

"ESTUDIO DE LAS CAUSAS DE FALLO EN LAS VÁLVULAS DE LOS INYECTORES DE UN MOTOR DIESEL"

Porto, E.*; Iglesias, F.*; Iglesias, R.*;
Merino, P.**; Pena, G.**; Collazo, A.**; Pérez, C.*

* Asociación de Investigación Metalúrgica del Noroeste (AIMEN). Vigo.

** Departamento de Ingeniería de Materiales Mecánica Aplicada y Construcción. E.T.S.I.I. Universidad de Vigo

Resumen: La cavitación es un fenómeno hidrodinámico que origina fallos de gran importancia, por lo que ha de ser tenida en cuenta en el diseño y selección de materiales para la construcción de piezas en aplicaciones en las que exista desplazamiento relativo de la superficie metálica y el fluido. En este trabajo se presentan los resultados del estudio realizado para determinar las causas del deterioro y rotura de los vástagos de una serie de válvulas pertenecientes a las bombas de inyección de alta presión de diferentes motores diesel, elaborados en un acero DIN 100Cr6 (UNE 36027), templado y revenido. El fallo de estos componentes fue debido a la conjunción de un fenómeno de cavitación originado por el combustible y el progresivo crecimiento por fatiga de microgrietas que se originan en el fondo de las picaduras de cavitación, como consecuencia del golpeteo cíclico de los vástagos contra la superficie de los discos de asiento.

Abstract: Cavitation is a hydrodynamic phenomenon that causes serious failures, and must therefore be taken into account in designing and selecting materials for the construction of parts in applications where there is a relative displacement of the metals surface and the fluid. This paper presents the results of a study undertaken to determine the causes of deterioration and fracture in the rods of a series of valves belonging to high-pressure injection pumps from different diesel fuel combustion engines, made of quenched and tempered DIN 100Cr6 (UNE 36027). The failure in these components was due to the conjunction of a cavitation phenomenon caused by the fuel and the progressive growth through fatigue of microcracks which nucleate in the cavitation pits which are the consequence of the continuous hitting of the rods against the surface of the valve disk.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analizan las causas que originaron el fallo de una serie de válvulas de retención pertenecientes a las bombas de inyección de alta presión de diferentes motores diesel de fuel. En ellas se observan distintos grados de deterioro superficial, que condujeron, en algunos casos, a la rotura del cuerpo de la válvula, con pérdida de la cabeza de la misma.

Las válvulas están constituidas por un vástago (figura 1) y un disco de asiento. El combustible penetra en ellas, a través de las canalizaciones formadas por el orificio cilíndrico del disco y las paredes prismáticas del vástago, a una temperatura comprendida entre 125°C y 135°C. En el régimen habitual de funcionamiento, el vástago se desplaza axialmente con una frecuencia de 300 rpm, pudiendo estar sometido a picos de presión del orden de 1000-1110 bares.

En aquellos motores en los que el fallo se producía a tiempos más cortos, se detectó la presencia de agua en el combustible.

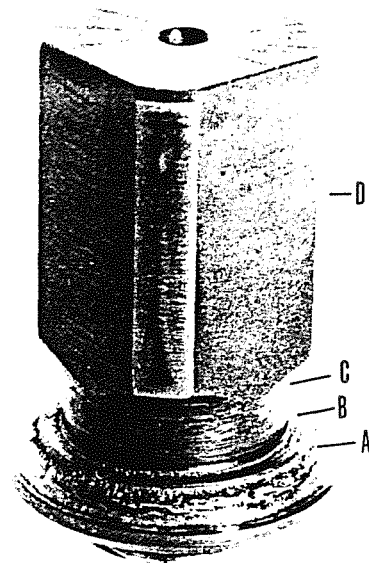


Fig. 1. Aspecto general de un vástago (4,3x). A: superficie de asiento. B: meseta de encuentro. C: cuello. D: cuerpo.

2. MATERIALES

El vástago está realizado en un acero según DIN 100Cr6 (F 1310 según UNE 3627), templado y revenido. El examen metalográfico revela una microestructura homogénea, constituida por finos glóbulos de carburos dispersos en una matriz de martensita revenida.

