha obtenido por centrifugación, con distribución tipo A y B, con matriz perlítica. Los dos tipos principales corresponden a una fundición aleada con cromo y molibdeno con carburos uniformemente distribuidos, o una fundición aleada con fósforo con lagunas de esteadita (eutéctico fosforoso binario o ternario de fosforo de hierro con ferrita o cementita) (Figura 1, A). La ferrita presente ha de ser nula o despreciable pues por su alta soldabilidad, es un constituyente que disminuye en gran medida la resistencia al desgaste.



**Fig. 1 - (A): Fundición gris perlítica con lagunas de esteadita. (B): Sección metalográfica transversal para poder apreciar la profundidad de deformación. (C): Cubierta de chapa, corte transversal. (D) Cubierta de chapa, Faxfilm.**

## 2.2 Características geométricas

La camisa ha de corresponder geoméricamente a un cilindro y las desviaciones que presente respecto a esta forma geométrica, aparte de las que se produzcan en su mecanización, pueden tener los siguientes orígenes:

- Deformaciones por tensiones producidas en el montaje. En general, esto suele deberse a un mal diseño del anclaje.
- Deformaciones producidas por las tensiones derivadas del funcionamiento.
- Deformaciones producidas por liberación de tensiones residuales debido a la temperatura de funcionamiento. Esto es evitable con un tratamiento previo de estabilizado o distensión.
- Deformaciones de origen térmico debidas a las dilataciones desiguales a lo largo de toda la pieza que pueden conducir a un posible gripado pero que en general suelen ser mínimas comparadas con las que sufre el propio émbolo, siendo este elemento el causante de la mayor parte de los gripados.

Aparte de la macrogeometría, los aspectos microgeométricos tienen una relevante importancia frente a los fenómenos de desgaste o elevado consumo de aceite, pudiendo considerarse por un lado, aspectos metalúrgicos y por otro lado, aspectos meramente geométricos de la superficie de deslizamiento.

Los aspectos metalúrgicos atañen a las modificaciones que sufre la superficie de deslizamiento en su mecanización, y que pueden conducir, bien a una deformación plástica



POLITÉCNICA



más o menos profunda (Figura 1, B), impidiendo con ello que las láminas de grafito afloren a la superficie y actúen como elemento lubricante, cosa que generaría una propensión al gripado, o bien a que se produzcan escamas, llamada "cubierta de chapa" (Figura 1, C), de fácil desprendimiento en funcionamiento. Un corte metalográfico normal a la superficie puede servir para efectuar el control de estos defectos, especialmente, la medida de la profundidad de la zona deformada plásticamente.

El acabado superficial más idóneo para disminuir el consumo de aceite, lo constituye el bruñido especial que se denomina "plateau honing", consistente en un rayado cruzado sobre una meseta plana. El control de este tipo de acabado superficial se realiza mediante la obtención de un faxfilm de la superficie (Figura 1, D), que es una ampliación obtenida por reflexión en un microscopio óptico, de una lámina de acetato que se ha presionado sobre la zona a inspeccionar, en la que previamente se depositan una o dos gotas de acetona. Esto nos permite realizar una valoración de las características superficiales a través de su imagen

### 3. PREVENCIÓN DE FALLOS INTERNOS.

#### 3.1 Gripado

La camisa no suele ser responsable de los gripados sino que más bien corresponde a una de las piezas afectadas. En general, el gripado (Figura 2), suele producirse al poco tiempo de rodaje del motor, y suele producirse por una elevación de temperatura por falta de refrigeración, es pues el control de la temperatura de funcionamiento, lo que en mayor medida puede contribuir a evitar este fallo.

#### 3.2 Desgaste

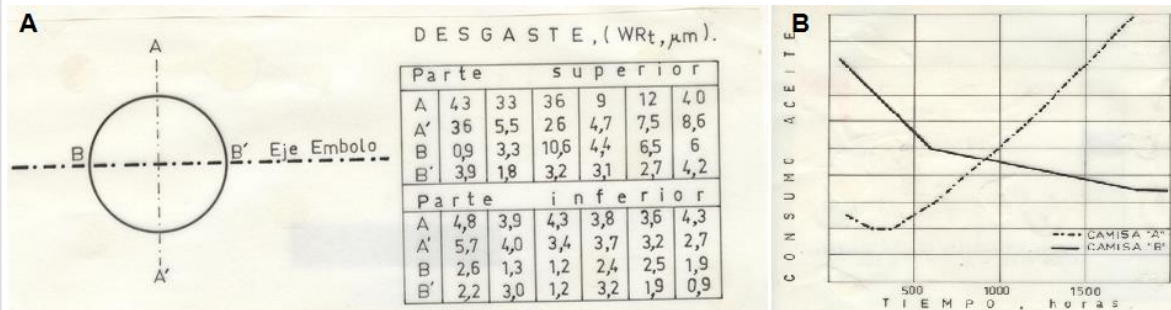
El deslizamiento del émbolo produce un desgaste uniforme a lo largo de toda la camisa excepto en las dos zonas, superior o inferior, en las que se produce el cambio de sentido en su carrera, donde aparece un escalón más o menos pronunciado (Figura 3, A). El valor máximo admisible de este escalón es difícil de precisar y estará relacionado con las características de los segmentos.



