

Avance de estudios en mecánica de fractura y análisis de falla realizados en los laboratorios de metalurgia del Instituto de Ensayos e Investigación de la Universidad Nacional de Colombia

PALABRAS CLAVES: Falla, Fractura, Grietas, Tenacidad, Fatiga, Engranaje.

En este trabajo se reportan brevemente tres estudios en el área de fractura. En el primero mediante ensayos de tenacidad de fractura se encuentra que al reducir ligeramente la dureza a partir de 60 HRC no aumenta claramente la resistencia a la propagación inestable de grietas en acero AISI 01. Luego se presentan dos casos de análisis de falla por fatiga en que se sigue la secuencia de análisis: (a) observaciones de campo, (b) análisis macroscópico de fractura, (c) ensayos de dureza y examen microscópico, (d) cálculo de esfuerzos y (e) conclusiones y recomendaciones. Se concluye que en ambos casos la falla se debe a inusitada sobrecarga de operación.

HECTOR HERNANDEZ A.
Departamento de Ingeniería Mecánica,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

1. CONSIDERACIONES DE TENACIDAD DE FRACTURA EN EL TRATAMIENTO TERMICO DE TROQUELES PARA TRABAJO EN FRIO

Frecuentemente en troqueles se fabrican componentes con altos niveles de dureza cercanos a 60 HRC. Durante la fabricación o en servicio se pueden inducir grietas, las que reducen la capacidad de soporte de carga del componente. Ante la presencia de grietas con los altos niveles de dureza habituales en troquelaría la resistencia a la propagación inestable de grietas, en cuanto al material se refiere, la podemos medir como la tenacidad de fractura en estado de deformación plana, K_{IC} , la que en términos generales se encuentra que aumenta al disminuir la dureza. Pero al disminuir la dureza, por lo general disminuye la resistencia al desgaste.

En este trabajo se propone estudiar el efecto de reducir ligeramente la dureza (a partir de 60 HRC) en la resistencia a la propagación inestable de grietas, medida como tenacidad de fractura K_{IC} en acero AISI 01 (acero de consumo masivo local para fabricación de troqueles de trabajo en frío). Con este propósito, se han realizado ensayos de tenacidad de fractura referida a la dureza de tratamiento térmico de temple-revenido siguiendo los requerimientos de la norma ASTM E399, [2], figura 1.

Según los resultados de ensayos presentados en la figura 1, se concluye que la reducción ligera de dureza a partir de 60 HRC no conduce a un claro aumento de la tenacidad de la fractura, es decir no implica un aumento significativo de resistencia a la propagación inestable de grietas.

En efecto en falla prematura por fractura de punzones de troquelado de hojas de resortes, se aumentó la vida de los punzones incrementando la dureza, reduciéndose así esfuerzos de tracción inducidos por pequeña deformación plástica, sin un detrimento notorio de la tenacidad de fractura del acero.

