

Efectos del TRATAMIENTO TERMICO en la Fractura de Aceros

Héctor Hernández A.

Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería
Mecánica, Universidad Nacional

INTRODUCCION

Frecuentemente la fractura de un elemento estructural está asociada a la presencia de una discontinuidad. Los esfuerzos límites de fractura son afectados por parámetros geométricos de la discontinuidad, naturaleza y tipo de carga, y propiedades mecánicas del material.

En este trabajo se estudia el efecto del tratamiento térmico de temple-revenido de los aceros en los esfuerzos límites de falla por fractura para carga de tracción estática y carga de fatiga uniaxial del ciclo simétrico con la presencia de una entalla severa. Para las condiciones de ensayo empleadas en este estudio, con carga estática se encuentra que entre 32 y 43 HRC, una entalla no afecta significativamente el esfuerzo de fractura en relación con la resistencia a la tracción; mientras que para una dureza de tratamiento térmico mayor que 43 HRC, el esfuerzo nominal de fractura tiende a disminuir al aumentar la dureza. Para una carga de fatiga con entalla severa, al aumentar la dureza entre 32 y 54 HRC, sólo se tiene la tendencia a un aumento ligero del esfuerzo de fractura. En los estudios de tenacidad se encuentra que al aumentar la dureza disminuye la tenacidad de fractura lo cual se traduce en que al aumentar la dureza disminuye el tamaño de la zona de propagación de grietas por fatiga, haciendo más difícil la detección de grietas de tamaño subcrítico.

RESUMEN

No obstante de los avances logrados en otros tipos de aleaciones, los aceros se siguen utilizando en forma extensiva en la construcción de elementos estructurales, porque con una adecuada selección y tratamiento técnico, los aceros permiten obtener una conveniente combinación de propiedades mecánicas ante unas exigencias específicas de servicio.

La fractura en elementos de máquinas frecuentemente se encuentra asociada a una discontinuidad, la cual provoca una concentración de esfuerzo, lo que puede originar sitios de iniciación de una falla por fractura. La carga límite de fractura es afectada por parámetros geométricos, naturaleza y tipo de carga y propiedades mecánicas del material.

La mayoría de fallas por fractura de elementos de máquinas son fallas por fatiga; por lo general una fractura por fatiga tiene lugar por una progresiva generación y crecimiento de grietas hasta obtenerse una condición crítica de fractura súbita de la sección residual resistente. Frecuentemente en una fractura por fatiga se observan marcas de playa como se ilustra en la Figura 1, las cuales son evidencias de la posición del frente de grietas antes que se alcance la condición de fractura súbita final.

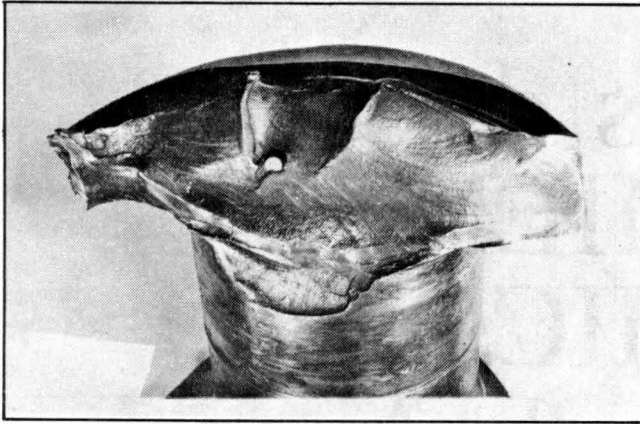


Figura 1. Marcas de playa en fractura por fatiga de cigueñal.

En este trabajo se muestra como el tratamiento térmico de temple y revenido de los aceros afecta el esfuerzo límite de falla por fractura para carga de tracción estática y carga de fatiga uniaxial con la presencia de una entalla severa. También se estudia el efecto del tratamiento térmico en la tenacidad de fractura, propiedad que cuantifica la resistencia al crecimiento súbito de una grieta bajo carga estática.

DISCONTINUIDADES EN LA RESISTENCIA A LA FRACTURA

Frecuentemente en elementos estructurales se encuentra discontinuidades las cuales conducen a un estado complejo de esfuerzos cerca de la discontinuidad con esfuerzos locales altos, donde justamente se puede iniciar una fractura, Figura 2.