**Fig. 2 - Gripado en la superficie interna de una camisa de cilindro.**

### 3.2 Consumo de aceite

El consumo de aceite suele expresarse como porcentaje sobre el consumo de combustible, y su evolución suele presentar un máximo inicial, seguido de un descenso más o menos pronunciado, etapa que constituiría el rodaje, una estabilización del consumo que correspondería a la etapa de vida útil, y un ascenso más o menos brusco que constituiría la etapa final que requerirá el cambio del equipo motor. El acabado interior de la camisa y su resistencia al desgaste, tiene una influencia decisiva, no solo en los valores absolutos del consumo de aceites sino también, en el tiempo que corresponde a cada una de las etapas mencionadas (Figura 3, B).



**Fig. 3 - (A) Escalón producido en el punto de cambio de recorrido de deslizamiento del émbolo. (B) Variación del consumo de aceite en dos tipos distintos de camisa.**

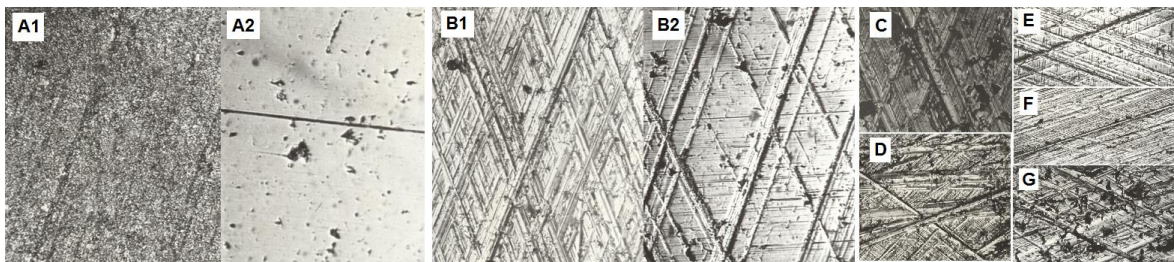
Así, una superficie interior sin rayado o bruñido apreciable, correspondiente a la camisa de tipo A, prácticamente no presenta tramo recto alguno. La camisa con un buen bruñido interior correspondiente a la camisa tipo B, prácticamente después de 2000 horas de rodaje, todavía casi acaba de llegar a la zona de estabilización del consumo. Esta diferencia de consumo está en relación con el aspecto que presenta el faxfilm de su superficie antes de iniciar el rodaje, y después de 2000 horas de funcionamiento (Figura 4, A), (Figura 4, B). Un bruñido puede presentar algunos defectos significativos, y los efectos que producen son:

- Rayado ancho y profundo produce un desgaste anormal y dilatado tiempo de rodaje (Figura 4, C).
- Rayado fragmentado conduce a un lento asentamiento de los segmentos que pueden incluso arañarse o rayarse produciendo elevados consumos y aumentando la temperatura de la segmentadura (Figura 4, D)
- Rayado irregularmente espaciado que conduce a una deficiente lubricación (Figura 4, E).
- Rayado profundo en una única dirección que produce un giro de los segmentos y su rápido desgaste (Figura 4, F).
- Angulo de cruce pequeño que genera una deficiente lubricación, un lento rodaje y



excesivo desgaste.

- Metal arrancado sobre la superficie bruñida (plateau) que reduce la uniformidad de consumo (Figura 4, G).
- Meseta bruñida (plateau), demasiado pequeña que produce una excesiva temperatura en segmentos y acorta su vida útil por excesivo desgaste.



