

APLICACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN EL DISEÑO DE ELEMENTOS MECÁNICOS

Henry Hernando Suárez Soler
Ingeniero Mecánico, Maestría en Ingeniería de Materiales y Procesos,
Universidad Autónoma de Colombia. hhss257@gmail.com

Recibido: 5-12-2008, aceptado 15-06-2009, versión final: 15-06-2009

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la tenacidad de fractura para aceros con 0,4% de C, de acuerdo con la norma ASTM E399 y se muestran algunos ejemplos de aplicación en el diseño de elementos mecánicos.

Palabras claves: tenacidad de fractura, crecimiento de grieta, fractura frágil, intensidad de esfuerzo.

ABSTRACT

This paper presents the results of fracture toughness for steels with 0.4% of C, according to ASTM E399 and are examples of application in the design of mechanical elements.

Keywords: fracture toughness, crack growth, brittle fracture, stress intensity.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas de los materiales están influenciadas por muchos factores, como la presencia de poros, huellas de maquinado, impurezas, esfuerzos residuales, etc., que en la mayoría de los casos bajo la acción de cargas desencadenan la formación de grietas, las cuales, presentan un avance lento inicialmente, pero, después de alcanzar un tamaño crítico, se desarrolla un crecimiento inestable de alta velocidad que da origen a una fractura súbita, de características similares a las de un material frágil.

Inicialmente, el estudio de la fractura frágil se centraba en una evaluación de la resistencia cohesiva teórica entre los átomos, pero después de numerosas pruebas realizadas se observó que en realidad los materiales de ingeniería presentaban esfuerzos de fractura considerablemente inferiores (hasta 1000 veces) a los teóricos, este comportamiento se explica por la presencia de grietas (Dieter, 1986)

La primera aproximación a la discrepancia entre la resistencia a la fractura teórica y real fue

propuesta por Griffith, quien consideró que un material frágil contiene una cantidad de finas grietas que actúan como concentradores de esfuerzos de suficiente intensidad, de manera que se alcanza la resistencia cohesiva teórica en regiones localizadas, donde el esfuerzo nominal es muy inferior al teórico. Cuando una de las grietas se extiende, se produce un incremento en el área superficial de los lados de la grieta, esto significa que se requiere energía para vencer la fuerza cohesiva entre los átomos. Griffith estableció que "una grieta se propagará cuando el decrecimiento en energía de deformación elástica sea, al menos, igual a la energía requerida para crear una nueva superficie de grieta" (Dieter, 1986). Este criterio se puede utilizar para determinar la magnitud del esfuerzo de tensión que causará la propagación inestable de una grieta, desde un tamaño determinado hasta una condición de fractura frágil.

En los últimos años, se aprovechan los programas especializados de modelamiento, para realizar investigaciones relacionadas con el crecimiento inestable de las grietas. a partir de diferentes geometrías y condiciones de trabajo (Castillo, Yopez y Rodriguez, 2007).

En este trabajo se presentan los resultados del estudio experimental realizado a los aceros AISI 4340, 9840, 4140 y 1040, para calcular el valor de tenacidad de fractura, de acuerdo con la metodología propuesta en la Norma ASTM E399. Además, estos datos se utilizan para predecir la carga límite de falla en un material al que se le generó una imperfección geométrica, con el objetivo de comparar dicho resultado con el correspondiente al que se obtiene utilizando los criterios normales de diseño que tienen en cuenta los factores de concentración de esfuerzo.

2. MECÁNICA DE FRACTURA

La presencia de cualquier tipo de discontinuidad en un cuerpo, ocasiona una distribución de esfuerzos no uniforme en la vecindad de la misma, esto significa que ocurre una concentración de esfuerzo en dicha región, que se expresa en términos de un factor teórico que depende de la configuración geométrica del elemento

(Shigley y Mischke, 2002), (Rodríguez, Coronado y Anzola, 2006).

Por lo general, el uso de los diferentes factores aplica cuando el material trabaja en la zona elástica y para imperfecciones que se puedan medir con relativa facilidad. Sin embargo, cuando el tamaño de los defectos es muy pequeño (una grieta por ejemplo), estos factores resultan inútiles debido a que en el borde el esfuerzo adquiere valores extraordinarios.