Para el caso considerado en Figura 2, se demuestra que el esfuerzo elástico máximo en los extremos del eje mayor de la discontinuidad es dado por:

$$\sigma_{max} = \sigma_n [1 + 2\sqrt{a/r}] \tag{1}$$

- Donde σ_{max} = esfuerzo máximo en los extremos del eje mayor
- σ_n = esfuerzo nominal aplicado
- a = semieje mayor
- r = radio de curvatura en los extremos de la perforación.

Se define como factor elástico de concentración de esfuerzo K_t a la relación entre el esfuerzo elástico máximo y el esfuerzo nominal en la sección neta, $K_t = \sigma_{max}/\sigma_n$. Donde el esfuerzo nominal se calcula sin tener en cuenta el efecto de concentración de esfuerzo.

Los esfuerzos entorno de una discontinuidad pueden ser de tal magnitud que provoquen una deformación plástica produciéndose una redistribución de esfuerzo como se ilustra en la Figura 2. (b). Entonces en lo que concierne a una falla por fractura por carga estática la carga límite de falla es influenciada tanto por la geometría de la discontinuidad como por comportamiento de material. Para un material que ofrezca un comportamiento dúctil se puede presentar una redistribución conveniente de esfuerzos por deformación plástica tal que la carga de falla solo se vea afectada en

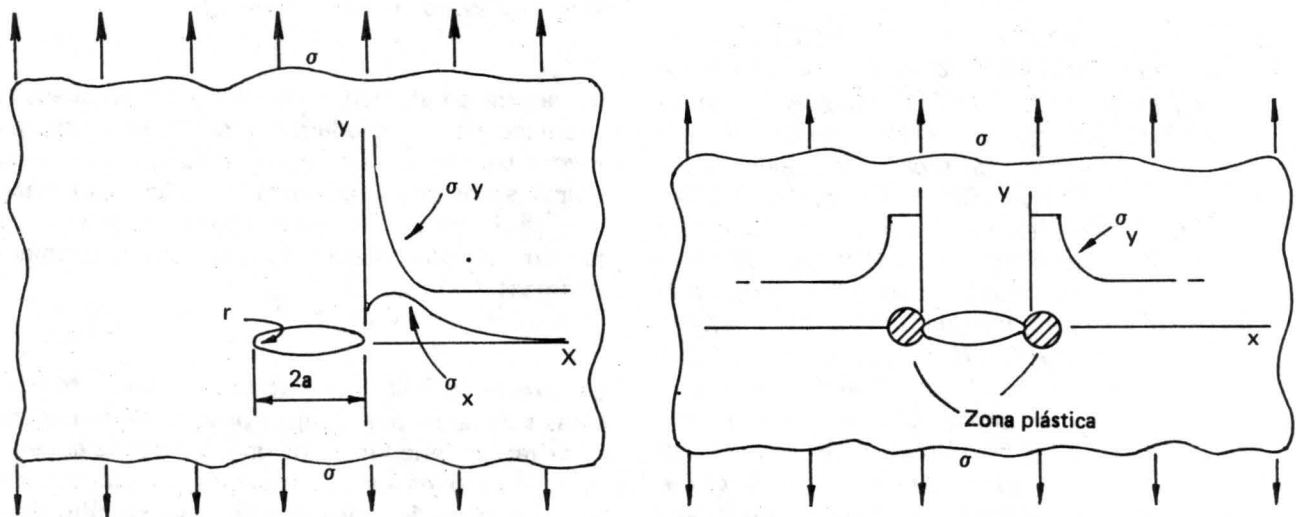


Figura 2. Ilustración esquemática de: (a) distribución de esfuerzos elásticos en una placa delgada infinita con una perforación elíptica sometida a una carga simple de tracción, (b) redistribución del esfuerzo σ_y por deformación plástica.

una mínima proporción en relación con la carga de falla libre de discontinuidades; en cambio con un material con comportamiento frágil la presencia de una discontinuidad puede reducir ostensiblemente la carga de falla.

El tipo de carga también influye en el efecto de una discontinuidad en la carga de falla por fractura, así es como con una carga de fatiga aún con un material dúctil la carga de falla se puede reducir significativamente por la presencia de una discontinuidad.