El valor medio de la dureza determinada para estas piezas es de 60,7 HRC (incertidumbre para $k=2$: $\pm 1,9\%$).

Los discos de asiento han sido construidos en un acero para cementación F 1516 según UNE 36013, presentando una estructura típica de una pieza cementada, templada y revenida. El núcleo está constituido por bainita y martensita revenida, y la zona cementada exclusivamente por martensita revenida, dispuesta en una capa homogénea a lo largo de todo el perímetro de la pieza.

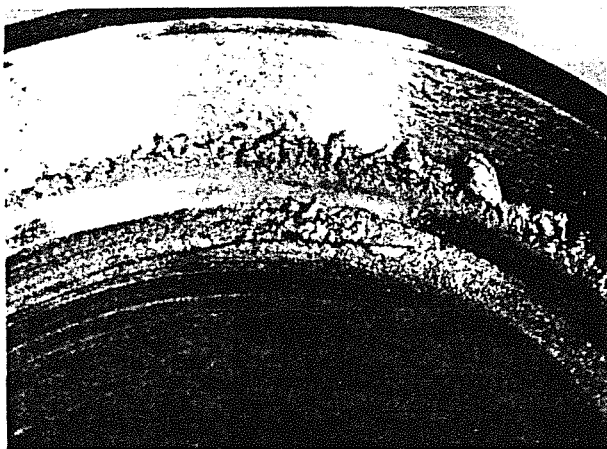


Fig. 2. Detalle de la fig.1 (18x). Grieta situada en una de las zonas deterioradas de la meseta

3. DESARROLLO DEL ESTUDIO

a) Examen macrográfico.

Se estudió una serie de cinco válvulas. En todas ellas el fallo se localiza en los vástagos, fundamentalmente, en la zona intermedia de su superficie de asiento extendiéndose, en algunas de ellas, hacia el cuello. En esta sección puede apreciarse una banda bien definida formada por material erosionado y múltiples picaduras, en la dirección en que circula el fuel.

Uno de los vástagos estudiados presenta, además, una grieta (figura 2) que recorre aproximadamente la mitad del perímetro del cuello. La superficie de fractura generada (observada tras realizar un corte longitudinal de la pieza) presenta un aspecto suave y mate con manchas circulares que penetran hacia su interior.

b) Estudio de las superficies deterioradas

Se realizó una exploración mediante Microscopía Electrónica de Barrido en las diferentes zonas dañadas de los vástagos, así como en las superficies de asiento de los discos.

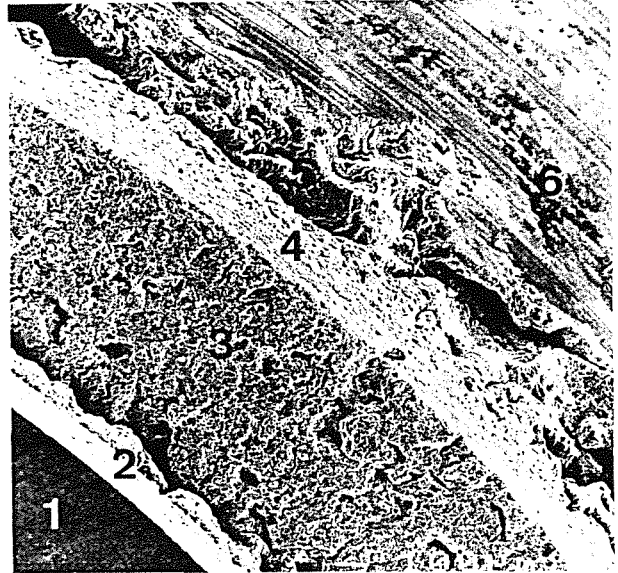


Fig.3. Deterioro de la superficie de asiento, meseta y cuello. (SEM, 40x). 1. Superficie de corte normal al eje longitudinal del vástago. 2. Cuello. 3. Meseta. 4, 5 y 6. Superficie de asiento

En la micrografía de la figura 3 se muestra una parte de la zona dañada de uno de los vástagos. En ella puede apreciarse claramente la superficie erosionada y picada de la meseta (3), la menos dañada del cuello (2) y la trinchera que se abre en el ángulo de encuentro entre ambas.