Se propuso que el esfuerzo local cerca de una grieta depende del producto del esfuerzo nominal y la raíz cuadrada de la media longitud de la fisura, esta relación se llama Factor de Intensidad del esfuerzo (Campbell, Gerberich, Underwood, 1982), (M. Gosz; B. Moran 1998), (Alshoabi, Abdunaser; Ariffin, Ahmad, 2006). Para una barra con muesca circunferencial, cargada axialmente, se define como:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot D} \cdot f\left(\frac{d}{D}\right) \quad (1)$$

En esta ecuación el factor $f(d/D)$ se obtiene teniendo en cuenta la geometría de la grieta y el tipo de carga aplicado. El factor de intensidad de esfuerzo, K, es un camino conveniente para describir la distribución de esfuerzo alrededor de la fisura. Los valores de K se pueden calcular utilizando la teoría de la elasticidad aplicada a diferentes geometrías de grieta y modos de carga.

3. TENACIDAD DE FRACTURA Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

La tenacidad de fractura se define como la resistencia del material a la propagación inestable de grietas, y se evalúa de acuerdo con la norma ASTM 399^[2], que estima un estado de deformación plana en el frente de grieta que da origen a una zona de deformación plástica pequeña. La norma establece que se pueden utilizar probetas compactas redondas o cuadradas, con una relación espesor/ancho alrededor de 0.5; en cualquier caso es conveniente hacer una entalla, para que a partir del borde, mediante la aplicación de carga cíclica, se genere una grieta

medible, se recomienda una relación tamaño de grieta/ancho en el rango 0,45 a 0,55. En la figura 1 se muestra el esquema del tipo de probeta que se utilizó en el estudio.

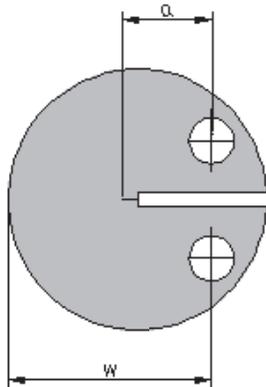


Figura 1. Probeta compacta redonda, las dimensiones significativas se toman respecto al eje de los agujeros.

Después de generar la grieta, se realizan tratamientos térmicos (temple-revenido), con el objetivo de evaluar la tenacidad de fractura para diferentes valores de resistencia del material, finalmente, se somete cada una de las probetas a un ensayo de tensión para obtener la carga de rotura (P_Q). En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los aceros estudiados, es conveniente aclarar que la resistencia del material se deduce de la dureza, teniendo en cuenta la metodología señalada en Apraiz (Apraiz, 1971).

Tabla 1

Carga de rotura en relación con el tratamiento térmico, para los aceros 1040 y 4340.

Acero	T° Revenido	Dureza	Fluencia	a	w	B	P_Q
	°C	Rc	Kg/mm ²	mm	mm	mm	kg
4340	0	57	200	14,2	31,1	22	1220
	150	55	193	16,2	32,7	22	1450
	250	50	174	16,5	31,9	22	1850
	370	40	138	13,2	31,4	21,9	3450
	650	35	116	13,47	31,6	22	3450
	EE	22	82	82	16,4	32,4	22,2

Acero	T° Revenido	Dureza	Fluencia	a	w	B	P_Q
	°C	Rc	Kg/mm ²	mm	mm	mm	kg
1040	0	57	200	17,3	32,1	22	850
	150	54	188	19,6	30,5	22	860
	250	50	170	20,1	31,4	22	1150
	370	43	141	19,3	30,5	21	1470
	650	32	103	17,6	33	22	1550
	EE	23	84	84	20,2	31,1	22

A partir de los datos consignados en la tabla 1, de acuerdo con la norma ASTM, se calcula un valor provisional de tenacidad de fractura aplicando las siguientes expresiones:

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{w}\right) \left[0,76 + 4,8\left(\frac{a}{w}\right) - 11,58\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 11,43\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 4,08\left(\frac{a}{w}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{w}} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right)$$

La norma recomienda que para comprobar si el valor encontrado en la ecuación (2) corresponde al factor crítico de intensidad de esfuerzo, K_{IC} , se debe calcular el siguiente factor:

$$F = 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{fluencia}} \right)^2 \quad (3)$$

Si se cumple que el valor encontrado en la ecuación (3) es menor que la longitud de la grieta y/o el espesor de la probeta, entonces el valor provisional K_Q corresponde al valor K_{IC} .

4. RESULTADOS

Para los aceros estudiados, la tabla 2 presenta un resumen del valor obtenido para la tenacidad de fractura, en relación con la dureza del material.