Para cuando se presenta una discontinuidad tipo grieta en aceros de alta resistencia el esfuerzo nominal de falla por crecimiento súbito de grieta, usualmente es controlado por la tenacidad de fractura de tal manera que:

$$\sigma_f = \frac{K_C}{Y\sqrt{\pi a}}$$

Donde K_C = tenacidad de fractura
 a = tamaño de grieta
 y = factor adimensional que depende de parámetros geométricos, forma y tamaño de grieta.
 σ_f = esfuerzo nominal remoto de falla

PROPIEDADES MECANICAS EN LA RESISTENCIA DE FRACTURA

En general se sabe que en los aceros para maquinaria se pueden modificar las propiedades mecánicas mediante el tratamiento térmico de temple-revenido. En términos generales se encuentra que al aumentar los niveles de resistencia a carga estática disminuye la capacidad de deformación plástica, de tal forma que cuando se tiene la presencia de una discontinuidad un aumento de resistencia no necesariamente conduce a un aumento de capacidad de soporte de carga ante la falla por fractura por carga estática.

Con una carga de fatiga se puede presentar una fractura con un esfuerzo fluctuante menor que la resistencia última o resistencia a fluencia bajo carga estática. En aceros de temple revenido se encuentra que la resistencia a la fractura por fatiga con la presencia de una entalla no severa tiende a reducirse por un factor igual al factor elástico de concentración de esfuerzo respecto a la resistencia a la fatiga sin presencia de discontinuidades.

En general en los aceros comunes de temple-revenido se ha observado una relación inversa entre la tenacidad de fractura y la resistencia a la tracción. Para mejorar simultáneamente estas dos propiedades se encuentra que se debe reducir el contenido de elementos que reducen la tenacidad tal como el azufre en los aceros o con un refinamiento microestructural, con el cual se encuentra que aumenta tanto la tenacidad como los niveles nominales de resistencia.

ENSAYOS DE FRACTURA

Para estudiar la influencia del tratamiento térmico de un acero en la resistencia a la fractura ante carga estática y carga de fatiga cuando está presente una discontinuidad se han realizado ensayos de fractura en barras de sección circular con una discontinuidad en forma de entalla severa tipo tringular, Figura 5, para la cual se encuentra un factor teórico de concentración de esfuerzo 4.5.

Como material de trabajo se seleccionó el acero AISI 4140 de fabricación nacional y de uso masivo en la construcción de elementos de máquinas. Se maquinaron las probetas por métodos convencionales y se sometieron al tratamiento térmico de temple en baño de sales a una temperatura de 840°C con un tiempo de sostenimiento de 12 minutos y luego se templaron en aceite, enseguida se sometieron al tratamiento de revenido a las temperaturas indicadas en la tabla 1 por un tiempo de dos (2) horas.

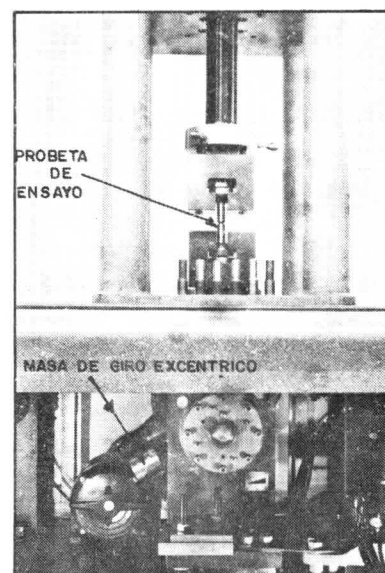


Figura 3. Montaje de ensayos de fatiga. Una masa excéntrica que gira a 1800 rpm genera en la probeta una fuerza cíclica sinusoidal.

Se realizaron los ensayos de fractura a carga estática de tracción y a carga de fatiga uniaxial de ciclo simétrico para una vida de 10^6 ciclos de esfuerzo obteniéndose los resultados consignados en la Tabla 1. La resistencia a la fractura se cuantifica como el esfuerzo nominal de falla en el núcleo de la entalla, $\sigma = F/A$, donde F es la fuerza de falla y A es el área de la sección transversal en el núcleo de la entalla.