En las superficies de asiento se diferencian tres bandas con diferentes grados de deterioro: siguiendo el sentido de la circulación del combustible, encontramos una primera zona (indicada como zona 4 en la figura), que aparece ligeramente degradada. A medida que avanzamos, los efectos de la erosión son cada vez más severos, las picaduras se hacen de mayor tamaño y aparecen numerosas cavidades que penetran en el material (zona 5). En la tercera de las bandas (zona 6) el daño es considerablemente menor, apreciándose una serie de picaduras dispersas en una observación a mayores aumentos.

En el límite de las zonas 5 y 6 aparecen picaduras de mayor tamaño que se prolongan en esta última a través de unos surcos, erosionados en la dirección del flujo del combustible y pequeñas zonas deformadas plásticamente (figura 4). En algunas de estas picaduras llegan a distinguirse con claridad las marcas concoidales características de un fenómeno de fatiga (figura 5).

la que está situada en el vértice nacen dos fisuras de progresión rectilínea y sin ramificaciones.



Fig.7. Preparación metalográfica del vástago de la figura 6. 100x, sin ataque. Picadura en la zona más deteriorada de la superficie de asiento.

resistir este fenómeno. Tanto su elevada dureza como la existencia de una estructura metalúrgica constituida por una matriz de martensita revenida pueden considerarse, asimismo, favorables en cuanto a su comportamiento a fatiga.

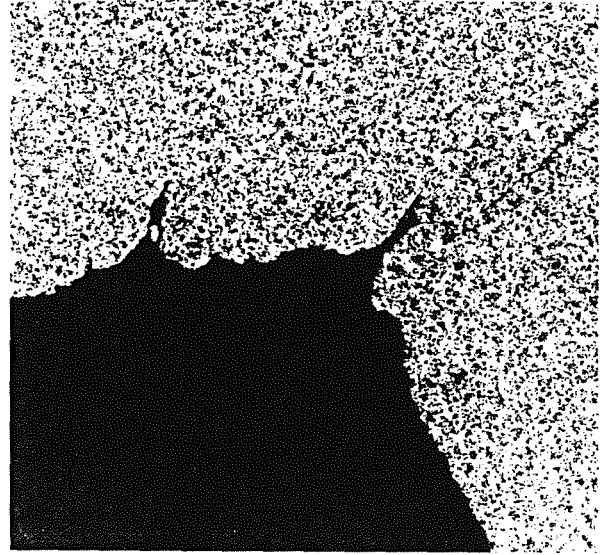


Fig.8. Preparación metalográfica del vástago de la figura 6. 100x, nital 1%. Hendiduras y grietas en el ángulo de acuerdo entre la meseta y el cuello.

4. ANÁLISIS

Los exámenes superficiales muestran microcráteres con levantamiento de material en los bordes que, eventualmente, llega a desprenderse. Esta morfología resulta característica de un proceso de cavitación en materiales metálicos duros [1].

El fenómeno de cavitación se origina por la formación de burbujas de vapor en el interior del combustible que colapsan cuando encuentran una zona de alta presión, causando el dañado de la superficie. El deterioro es debido al impacto de las partículas del microchorro líquido que se origina, que pueden alcanzar velocidades comprendidas entre 100 y 500 m/s [2] así como presiones de implosión del orden de 60 a 1500 Nmm⁻² [3]. Los diminutos pozos que se forman por deformación plástica, crecen por coalescencia y por repetición continuada de este proceso.

Los principales factores que influyen en el dañado por cavitación son [4]:

- La dureza, ya que, a igualdad de otros factores, el material será más resistente cuanto más elevada sea ésta. Los aceros empleados en la elaboración de las dos piezas de las válvulas poseen una dureza elevada, especialmente el utilizado para los vástagos, por lo que pueden considerarse adecuados para

- La tensión de vapor de equilibrio entre la fase líquida y la fase gaseosa y la presencia de burbujas de vapor. Las características del combustible empleado en estos motores, composición y temperatura, permiten la formación de pequeñas burbujas en las condiciones a las que se somete al atravesar la válvula. El ocasional arrastre de agua en la captación del fuel agravaría notablemente el proceso, por formación de burbujas de vapor de agua.
- Los factores que induzcan variaciones locales de presión en el líquido, como son los cambios de sección, vibraciones, obstáculos, etc.
- La velocidad relativa de la corriente respecto de la superficie es fundamental, ya que, a igualdad de otros factores, el daño resultante es proporcional a la sexta potencia de la velocidad del fluido.

