

# Análisis de falla de un eje de piñón cónico

## Failure analysis of a conical pinion shaft

Tolosa, Ramón<sup>1\*</sup>; Chacón, Rubén<sup>2</sup>; Briceño, Richard<sup>1</sup>; Gil, Roberto<sup>1</sup> y Bracho, Maria  
GPM<sup>1</sup>-DIMMA<sup>2</sup>, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, ULA  
Mérida 5101, Venezuela  
\*tolosa@ula.ve

Recibido: 30-05-2009

Revisado: 17-06-2010

### Resumen

*En este trabajo de investigación se estudió la falla de un eje de piñón cónico perteneciente a la caja de velocidades de un tractor agrícola. Se utilizaron las siguientes técnicas de análisis: inspección visual, fractografía, metalografía, análisis químico, ensayo de dureza, y el análisis matemático teórico del estado de esfuerzos. Como resultado en el presente estudio, se determinó que el eje se fabricó con un acero aleado de bajo contenido de carbono de elevada templabilidad, que se sometió a los tratamientos térmicos de cementación, temple y revenido, este último produjo martensita revenida fragilizada. La presencia de una geometría complicada, dada por una ranura circular interceptada por diez ranuras axiales, todas con radios de curvatura en las entallas muy pequeños, produjeron una elevada concentración de esfuerzos en el fondo de la intersección de dichas ranuras. El estado metalúrgico del acero, la presencia de concentradores de esfuerzos y una condición de operación de gran exigencia mecánica determinaron la falla violenta del eje. La fractura del eje tiene aspectos característicos de materiales frágiles. La teoría de Mohr Modificada corrobora la causa de la falla.*

**Palabras clave:** Eje, acero, análisis de falla, templabilidad, fragilización, fractura, cálculo matemático.

### Abstract

*In this investigation the failure of conical pinion shaft that belongs to an agricultural tractor gear transmission box was studied. The following techniques for the analysis were used: visual inspection, fractography, metallographic, chemical analysis, hardness test and the theoretical mathematical analysis of the stress state. As a result in this study, it is determined that the shaft was manufactured with a steel alloy of low carbon and high hardenability, this was thermally treated with carburization, quenching and tempering, the last one produced tempered martensite embrittlement. The presence of a complicated geometry, given by a circular groove intercepted by ten axial grooves, all with a very small curvature radio in the notch, produced a high stress concentration at the bottom of the grooves interception. The steel metallurgical state, the presence of stress concentrator and an operation condition of high mechanical demand determined the violent shaft failure. The fracture of the shaft has characteristic aspects of a brittle material. The Modified Mohr theory corroborates the failure cause.*

**Key words:** Shaft, steel, failure analysis, hardenability, embrittlement, fracture, mathematical calculus.

### 1 Introducción

La mayoría de los elementos de máquinas que en servicio están sometidos a elevados esfuerzos son construidos generalmente de acero, por ejemplo ejes, engranajes, cigüeñales, bielas, etc. En el caso de engranajes y ejes de piñón se utilizan normalmente los aceros AISI 1040, 1060, 4140 y 4340 (Ranganath y col., 2004). Cuando estos ejes son fabricados con aceros que poseen bajo contenido de carbono, normalmente menor que 0,30 % C, son sometidos al trata-

miento termoquímico de cementación (carburación), con el fin de incrementar el contenido de carbono en la superficie pudiendo alcanzar valores hasta de 1,2 % C. Luego los ejes son sometidos al tratamiento térmico de temple para elevar la dureza de la superficie, generalmente en el intervalo de 58 a 65 HRC, por la formación de la microestructura martensita, quedando el interior blando, dúctil, por el bajo contenido de carbono inicial del acero con una dureza en el intervalo de 30 a 45 HRC. Finalmente, los ejes necesariamente deben ser sometidos al tratamiento térmico

de revenido a baja temperatura, para lograr eliminar o minimizar las tensiones internas producto de la formación de la martensita, de esta manera se consigue que no disminuya considerablemente la dureza, la microestructura se denomina ahora martensita revenida (Lajtín-Arzamásov, 1987). Con estos tratamientos se logra que los ejes adquieran las condiciones metalúrgicas y mecánicas más adecuadas para su buen desempeño en servicio.