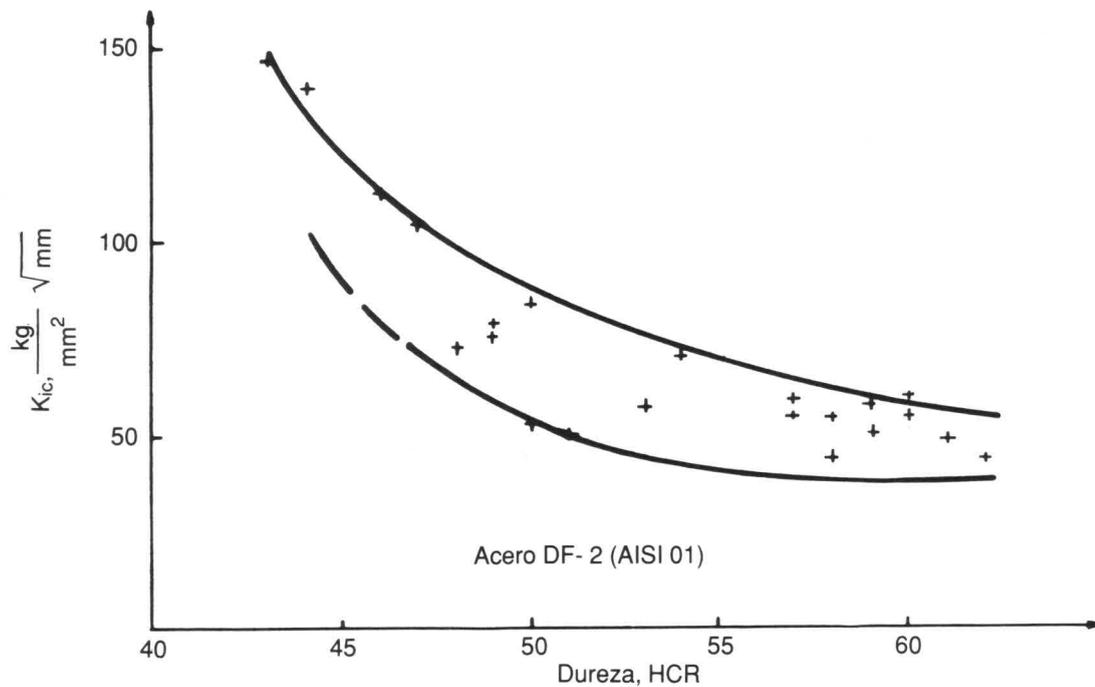


FIGURA 1. Tenacidad de fractura, KIC vs. Dureza, HRC, de temple-Revenido de acero DF-2 (01). Dirección de ensayo C-R.

ANÁLISIS DE FALLA DE DIFERENCIALES DE CAMIONES

Se trata del análisis de falla de diferenciales en camiones de 50 toneladas de transporte de materia prima, para fabricación de cemento, a planta de proceso.

a) Inspección visual

Se observaron condiciones adversas de operación como baches profundos y excesiva pendiente en la vía de circulación. En estos mismos vehículos se han presentado fracturas de chasis y tornillos.

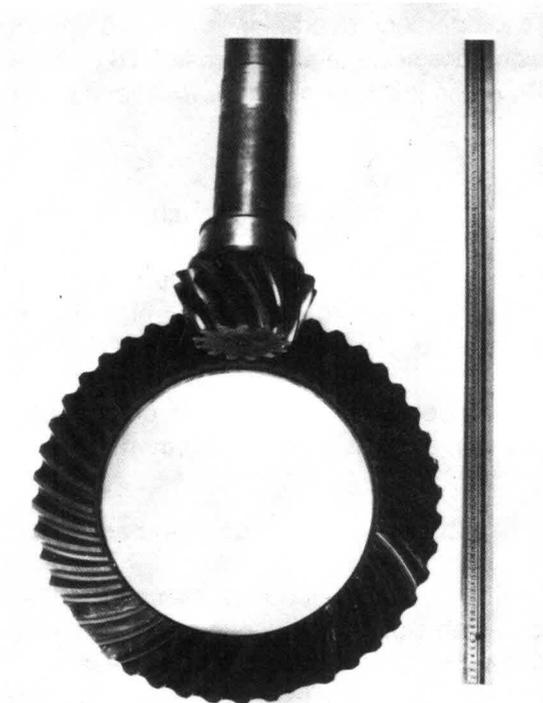
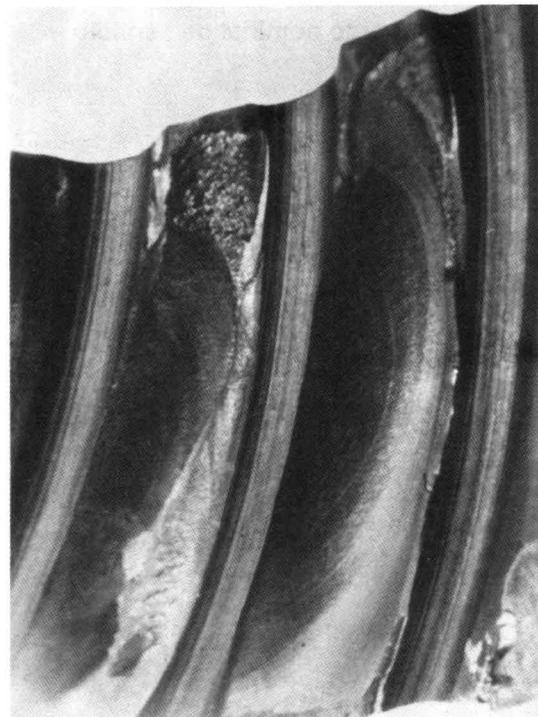