5. CONCLUSIONES

El deterioro superficial de los vástagos y discos de asiento de estas válvulas comienza por un proceso de cavitación, inducida por el descenso de presión que tiene lugar por estrechamiento de la canalización del combustible y las turbulencias originadas en la zona del cuello, entre las desembocaduras de los cuatro canales de entrada del fuel a la válvula.

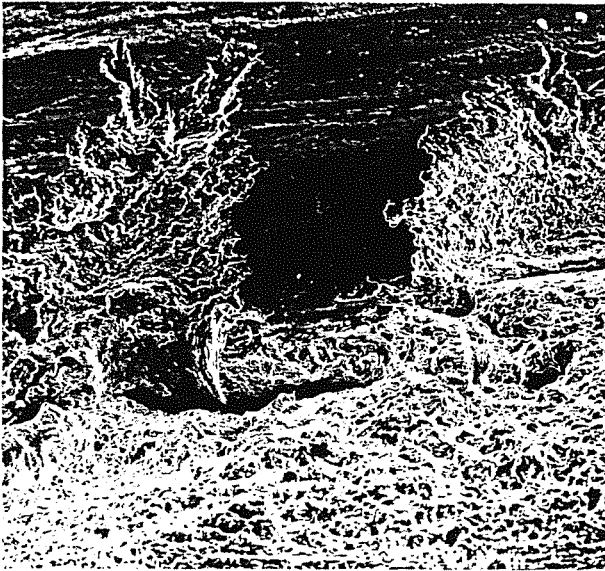


Fig. 4. Picaduras amplias en la zona de asiento del vástago. Señales de deformación plástica y erosión. (SEM, 200x).

La superficie de asiento de los discos de las válvulas muestra un deterioro similar a la de los vástagos, si bien de mucha menor intensidad.

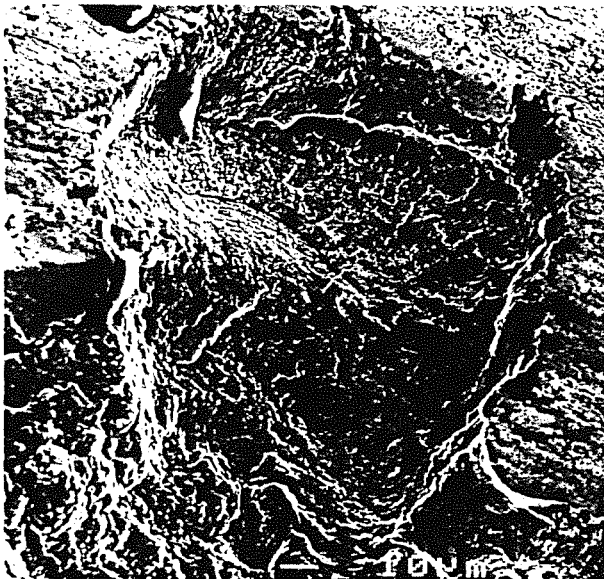


Fig.5. Detalle de una de las picaduras de la figura anterior con marcas concoidales de fatiga.

b) Estudio metalográfico

Se realizaron varias preparaciones metalográficas de cortes longitudinales-radiales de vástagos y discos.

En la figura 6 se muestra un montaje fotográfico realizado a partir de dichas preparaciones. Para ello se han seleccionado, de entre las piezas estudiadas, el

vástago más deteriorado y el disco que presentaba menos daños, con el fin de relacionar los fallos con la geometría original de las piezas.