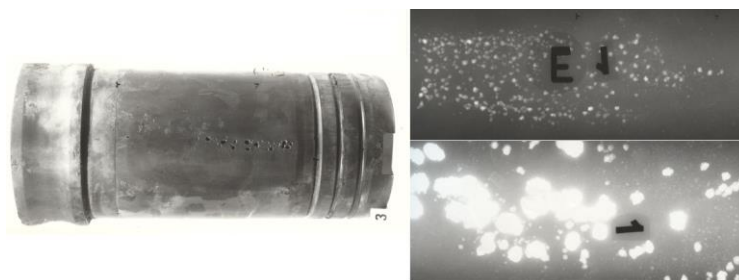
**Fig. 4 - (A1) Camisa A “sin bruñir”, antes de rodar. (A2) Camisa A “sin bruñir”, Después de rodar 2000 horas. (B1) Camisa B con bruñido “Plateau Honing”, antes de rodar. (B2) Después de rodar 2000 horas. (C) Bruñido ancho y profundo con arranque de material. (D) Bruñido fragmentado. (E) Bruñido irregularmente espaciado. (F) Bruñido en un solo sentido. (G) Material arrancado.**

Un método preventivo consiste pues en efectuar un control del correcto mecanizado de la superficie interna a través del análisis de su microgeometría con una técnica tan simple como el estudio de un faxfilm de la misma.

#### 4. PREVENCIÓN DE FALLOS EXTERNOS: CAVITACIÓN

##### 4.1 Definición y tipos

La cavitación es un tipo específico de corrosión que producen esencialmente los líquidos en movimiento por implosión de las burbujas que se forman en su seno. Por cavitación se entiende tanto la formación de burbujas en el seno del líquido, como las escoriaciones, picaduras o cavernas producidas en el material metálico por implosión de esas burbujas sobre su superficie (Figura 5, izquierda).



**Fig. 5 - Izquierda: Camisa cavitada. Derecha: Radiografías para medida de la**



**profundidad de las picaduras.**

#### 4.2 Descripción del fenómeno

Un líquido puede considerarse en teoría, como un medio pseudocristalino con gran número de vacantes, en equilibrio estático. Estas vacantes existentes, constituyen el núcleo de formación de burbujas que alcanzarán un tamaño estable cuando en el líquido existan gases disueltos o vapor. Si estudiamos el caso de que este líquido actúe como medio refrigerante dentro del circuito, la aportación de calor a través de las superficies a refrigerar, así como las variaciones de presión existentes en su seno debidas a variaciones de sección o velocidad, pueden ser causa del crecimiento de volumen de estas burbujas, es decir, la causa de lo que se llama cavitación del líquido.

#### 4.3 Estudio teórico

Parámetro de cavitación. Introduciendo el parámetro:

$$k = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho \cdot v_\infty^2} \quad (1)$$

podemos considerar que este parámetro tendrá un valor crítico cuando la presión de implosión iguale a la resistencia o carga de rotura del material metálico, es decir, el valor de este parámetro crítico  $k_i$ , será:

$$k_i = \frac{1}{\left( \frac{3\sigma_m}{2p_0 \cdot \rho_l \cdot c^2} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1} \quad (2)$$

siendo  $\sigma_m$  la carga de rotura del material metálico.

- Si,  $k > k_i$ , no se producirá cavitación.
- Si,  $k = k_i$ , se iniciará la cavitación.
- Si,  $k < k_i$ , cavitará, dependiendo la importancia de los daños por cavitación, de la diferencia entre ambos valores.

#### 4.5 Evaluación de los resultados

Dado que la cavitación es una corrosión por picaduras, es decir, muy localizada, aparte de valorar las pérdidas de peso y la velocidad de corrosión, ha de hacerse uso de la medida de la profundidad de penetración de la picadura, magnitud que puede determinarse mediante un corte metalográfico o bien mediante radiografía (Figura 5, derecha).



POLITÉCNICA



#### 4.6 Conclusiones sobre los factores más determinantes en la cavitación de las camisas de cilindro

##### 1. Medios cavitantes (líquido):

1. La presencia de gases disueltos produce un aumento sensible de la cavitación. Como factores para su eliminación pueden utilizarse:
  - Circuitos cerrados de refrigeración.
  - Medios refrigerantes con escasa solubilidad de gases, y en tal sentido el agua destilada debe desterrarse totalmente por su gran avidez para disolver incluso gases.
  - Utilización de líquidos anticongelantes con componentes tensoactivos.
2. La temperatura es un factor importante, ya que tiene lugar un mínimo de cavitación para temperaturas próximas a la temperatura de ebullición.
3. Las sales disueltas que producen dureza permanente (cloruros y sulfatos), son más agresivas que aquellas que producen dureza temporal (carbonatos y bicarbonatos).
4. Para prevenir la formación de pilas electroquímicas que aceleren los procesos de corrosión, es conveniente la utilización de ánodos de sacrificio de magnesio o aluminio.