Temperatura reventa °C	Dureza HRC	Esfuerzo nominal de fractura			
		Carga estática kgf/mm ²		Carga de fatiga para una vida de 10^6 ciclos kgf/mm ²	
200	54	37, 39	11, 14	19	
250	53	43			
300	50	47	11.5, 14	23	
320	48	72			
350	47	101, 134			
400	47	58	10, 10	12.5	
450	43	163, 160			
480	42	160			
500	42	101, 134			
520	40	147	10.2, 11.5	11.5	
550	37	156	16.5, 16.5	17.8	
600	38	150			
650	33	136, 126	11.4, 8.9	10.2	
Entrega(*)	32	135	12.7, 11.4	14	
Entrega(*)	30		11.8, 10.2	10.2	

TABLA 1. Esfuerzo nominal de fractura en sección reducida (*) Bonificado.

También se realizaron ensayos de tenacidad de fractura siguiendo el procedimiento recomendado por la norma ASTM E-399 y cumpliendo con los requerimientos de tenacidad de fractura para deformación plana. Se empleó una probeta de forma de disco compacto con entalla aguda a partir de la cual se genera una grieta por fatiga, Figura 4. Luego cada probeta, una vez tratada térmicamente, se somete a una carga de tracción progresivamente creciente hasta obtener la carga iniciación de crecimiento de grieta a partir de la cual se calcula la tenacidad de fractura K_{IC} . En la tabla 2 se dan los valores de tenacidad de fractura encontrados experimentalmente, como también el tamaño crítico de grieta de falla por crecimiento súbito de grieta calculado a partir de la ecuación (2) para $Y = 1.0$, $K_C = K_{IC}$ y un esfuerzo aplicado de $\sigma_f = 0.2\sigma_U$, donde σ_U es la resistencia a la tracción.

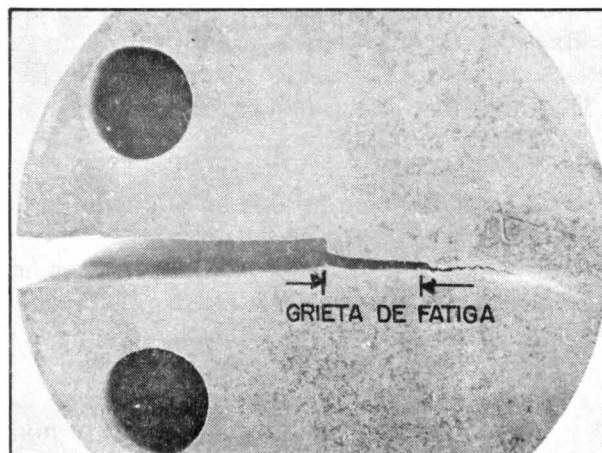


Figura 4. Probeta de ensayo de tenacidad. Se observa de izquierda a derecha entalla, grieta de fatiga y crecimiento de grieta en el ensayo de tenacidad de fractura.

TABLA 2. Tenacidad de fractura en relación con la temperatura de revenido de acero AISI 4140. Temperatura de temple = 840°C.

Temperatura de revenido °C	Dureza HRC	Resistencia a tracción σ_U , kgf/mm ²	Tenacidad de fractura, K_{IC} kgf√mm/mm ²	Tamaño crítico de grieta, a_c mm
200	53	188	136	4.2
300	49	167	148	6.2
350	45	153	154	8.1
400	40	130	214	21.6
Entrega	31	102	262	52.5

DISCUSION DE RESULTADOS

En la Figura 5 se presentan los resultados experimentales en forma gráfica con el fin de facilitar un análisis general. En esta figura se presenta en el eje de las abscisas la dureza de tratamiento térmico y en el eje de las ordenadas la resistencia a la fractura calculado como el esfuerzo nominal de fractura en el núcleo de la entalla.

En general se observa que la resistencia a la fractura por carga estática es mayor que la resistencia a la fractura por carga fluctuante de fatiga. La fractura con carga estática es repentina una vez que se aplica la carga crítica de falla, mientras que la fractura por fatiga tiene lugar bajo carga cíclica sostenida después de 10^6 ciclos de esfuerzo.