Tabla 2

Tenacidad de fractura en relación con la dureza del material para los aceros 1040, 4340, 9840 y 4140

Aceros							
1040		4340		9840		4140	
Dureza. Rc	Tenacidad de fractura, Kg.mm ^{0.5} /mm ²	Dureza. Rc	Tenacidad de fractura, Kg.mm ^{0.5} /mm ²	Dureza. Rc	Tenacidad de fractura, Kg.mm ^{0.5} /mm ²	Dureza. Rc	Tenacidad de fractura, Kg.mm ^{0.5} /mm ²
23	234	33	221	33	197	27	221
32	229	34	227	37	224	31	262
39	172	40	191	42	173	40	214
43	200	44	149	45	150	45	154
50	117	48	181	49	171	49	148
54	122	51	160	51	116	53	136
56	94	55	115	52	157		
57	79	57	88	57	67		

La gráfica de la tenacidad de fractura vs. dureza (figura 2) para las probetas estudiadas muestra una franja que es representativa para aceros con 0,4% de carbono.

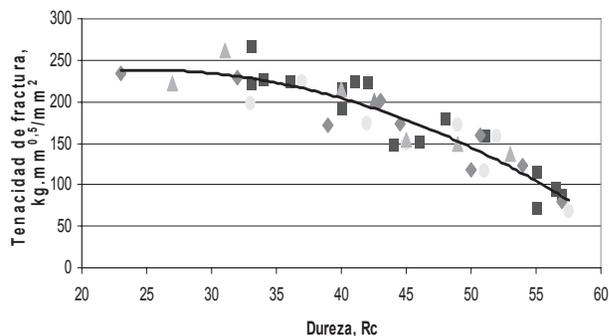


Figura 2. Tenacidad de fractura vs. Dureza, en aceros 4340 [cuadro]; 1040 [rombo]; 9840 [círculo] y 4140 [triángulo]

cidad de fractura para diferentes valores de resistencia del material, el trabajo se desarrollo teniendo en cuenta dos situaciones, en la primera a las probetas se les hizo una muesca circunferencial, con el objetivo de calcular la carga máxima que podía soportar, en la segunda situación, para una aplicación de carga dada se determinó el tamaño crítico de grieta permisible antes de que se produzca una falla catastrófica. Finalmente, se realizaron los ensayos correspondientes, para verificar la validez del procedimiento.

Situación 1

Se estudiaron probetas de tensión, de acero 4140, a las que se les hizo una muesca circunferencial, de un milímetro de profundidad, las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico de temple-revenido diferente, con el objetivo de evaluar la aplicación del factor de tenacidad para varias propiedades del material. Se tienen dos zonas críticas donde se puede presentar la falla: una en la muesca y otra en la parte roscada de la probeta. En cada caso, la posible carga de rotura se presenta cuando el factor de intensidad de esfuerzo sea igual a la tenacidad de fractura.

Para cada una de las probetas estudiadas, de acuerdo con la dureza obtenida después del tratamiento térmico, y teniendo en cuenta la tenacidad de fractura consignada en la gráfica 2, se hizo un cálculo de la posible carga de rotura para dos situaciones que se pueden presentar: falla en la muesca o falla en la rosca. En la tabla 3 se consigna el resultado de estos cálculos.

Al someter cada probeta al ensayo de tensión correspondiente, se obtuvieron los resultados reales de falla, que se consignan en las filas finales de la tabla 3. Es importante observar la gran aproximación de la carga calculada con respecto a la situación real, cuando las probetas fallaron en la muesca; pero, en el caso de falla en la rosca, se observó la presencia de múltiples grietas producto del tratamiento térmico, lo que sugiere datos reales más bajos, debido a que en los cálculos realizados no se consideró la existencia de este tipo de discontinuidad.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para aplicar los resultados dados, se estudiaron probetas normalizadas de tensión, tratadas térmicamente con el objeto de evaluar la tena-



Tabla 3
Carga de rotura esperada, para cualquiera de los posibles eventos de falla, en relación con la dureza del material. Acero 4140

Probeta	1	2	3	4	5	6
Dureza, Rc	53	50	42	40	48	38
Tenacidad de fractura, $\text{kg}\cdot\text{mm}^{0.5}/\text{mm}^2$	130	160	220	225	180	230
Frotura en la muesca, kg	8480	10365	13820	14134	11307	14448
Fractura en la rosca, kg	16124	19700	26276	26874	21500	27400
Carga real de falla, kg	12700	11150	15450	13900	15400	15800
Tipo de falla	Rosca	Muesca	Muesca	Muesca	Rosca	Muesca

Por otro lado, desde el punto de vista del diseño tradicional, si se evalúa la carga crítica de falla, tomando como criterio de falla el esfuerzo de fluencia del material, para una relación $r/d=0,025$ y $D/d=1,18$ de la probeta, se obtiene (utilizando las tablas dadas en Shigley (Shigley y Mischke, 2002) el factor de concentración de esfuerzo, $K_T=3$, se espera que la carga límite para la falla en cada probeta estudiada se presente de acuerdo con los datos dados en la tabla 4.