No obstante que en la fabricación de ejes se toman en cuenta los diferentes principios y/o recomendaciones de diseño, lamentablemente en diversas ocasiones se presentan fallas, normalmente fracturas; estas se originan en puntos de concentración de esfuerzos que se clasifican en tres grupos:

- Heterogeneidades en la forma del eje derivadas del diseño: escalones por cambios de diámetro, orificios, esquinas abruptas, chaveteros, estrías, roscas, ranuras y ajustes a presión.
- Discontinuidades superficiales surgidas de la fabricación o por daño en servicio: hendiduras, picaduras, muescas, marcas de maquinado, de rectificado y de identificación, corrosión.
- Discontinuidades internas: porosidad, contracciones, inclusiones no metálicas, grietas y vacíos. Adicionalmente se tienen ensambles defectuosos, selección errónea de material, tratamientos térmicos incorrectos (ASM, 1986).

Un caso particular es la falla de un eje de piñón cónico de un tractor agrícola, eje motriz de la caja de velocidades que recibe la potencia del motor transmitiéndola al diferencial, y de este a las ruedas haciendo posible el movimiento del tractor. Este eje falló por fractura en menos de un año de servicio, con 9600 Km de recorrido, hecho por el cual se solicitó al Laboratorio de Metalografía y Tratamientos Térmicos (LMTT) estudiar el caso; los resultados del análisis de falla se presentan en este trabajo

## 2 Procedimiento experimental

Se realizó inicialmente la revisión general del estado en que se encontraba el tractor, y la recolección de muestras de la caja de velocidades averiada; así como recabar información sobre lo ocurrido en el momento de la falla y datos técnicos de la máquina (manuales). No se obtuvieron datos sobre la fabricación del eje y tratamiento(s) posterior(es). La falla del eje del piñón cónico se estudió utilizando las siguientes técnicas:

- Inspección visual, mediante observación directa y con ayuda de una lupa estereoscópica, marca Leica modelo Wild M3Z.
- Fractografía, mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), usando un equipo marca Hitachi, modelo S 2500.
- Metalografía, mediante microscopía óptica usando un microscopio marca Zeiss modelo Axiotech y MEB.
- Análisis químico, empleando espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDX).

- Ensayo mecánico de dureza, utilizando un durómetro universal marca Wolpert.
- Complemento del estudio con un análisis matemático utilizando la teoría de Mohr Modificada, del estado de esfuerzos a que fue sometido el eje en el momento de la falla, basados en los datos técnicos reportados en el manual de uso y mantenimiento del tractor.

## 3 Resultados y análisis

### 3.1 Inspección visual y fractografía

La Fig. 1 muestra el eje del piñón cónico fracturado, que posee aún ensamblado parte del cojinete de rodillos sobre el que se apoyaba y rotaba. Se observa que la falla ocurrió cerca del medio de la longitud, medida desde el borde izquierdo del piñón cónico. Las flechas señalan dos muestras seccionadas de un extremo del eje, la ubicada a la derecha posee la superficie de fractura que se utilizó para el estudio fractográfico y la de la izquierda para el metalográfico.

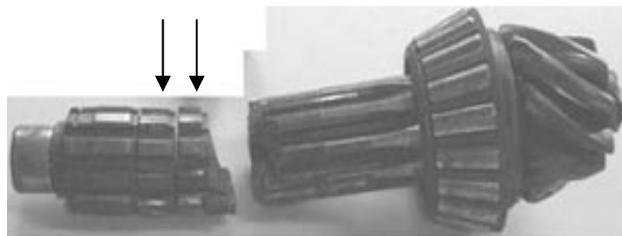


Fig. 1. Eje de piñón cónico fracturado

La Fig. 2 muestra las superficies de fractura de las dos partes del eje: (a) lado izquierdo y (b) lado derecho en la Fig. 1; las zonas claras y lisas señaladas con flechas se produjeron por el roce entre los extremos fracturados antes que la máquina fuese detenida. Se observan marcas paralelas como surcos que atraviesan las superficies, sin presencia de las llamadas marcas de playa típicas de falla por fatiga, indicativo que ésta no se produjo en este caso. Los surcos obviamente son producto de la formación y crecimiento de la grieta que condujo a la fractura, su forma es similar a la típica de rotura rápida, como se encuentra en otros tipos de ejes (ASM, 1986; Xiaolei y col., 2006).