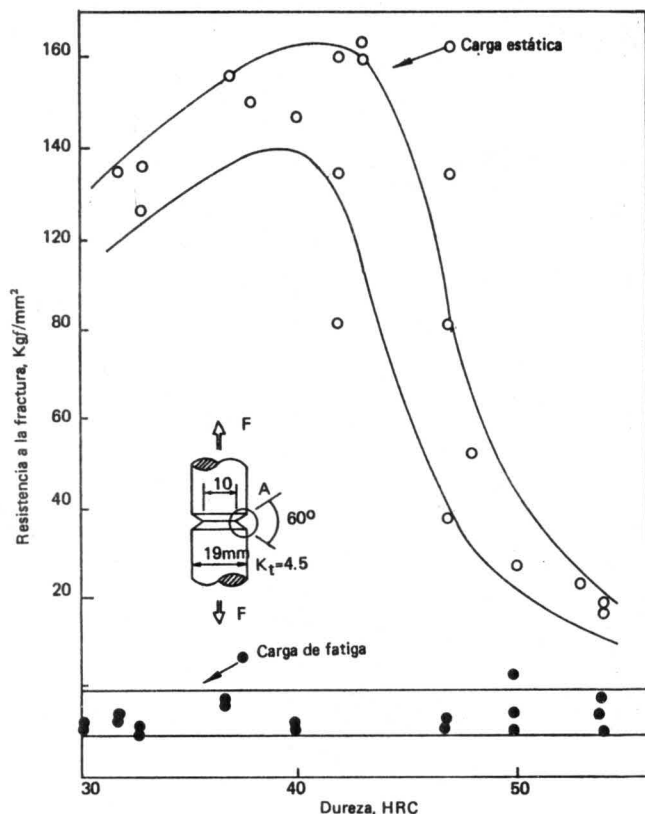


Figura 5. Efecto de la dureza de tratamiento térmico en la resistencia a la fractura. Radio de raíz de entalla = 0,2 mm.

La resistencia a la fractura por fatiga solo tiende a aumentar ligeramente con el aumento de dureza de temple-revenido. Este comportamiento se considera que se debe a que la discontinuidad por ser una entalla particularmente aguda, al aumentar la dureza aumenta la reducción de la resistencia a la fatiga por la presencia de la discontinuidad, esto conduce a reducir el aumento de la resistencia a la fatiga del material que se puede obtener por el aumento de dureza.

Para carga estática se observa dos intervalos de dureza de comportamiento diferente: (a) entre 32 y 43 HRC se cuenta que al aumentar la dureza y en efecto al aumentar la resistencia a la tracción del acero, aumenta la resistencia a la fractura, (b) entre 43 y 54 HRC se observa que al aumentar la dureza tiende a disminuir la resistencia a la fractura. Este comportamiento se considera que se debe a que en el caso (a) el material tiene suficiente capacidad de deformación plástica para lograr una más conveniente distribución de es-

fuerzos antes de la fractura, mientras que, en el caso (b) la reducción de la ductilidad al aumentar la dureza, es tal que se reduce el relevo de los picos de esfuerzo por deformación plástica, lo que se traduce en una caída de esfuerzo de rotura al aumentar la dureza.

Tanto con carga estática como con carga de fatiga se observa una dispersión significativa del esfuerzo de fractura respecto a la dureza, se considera que esto se debe a variaciones tanto de detalles metalúrgicos y geométricos como de alineamiento de carga.

En la tabla 2 se observa que al aumentar la dureza de tratamiento térmico disminuye la tenacidad de fractura disminuyendo el tamaño crítico de grieta de falla por crecimiento súbito e inestable de grieta, es decir que el acero se hace menos tolerante a la presencia de defectos tipos grieta, entonces en el caso de una fractura por fatiga la zona de crecimiento estable de grieta para una dureza baja es mayor que para una dureza alta, lo cual se traduce en que para una dureza baja es más fácil detectar una grieta antes que ésta alcance el tamaño crítico de fractura súbita final.

Los niveles mayores de resistencia a la fractura en los ensayos a carga estática se encuentran aproximadamente entre 39 y 43 HRC, Figura 5. Es interesante observar que según norma ASTM de pernos y tornillos, el grado de mayor resistencia, ASTM A574, especifica una dureza en el núcleo entre 39 y 45 HRC.