FIGURA 2. a) Diferencial con dientes fracturados.



b) Fractura por fatiga, son notorias las marcas de detención.

b) Análisis de fractura

Se trata de falla por fractura por pie de diente de diferencial cónico con dientes en espiral, figura 2 a. La morfología de la fractura presenta las características típicas de una fractura por fatiga: sitios de iniciación, zona de lenta propagación de grietas, marcas de detención y zona de fractura súbita final, figura 2 b. Los sitios de iniciación se encuentran hacia el centro de longitud de los dientes, siendo esto un indicativo de un buen alineamiento, puesto que no se encuentran defectos en particular en dicha área. Se observó un área de propagación de grietas entre un 50% y 70%, siendo esta característica un indicativo de relativos bajos niveles de esfuerzos nominales de operación.

c) Ensayos metalográficos de laboratorio

Se trata de engranajes cementados con una profundidad total de cementación de 1.95 mm y con el siguiente perfil de dureza en sección transversal a la altura de la circunferencia primitiva, a partir de la superficie de flanco:

	Superficie								núcleo
Distancia mm	0.00	0.12	0.75	1.35	1.95	2.55	3.17	3.80	4.42
Dureza, HRC	62	62	62	57	50	49	49	45	45

d) Esfuerzo nominal de servicio

Datos. Número de dientes:

rueda, $N_G = 44$; piñón, $N_p = 3$

Angulo de presión, $\phi = 20^\circ$.

Angulo de hélice, $\psi = 35^\circ$

Paso diametral, $P_d = 2$ (*).

Diámetro primitivo del piñón, $d = 6.5$ pulg.(*).

Ancho de diente, $F = 3.5$ pulg.

Torque máximo en piñón, $T = 1.747$ Lb-pie

Vida de falla = 5.000 horas de operación.

Período de inspección mínimo = 10.000 hr.

Número de fallas: 3 en 20 camiones.

*Medido en extremo mayor.

Siguiendo el procedimiento de cálculo consignado en

[3] y considerando operaciones con choque ligero, soportes rígidos se llega a que el esfuerzo de tensión calculado de servicio en la raíz de los dientes es de 16.6 Kg/mm².

e) Esfuerzo admisible

Para un paso diametral, $P_d = 2$; profundidad total de cementación de 1.95 mm y dureza superficial de 62 HRC, se encuentra un esfuerzo admisible de flexión en pie de diente de 21 Kg/mm². Para menos de una falla por cada 100, se encuentra entonces un esfuerzo de trabajo admisible en pie de diente de 21 Kg/mm², [3].

f) Conclusiones y recomendaciones

En vista de la relativa alta proporción de área de propagación estable de grietas y que el esfuerzo nominal de servicio es menor que el admisible de trabajo y teniendo en cuenta las condiciones adversas con que se estaban operando estos camiones, se considera que las fallas

fueron provocadas por inusitadas cargas elevadas de operación que han conducido a iniciación prematura de grietas.

Se recomienda:

1. Mejorar el estado de la vía reduciendo al mínimo la presencia de baches y suavizando la pendiente del terreno en cuanto sea posible.
2. Control riguroso del peso de la carga transportada.
3. Reducir el período de inspección en otros camiones que se encontraban en operación, puesto que en estos se pueden tener grietas en vía de propagación.