Las Fig. 3 y Fig. 4 muestran en detalle la superficie de fractura en zonas cercanas al bode externo y en el interior del eje respectivamente. En la primera se observan granos pequeños con superficies lisas típicas del clivaje, junto a otros que adicionalmente poseen microescalones de deformación plástica, lo que indica que en esta zona se produjo cuasiclivaje. En la segunda (Fig. 4) se observan granos de mayor tamaño, la mayoría con superficies clivadas. Todo esto indica que la superficie de fractura del eje se caracteriza por tener tanto clivaje como cuasiclivaje, tal como se ha encontrado en aceros tratados térmicamente y otras aleaciones no ferrosas (ASM, 1987).

Sólo en algunas zonas cercanas al orificio central del eje, se encontró que la superficie tenía hoyuelos, típicos de fractura dúctil, como se muestra en la Fig. 5. Estos hoyuelos se ubican en los sitios más elevados de la superficie observada, lo que se correspondería con las cimas de los surcos antes citados. Toda esta situación aparentemente extraña para un eje de acero, se explicará adelante en la discusión junto con el resto de resultados.

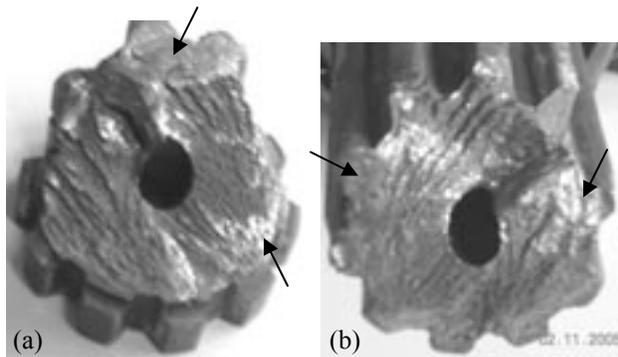


Fig. 2. Superficies de fractura del eje

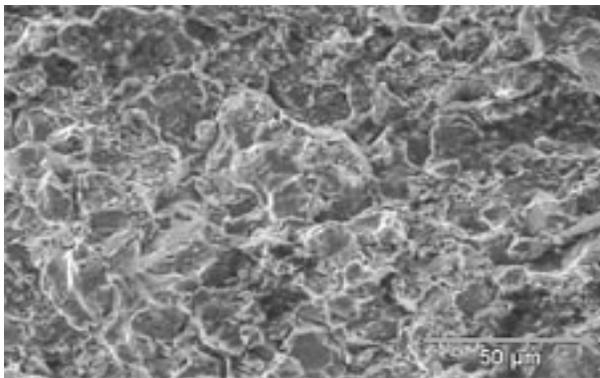


Fig. 3. MEB de la superficie de fractura, zona externa del eje

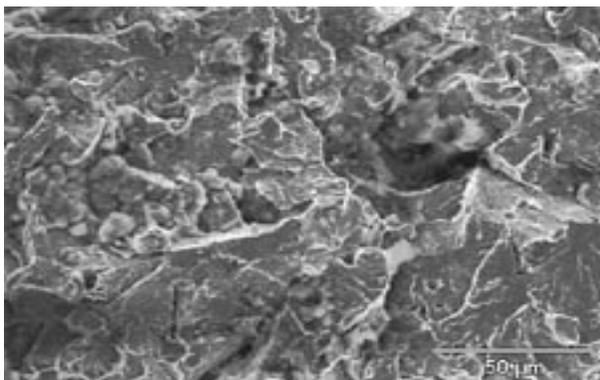


Fig. 4. MEB de la superficie de fractura, zona interna del eje

Por otra parte, al evaluar el posible origen y avance de la grieta, se constata que el eje posee de fábrica una ranura circular, a partir de la cual y desde la esquina del fondo de ella se desarrolla la superficie de fractura, atravesando el

eje con una inclinación tendiente a  $45^\circ$  hasta alcanzar el lado opuesto, tal como se observa en la Fig. 6. Aquí también se muestra que junto con la superficie de fractura (principal) antes estudiada, existen dos más pequeñas (secundarias) que surgen también desde la esquina del fondo de la ranura y se intersectan con la principal casi lateralmente con la superficie del eje, tal como se aprecia en el primer plano de la figura. En la Fig. 2a, parte derecha superior se observa la falta de material, que al desprenderse del eje generaron las superficies secundarias.