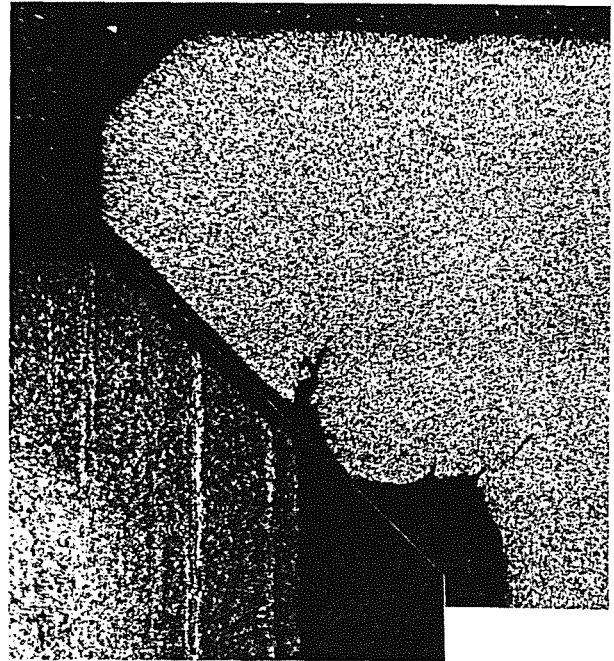


Fig. 6. 20x, Nital 1%. Montaje fotográfico a partir de las preparaciones metalográficas de un vástago y un disco de asiento.

En este montaje es posible apreciar que las superficies de asiento del cuerpo de la válvula y de su correspondiente disco no coinciden. Esta falta de acuerdo origina un estrechamiento progresivo del canal por el que circula el combustible al iniciarse la superficie de asiento del vástago, hasta alcanzar su valor mínimo en contacto con el vértice del disco.

En ambas superficies (vástago y disco) los daños se localizan preferentemente en esta zona de estrechamiento, siendo más severos en el punto que coincide con el final del disco, en el que puede apreciarse un pequeño resalte, y en la zona de acuerdo entre la meseta de apoyo y el cuello del vástago.

Con respecto a la primera de estas zonas, en la figura 7 se ofrece un detalle de una de las preparaciones metalográficas del vástago de la figura 6, en la que se pone de manifiesto la alteración de perfil original y la formación de una cavidad triangular, causados por la pérdida de material, en cuyo fondo se inician algunas grietas. También se aprecia la deformación plástica sufrida por la visera de material que cierra esta cavidad.

En la micrografía de la figura 8 se ofrece el aspecto del ángulo de acuerdo entre la meseta y el cuello del vástago de la válvula, así como la profundidad alcanzada por algunas de las hendiduras que en ella aparecen. Puede observarse como a partir del fondo de

Las tensiones cíclicas generadas por el continuo golpeteo del vástago sobre el disco inducen, en el primero, la nucleación de microgrietas en el fondo de las picaduras de cavitación, tanto en la zona del final de apoyo disco-vástago, como en el ángulo de encuentro entre la meseta con el cuello, que evolucionan progresivamente por fatiga, hasta causar la rotura de las piezas.

Dado que el material seleccionado es adecuado para la construcción de estas piezas, podría minimizarse el riesgo de deterioro por cavitación mejorando el diseño de las válvulas, de forma que se eviten las turbulencias. De igual forma, es conveniente la eliminación del agua en el combustible, factor que se ha demostrado agravante del proceso.

Con respecto a los factores que acentúan el fenómeno de fatiga posterior, se considera que el radio de acuerdo entre la meseta de asiento y el cuello de los vástagos es muy pequeño, por lo que la concentración de tensiones será mayor. Asimismo deben evitarse los resaltes en la superficie de apoyo del disco, que incrementan el daño mecánico durante el funcionamiento.

7. REFERENCIAS

- [1] ASM Handbook, ASM International, Vol. 13, "Corrosion", 136-142, (1987).
- [2] ASM Handbook, ASM International, Vol. 11, "Failure Analysis and Prevention", 164-171, (1986).
- [3] Heitz, E. "Chemo-mechanical effects of flow on corrosion", Corrosion-NACE, Vol. 47, 2, 135-145, (1991).
- [4] Pintado Fe, J.M., "Fallos en servicio de los materiales metálicos", Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, 391-399, (1992).