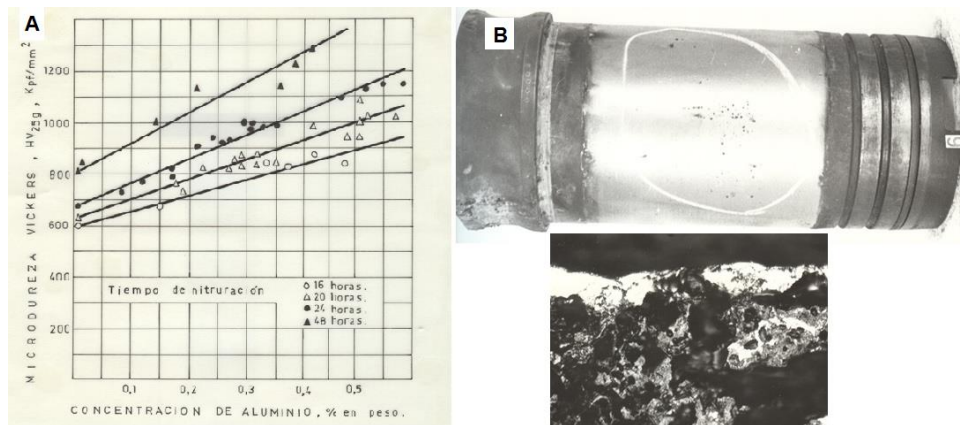
##### 2. Medios cavitados (material metálico):

1. La fundición más resistente a la cavitación es la que tiene matriz perlítica. Las fundiciones con matriz ferrítica o martensítica son menos resistentes.
2. La presencia de fases heterogeneas como carburos o esteadita restan resistencia a la cavitación.
3. La dureza másica no tiene particular importancia, pero sí la tiene la dureza superficial. Una fundición nitrurada en atmósfera gaseosa, presenta una gran resistencia a la cavitación.
4. La forma, tipo de distribución y tamaño del grafito, influyen en la cavitación, siendo el grafito laminar (con gran tamaño de lámina) el menos resistente y el nodular (con reducido tamaño de nódulo) el más resistente. Dentro de la fundición de grafito laminar, la más resistente es aquella que presenta distribución Tipo A, y tamaño 7 u 8.
5. De las posibles capas protectoras, solo el cromo duro con espesores de 50  $\mu\text{m}$ , resiste bien por tener una dureza similar.

#### 6. PROPUESTA DE SOLUCIÓN SIMULTÁNEA AL DESGASTE Y LA CAVITACIÓN

La camisa óptima propuesta sería:

1. Fundición gris perlítica nitrurada en atmósfera gaseosa a 535° de temperatura durante 24 horas, y con una ligera concentración de aluminio (0,2-0,5 %) (Figura 6, A). Solo el cromo duro tiene una dureza comparable (Sampén, 2003), pero el problema es que una vez aparecida la picadura, la profundidad de la misma avanza con suma rapidez pues el avance de la corrosión electroquímica se produce aun cuando el motor esté en reposo) (Figura 6, B).



**Fig. 6 - (A) Valores de microdureza superficial para distintas concentraciones de aluminio de la fundición y distintos tiempos de nitruración. (B) Camisa con protección de cromo duro cavitada.**

2. Para evitar que su elevada dureza externa se alcance en el interior, será necesario efectuar una deposición electroquímica de una aleación estaño-níquel con una concentración cuyo punto de fusión parcial sea de 575° efectuando dicha deposición antes de la nitruración, eliminándose de nuevo después de la misma.
3. Realización de un rayado (Honing) con punta de diamante de la superficie interna.
4. Eliminación mediante un lapeado interno de todos los nitruros superficiales que podrían conducir a un rayado de la segmentadura.

## REFERENCIAS

López Vázquez, L.B. (1982). Cavitación Vibracional en Fundiciones: Camisas de Cilindro de Motores Diesel (Primera Parte). *Revista Fundición* 252, pp. 2-14.

López Vázquez, L.B. (1982). Cavitación Vibracional en Fundiciones: Camisas de Cilindro de Motores Diesel (Segunda Parte). *Revista Fundición* 253, pp. 58-75.

Sampén, L. (2003). Pautas para el Diseño de Partes Metálicas Resistentes al Desgaste. *Industrial Data*, 6(2), pp. 66-73.