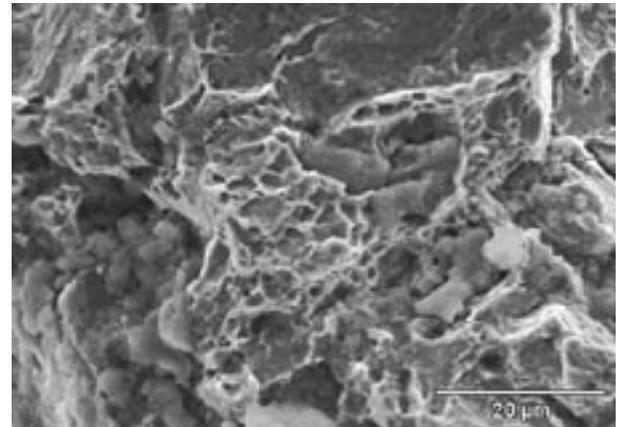


Fig. 5. MEB de superficie de fractura con evidencias de hoyuelos



Fig. 6. Vista de la ranura circular, inclinación de la superficie principal y las secundarias en primer plano

### 3.2 Metalografía

En la Fig. 7 se observa la muestra seccionada del eje, preparada para el estudio metalográfico. Se aprecia en 7a que el eje tiene 10 estrías donde encajan engranajes de la caja de velocidades, así como, que toda la superficie posee una capa oscura (revelada por la preparación metalográfica) de espesor promedio de 1,3 mm, lo que indica que posee un tratamiento superficial probablemente cementación, no obstante adelante se definirá concretamente. La franja radial oscura es la marca del orificio de lubricación que coincidió con el corte de la muestra. En la Fig. 7b se detalla la capa

externa que en general se caracteriza por su uniformidad a todo lo largo de la periferia del eje.

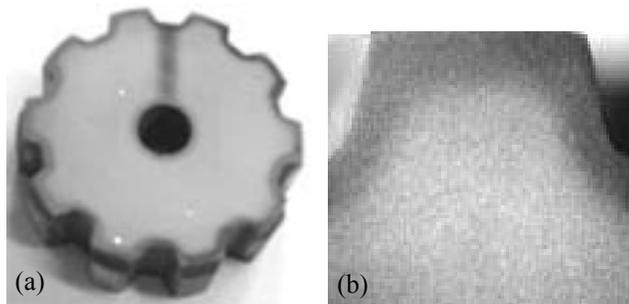


Fig. 7. Muestra de la sección transversal del eje: a) estrías con capa externa de tratamiento superficial, b) detalle de capa externa

La Fig. 8 muestra la microestructura presente en la capa externa del eje, esta es martensita fina lo que significa que el eje fue sometido al tratamiento térmico de temple y revenido tal como se recomienda teóricamente, por lo que sería realmente martensita revenida.

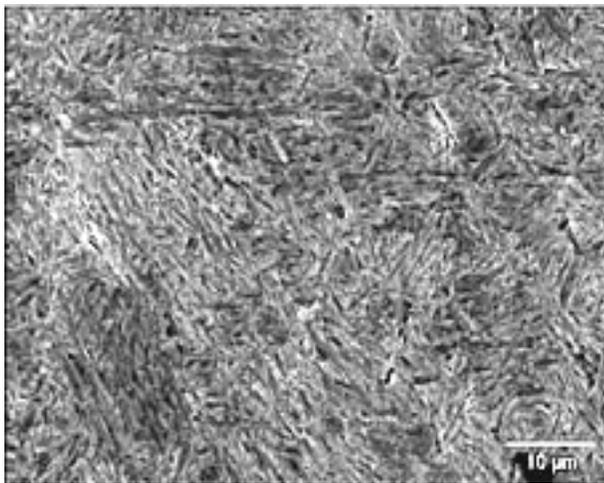


Fig. 8. MEB de la capa externa, se observa martensita revenida

La Fig. 9 muestra la microestructura en el interior del eje, esta también es martensita revenida pero más gruesa que la de la superficie, lo cual está en correspondencia con las microestructuras de las superficies de fractura, Fig. 3 y Fig. 4 para el exterior e interior del eje respectivamente. Este tipo de resultado se ha encontrado también en engranajes de cajas de velocidades que han fallado por rotura (Zhiwei y col., 2006) de manera equivalente a lo observado en el eje.