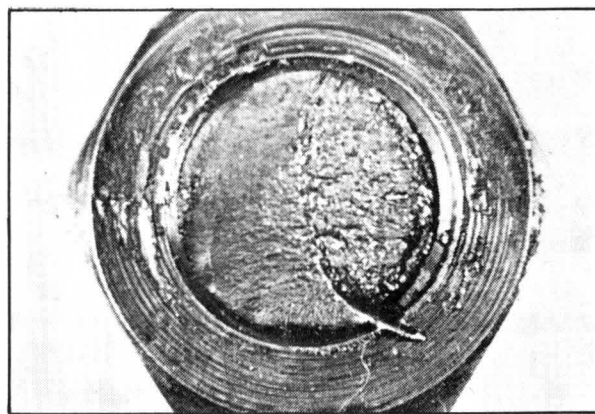


Figura 6. Fractura por fatiga de perno de acero AISI 4140 con dureza 31 HRC. Se observa una zona suave de crecimiento estable de grieta considerable.

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra que el efecto de una discontinuidad en la resistencia a la fractura es influen-

ciado tanto por el tipo de carga como por las propiedades mecánicas del material, las cuales en los aceros son controladas por tratamiento térmico.

Para todos los valores de dureza de tratamiento térmico se encuentra que la resistencia a la fractura por carga de fatiga es menor que la resistencia a la fractura por carga estática, este evento es consistente con el hecho que frecuentemente las fracturas en elementos de máquinas tiene lugar por fatiga. Con una carga de fatiga aún con un esfuerzo nominal relativamente bajo se puede presentar una falla por fractura, de aquí que en las fracturas por fatiga de servicio usualmente se presente una zona de propagación subcrítica de grietas.

En los ensayos de fatiga en este trabajo se ha tomado como vida de referencia 10^6 ciclos, para una vida mayor podría bajar aún más el esfuerzo de falla. Por otra parte se ha usado como discontinuidad una entalla aguda, para entallas menos severas se espera que aumente la resistencia a la fractura por fatiga.

Un acero puede tener la suficiente ductilidad para que una discontinuidad no reduzca significativamente la resistencia a la fractura estática, pero cuando el acero ofrece un comportamiento frágil (alta dureza) la presencia de una discontinuidad reduce ostensiblemente la resistencia a la fractura estática.

Para un acero de alta resistencia al aumentar la dureza de tratamiento térmico de temple-revenido, disminuye la tenacidad de fractura disminuyendo el tamaño de grieta crítica de fractura súbita final, lo cual puede hacer más difícil la detección de una grieta de tamaño subcrítico.

BIBLIOGRAFIA

J.A. Collins, Failure of Materials in Mechanical Design, John Wiley, 1981.

Boresi/Seely, Advanced Mechanics of Materials, John Wiley, 3 edición, 1978.

R.C. Juvinall; Stress, Strain and Strength, McGraw-Hill, 1967.

R.W. Hertzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley, 1976.

G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, 3 edición, 1986.

Oscar J. Horger, Metals Engineering Design, ASME Handbook, 2 Edición, 1965.

Metals Handbook, Vol. 11 Failure Analysis and Prevention, ASM, 8 Edición, 1986.

ASTM E-466-82, Standard Practice for conducting constant Amplitude Axial Fatigue test of Metallic Materials, ASTM, 1982.

Grossman/Bain, Principios de tratamiento térmico, Editorial Blume, 1964.

A.F. Madaayag, Metal Fatigue; theory and design, Ed. John Wiley, 1969.

OJO AL LIBRO

LIBROS POR APARECER

El taller de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional se permite anunciar la reedición de los siguientes títulos:

◆ ESTRUCTURA DE CONCRETO I
Ing. Jorge Segura Franco

◆ NOCIONES GEOLOGICAS BASICAS SOBRE ROCAS
PARA INGENIEROS
Ing. Armando Celis Caldas

◆ APUNTES DE CLASE Y PROBLEMAS RESUELTOS
DE ANALISIS ESTRUCTURA I
Ing. Fernando Spinel Gómez

HIDRAULICA EN LAS EDIFICACIONES
Ing. Armando Granados