3. ANALISIS DE FALLA DE UNIDAD DE MANDO FINAL DE CARGADOR DE MINERALES PARA FABRICACION DE CEMENTO

Se trata de establecer el origen de una serie de daños: engranajes, rodamientos y portaplanetario, de unidad de mando hidráulica.

a) Inspección visual

Se observó el equipo en el sitio de operación encontrando, con ayuda de tintas penetrantes, grietas en vía de propagación en zonas críticas del chasis y en portapla-

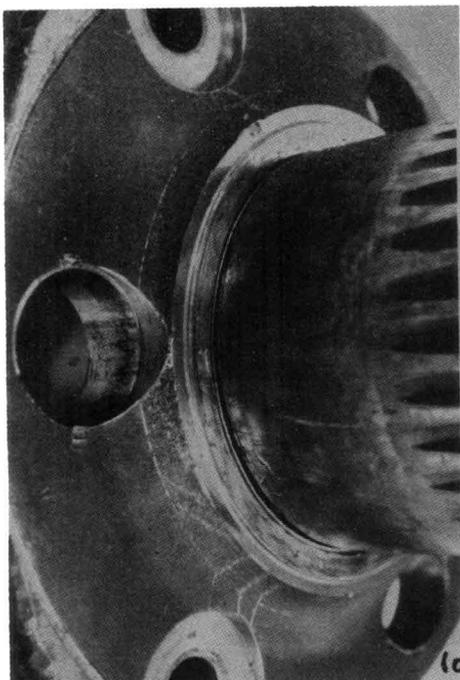


FIGURA 3. a) Fractura transición araña-espigo.

netario de otras unidades de mando del mismo equipo, en la transición araña-espigo, figura 3(a).

b) Análisis macroscópico de fracturas

En los engranajes se observaron marcas radiales características de fracturas súbitas y deformación plástica donde se encontraron fragmentos de bronce provenientes de las canastas de los rodamientos, mientras que en el portaplanetario, en la transición araña-espigo, se observó una fractura de fatiga con sitios de iniciación en la circunferencia de enlace y un área de propagación subcrítica de grietas aproximadamente del 45%. Figura (3)b.

c) Análisis químico, ensayos de dureza y observación metalográfica

Según las observaciones anteriores, se concluye que el origen de los daños está en falla por fatiga del portaplanetario, encontrándose las siguientes características de este componente:

Composición química: 0.5% C, 1.3% Cr, 0.17% Mo, 0.65% Mn, 0.37% Si.

Estructura: Martensita revenida, Dureza: 30 HRC.

Tratamiento Térmico: Temple-revenido.



b) Fractura, son visibles las marcas de trinquete características de varios sitios de iniciación de grietas en periferia.

d) Balance de esfuerzos

Datos. Diámetro exterior = 170 mm.

Diámetro interior = 90 mm.

Torque, $T = 10.000 \text{ N.m}$

RPM de entrada = 2800

Radio de enlace = 2 mm.

Número de fallas = 2

Vida de falla = 4000 h.

Tiempo mínimo de inspección = 10.000 h.

Según código ASME para cálculo de esfuerzos por torsión, de acuerdo a la dureza, 30 HRC y teniendo en cuenta efectos de concentración de tensiones, se tiene un esfuerzo cortante admisible de 9.5 Kg/mm^2 , mientras

que el esfuerzo cortante nominal de operación, calculado con un factor de choque y fatiga de 3, es de 3.5 Kg/mm^2 .

e) Conclusiones y recomendaciones

Se concluyó que esta falla se debió a inusitada elevación de esfuerzos de operación, y se ha recomendado:

- 1) operación suave del equipo para reducir la amplificación de esfuerzos por carga dinámica de choque,
- 2) reducir la severidad de concentración de tensiones donde se inicia la fractura (enlace araña-espigo) y
- 3) reducir los períodos de inspección, con ayuda de tintas penetrantes, para detectar grietas en etapa de propagación tal que no se produzcan mayores daños.

Referencias Bibliográficas

1. Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, 3 ed., Martinus Nijhoff, 1982.
2. "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials" ASTM Annual Book of Standards, Part 10, ASTM, E 399-81, 1981.
3. M. Howes, Source Book on Gear Design, Technology and Performance, ASM, 1980.
4. H. Hernández, Criterios de Diseño con Tolerancia de Daño-Prevención de Fallas Catastróficas. INACERO, Boletín 19, 1986.
5. M. Kanninen, Advanced Fracture Mechanics, Oxford University Press, 1985.