### 3.3 Composición química

La Tabla 1 da la composición química promedio, evaluada en diferentes puntos tanto en la zona oscura externa y en el interior del eje. Este análisis se realizó paralelamente durante el estudio metalográfico mediante MEB. Se des-

prende de la tabla que el eje de acero fue cementado, alcanzando en la superficie un contenido promedio de 1,00 %C, lo cual está dentro de lo especificado teóricamente, como también el acero original con promedio de 0,27 %C (interior del eje).

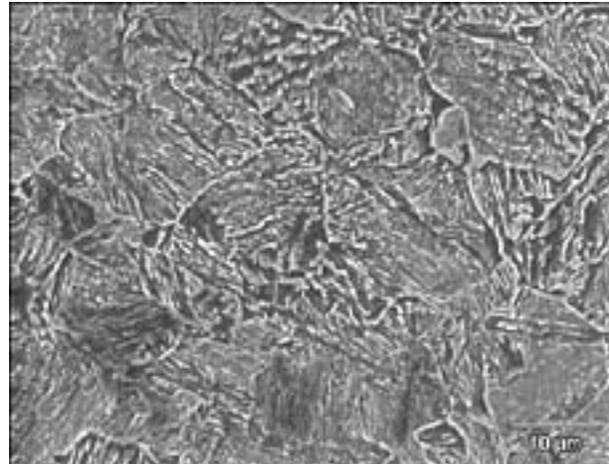


Fig. 9. MEB del interior del eje, se observa martensita revenida gruesa

Tabla 1. Composición química promedio (% en peso)

Elemento	C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe
Superficie	1,00	0,41	1,18	1,23	0,03	0,035	Resto
Interior	0,27	0,36	1,19	1,33	0,025	0,032	Resto

### 3.4 Dureza

Se determinó la dureza de la superficie y del interior del eje, siendo los valores promedios 63 HRC y 34 HRC respectivamente. Estos valores se encuentran dentro de las especificaciones teóricas, sin embargo el de la superficie está muy cercano al límite máximo.

## 4 Discusión

La mayoría de resultados presentan correlaciones lógicas esperadas, algunos otros se dilucidan aquí. Con respecto a los primeros se puede decir que el eje fue fabricado con un acero aleado de bajo contenido de carbono (0,27 %C) y fue sometido al tratamiento termoquímico de cementación, elevando el contenido de carbono en la superficie hasta el 1,00 %C. Posteriormente fue templado y revenido para suministrarle elevada dureza en la superficie (63 HRC). Hasta aquí todo está acorde con los principios teóricos recomendados para este tipo de elemento de máquina, sin embargo, la presencia de martensita revenida en el interior (centro) del eje no es lo esperado. Es obvio que el temple produjo hasta el interior la transformación de la austenita en martensita, lo cual es indicativo de una elevada templabilidad del acero. Determinando esta propiedad en base a la composi-

ción química se encuentra que el Diámetro Crítico Ideal (DCI), que mide la templabilidad, tiene un valor de 99 mm, el cual es 2,3 veces mayor que el diámetro externo real del eje (43 mm), esto explica la presencia de martensita revenida en el interior del eje.

La naturaleza metalúrgica y mecánica de la martensita determina que esta sea frágil, por esto se realiza el revenido. La martensita revenida presenta diferentes fenómenos metalúrgicos en dependencia de la temperatura a la cual se realizó el revenido. Es un hecho bien conocido que la martensita revenida puede presentar el fenómeno de fragilización a baja y media temperatura, debido a la transformación de la austenita retenida por el temple (entre las láminas de martensita) en carburos,  $M_3C$ , principalmente  $Fe_3C$ . La temperatura de este revenido es en general menor a 500 °C, ya que el fenómeno es distinto al que también puede ocurrir en la vecindad de esta temperatura (Bhadshia y col., 1979; Sarikaya y col., 1983; Kwon y col., 1988; Briant, 1989; Lee y col., 1989).

En el caso del eje estudiado, teóricamente se debió haber realizado el revenido a baja temperatura ya que solo se requiere eliminar o minimizar las tensiones internas producto del temple, manteniendo así elevada la dureza superficial. Los resultados fractográficos aquí presentados muestran clivaje y cuasiclivaje que es común a la fractura de aceros en los que ocurrió fragilización de la martensita revenida, reportada en los trabajos antes citados, particularmente existe gran similitud con los resultados de Sarikaya y col., debido a que uno de los aceros estudiado en este trabajo tiene casi igual contenido de carbono (0,26%) y elevados contenidos de manganeso (1,98%) y cromo (3.11%), como también los posee el eje; estos últimos elementos son los que definen la elevada templabilidad. Por otra parte, la inclinación de la superficie de fractura principal, tendiente a los 45°, es típico de fractura en materiales frágiles sometidos a torsión, como trabajan los ejes normalmente, en este caso la martensita revenida fragilizada hizo posible esta inclinación.

Aunado a lo anterior, la existencia de una ranura circular desde cuya esquina de fondo se extienden las superficies de fracturas (principal y secundarias), es un sitio de concentración de esfuerzos. La inspección detallada de la esquina del fondo de la ranura mediante análisis digital de imágenes (Leco IA 3001), resultó que tiene un radio de curvatura muy pequeño, cuyo valor es 487,75  $\mu\text{m}$  (0,48775 mm, aprox. 0,5 mm), tal como se muestra en la Fig. 10. Este pequeño radio de curvatura más la elevada dureza superficial del eje, junto con la existencia de martensita revenida fragilizada, en toda la sección transversal del eje, fue la causa para que bajo alguna condición de gran exigencia mecánica sobre el eje (arranque brusco del tractor, atascamiento de la ruedas y exigencia de giro, arrastre de cargas muy pesadas, etc), produjera una elevada concentración de esfuerzos en dicha esquina de la ranura, de magnitud tal que sobrepasó la resistencia del acero causando así la falla por fractura violenta, catastrófica, del eje de piñón cónico.

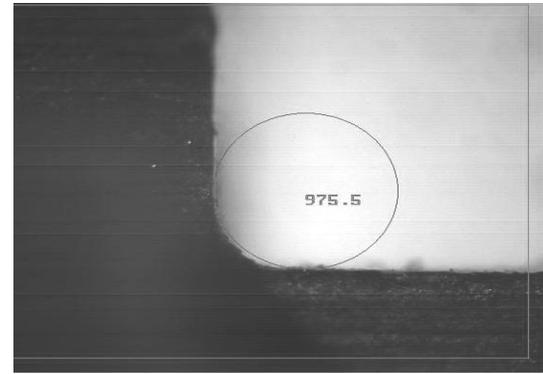


Fig. 10. Medida del radio de curvatura de la esquina del fondo de la ranura circular. Un círculo de 975,5  $\mu\text{m}$  ajusta en el fondo

## 5 Comprobación de la falla mediante la teoría de Morh modificada

Basados en la ausencia de señales de falla por fatiga y habiendo determinado que el material del eje es frágil, se utilizó la teoría de fallas preferida para materiales no uniformes frágiles bajo carga estática (Norton, 1999).

De acuerdo con los datos técnicos recopilados del manual del fabricante del tractor, se obtuvo la siguiente información:

Tabla 2. Características técnicas del tractor

Parámetros de la maquinaria	
Potencia Neta	58.8 KW
Torque en el cigüeñal	350 N.m/1600-1800 RPM
Torque en el eje de piñón cónico	1540 N.m/360RPM

El estudio de los esfuerzos en el eje fueron efectuados por medio de la siguiente ecuación (Shigley y Mischke, 2002):

$$\tau_{xy} = K_{ts1} K_{ts2} \left( \frac{Tr}{J} \right) \quad (1)$$

El uso de esta ecuación se basa en el hecho que el rodamiento cónico absorbe las cargas radiales y axiales originadas en el engranaje cónico hipoidal, tal como se muestra en la fig. 1.

El factor de concentración de esfuerzo en ranuras axiales  $K_{ts1}$  y el factor de concentración de esfuerzo en ranuras circulares  $K_{ts2}$ , se determinaron mediante las graficas de stress concentration factors (Peterson, 1984), cuyos valores fueron 3,8 y 3,0 respectivamente.

El radio  $r$  cuyo valor es de  $35,5 \times 10^{-3}$  m y el momento polar de inercia  $J = 1,56 \times 10^{-7}$  m<sup>4</sup>, son producto de la medición sobre la región de falla del eje. Sustituyendo en la ecuación 1 se obtuvo el siguiente resultado:

$$\tau_{xy} = 1997,58 \text{ MPa} = \sigma_1 = -\sigma_3 \quad (2)$$

Aplicando la teoría de Morh Modificada para el IV cuadrante y torsión pura.

$$FS = \frac{\sigma_{ut}}{\sigma_1} \quad (3)$$

A partir del valor de la dureza medida en la superficie del eje (63 HRC) y mediante tabla de conversión se determinó el valor correspondiente para  $\sigma_{ut}$  el cual fue de 2250 MPa. Sustituyendo en la ecuación 3 se obtuvo un valor del factor de seguridad en la zona de falla del eje.

$$FS = 1.1258$$

Tomando en cuenta que el diseño de elementos de máquinas con el uso de materiales considerados frágiles sugiere factores de seguridad que oscilen entre 2.5 a 8 dependiendo del criterio de diseño (Shigley y Mischke, 2002), se puede considerar que el factor de seguridad determinado para el eje de piñón cónico es considerablemente bajo, lo que indica que no se puede asegurar que funcione adecuadamente, ya que se corre el riesgo de falla tal como ocurrió.

## 6 Conclusiones

El eje de acero estudiado fue tratado térmicamente mediante cementación, temple y revenido.

El revenido, aunque se realizó a baja temperatura causó fragilización de la martensita revenida.

El acero del eje posee elevada templabilidad (DCI), que es 2,3 veces mayor que el diámetro real externo del eje.

Martensita revenida fragilizada se encontró en toda la sección transversal del eje, debido a la elevada templabilidad.

El eje de piñón cónico falló por fractura violenta, catastrófica.

La presencia de una ranura circular en el eje, con radio de curvatura pequeño en la esquina del fondo, junto con la elevada dureza superficial y martensita revenida fragilizada, hicieron posible la falla.

Matemáticamente se comprobó que la falla ocurrió por una elevada concentración de esfuerzos en la intersección de las ranuras, que superaron la resistencia última del acero.

## Agradecimiento

Al Laboratorio de Análisis Químico y Estructural de Materiales (LAQUEM), de la Facultad de Ciencias de La Universidad de Los Andes, por su colaboración en los estudios de MEB y EDX.

## Referencias

- ASM 1986, Failure analysis and prevention, Metals handbook, Ninth edition, Vol. 11, Metals Park, Ohio.
- ASM 1987, Fractography, Metals handbook, Ninth edition, Vol. 12, Metals Park, Ohio.
- Bhadeshia H y Edmonds D, 1979, Tempering martensite embrittlement: role of retained austenite and cementite, *Met. Sci.*, Vol. 13, pp. 325-334.
- Briant CL, 1989, Role of carbides in tempered martensite embrittlement, *Mater. Sci. Tech.*, Vol. 5, No. 2, pp. 139-147.
- Kwon H, Cha J y Kim C, 1988, The effect of grain size on fracture behaviour in tempered martensite embrittlement for AISI 4340 steel, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 100, No. 1-2, pp. 121-128.
- Lajtín Y y Arzamánov B, 1987, Tratamiento químico-térmico de los metales, Editorial Mir, Moscú.
- Lee S, Lee D y Asaro R, 1989, Correlation of microstructure and tempered martensite embrittlement in two 4340 steels, *Metall. Trans.*, Vol. 20 A, pp. 1089-1103.
- Norton R, 1999, Diseño de máquinas, Prentice Hall, México.
- Peterson R, 1984, Stress concentration factors, Wiley Interscience, United States.
- Ranganath V, Das G, Tarafder S y Das S, 2004, Failure of swing piñón shaft of a dragline, *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 11, pp. 599-604.
- Sarikaya M, Jhingan A y Thomas G, 1983, Retained austenite and tempered martensite embrittlement in medium carbon steels, *Metall. Trans.*, Vol. 14 A, pp. 1121- 1133.
- Shigley E y Mischke R, 2002, Diseño en ingeniería mecánica, Mc Graw Hill, México.
- Xiaolei X, Zhiwei Y y Hongxin, 2006, Failure analysis of a diesel gear-shaft, *Eng. Fail. Anal.*, (In Press).
- Zhiwei Y y Xiaolei X, 2006, Failure analysis of an idler gear of diesel engine gearbox, *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 13, pp. 1092-1100.