Tabla 4
Carga de falla esperada, teniendo en cuenta el criterio esfuerzo normal máximo

Probeta	1	2	3	4	5	6
Dureza, Rc	53	50	42	40	48	38
Límite de fluencia, Kg/mm^2	184	170	138	128	161	124
Carga límite de falla, Kg.	5512	5089	4136	3036	4840	3713

Es interesante observar que los valores calculados están muy por debajo de los reales, por lo tanto se puede concluir que el criterio tradicional para evaluar los componentes mecánicos es muy conservador.

Situación 2

El concepto de tenacidad de fractura también se puede utilizar cuando se requiere conocer

un tamaño crítico de grieta (después del cual se producirá una falla catastrófica), para la aplicación de un esfuerzo constante sobre el elemento considerado. En este caso, se estudio una probeta de acero 1040, con una dureza de 43 Rc. Se hizo un cálculo preliminar de la carga de falla, considerando como criterio el esfuerzo normal máximo, se obtuvo que la falla se puede presentar cuando se aplique sobre la probeta una fuerza de 12678 kg.

Para efectos de la comparación, se fija la carga de trabajo en 4500 kg, inferior al valor teórico mostrado. Como la tendencia de formación de grieta se tiene en la raíz de la rosca, se tomó esta sección para realizar los cálculos teniendo en cuenta la tenacidad de fractura. Para la carga considerada, el esfuerzo de trabajo en dicha sección es de $22 \text{ kg}/\text{mm}^2$, además, el material con dureza 43 Rc tiene un valor de tenacidad de fractura de $K_{Ic}=170 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{0.5}/\text{mm}^2$. Teniendo en cuenta un factor geométrico de 1,68 se obtiene que el tamaño crítico de grieta es 6,73 mm.

En el ensayo real la probeta falló en la parte roscada, con una fuerza de 4700 kg, se observó que debido al tratamiento térmico se había generado una grieta de 4.5 mm en la raíz de la rosca. En este caso, si se aplican los conceptos de tenacidad de fractura, se puede calcular con gran exactitud, para una carga dada, el tamaño crítico de grieta permisible antes de que se produzca una falla catastrófica.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con las aplicaciones mostradas se observa que la Tenacidad de Fractura permite cálculos de resistencia más próximos a los reales de falla, en comparación con los obtenidos utilizando los criterios tradicionales de diseño.

Es interesante observar para el conjunto de resultados obtenidos, que la Tenacidad de Fractura presenta un mejor comportamiento cuando

al material se le hizo un revenido a baja temperatura (inferior a 400 °C).

Como el valor de tenacidad de fractura de los aceros estudiados se obtuvo a partir de pruebas de laboratorio, es conveniente tener en cuenta que su aplicación en el diseño debe considerar situaciones complejas, como cargas cíclicas incontrolables o condiciones ambientales agresivas.

REFERENCIAS

- Alshoabi, Abdunaser; Ariffin, Ahmad (2006). *Finite element simulation of stress intensity factors in elastic-plastic crack growth*. Journal of Zhejiang University Science A. Malasya.
- American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Plane-strain fracture toughness of Metallic Materials*. ASTM 399.
- Apraiz Barreiro, José (1971). *Tratamiento térmico de los aceros*. 7ª edición. Dossat.
- Campbell, James; Gerberich, William y Underwood, John (1982). *Application of Fracture Mechanics*. American Society for Metals. Metals Park, Ohio.
- Castillo, Yopez y Rodríguez Franco (2007). *Estudio elástico plástico de mecánica de fractura mediante la modelación por elementos finitos*. 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuzco, Perú.
- Dieter, George (1986). *Mechanical Metallurgy*. 3ª edición. McGraw Hill. Tokyo.
- Hernández, Héctor (2003). *Mecánica de fractura y análisis de falla*. Unidad de publicaciones Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- M. Gosz; B. Moran (1998). *Stress Intensity Factors along three dimensional elliptical crack fronts*. National Technical Information Service, federal aviation administration. U. S.
- Meza, Juan y Chaves, Cesar (2003). *Estimación de la tenacidad a la fractura mediante el método de indentación*. DYNA, Año 70, Nro. 139. Medellín.
- O. K. Chopra; E. E. Gruber; W. J. Shack (2003). *Fracture Toughness and Crack Growth Rates of Irradiated Austenitic Stainless Steels*. Argonne National Laboratory. U.S. Washington DC.
- Rodríguez, Sara; Coronado, John; Arzola, Nelson (2006). *Predicción de vida remanente en ejes de maza superior de molino de caña*. Ingeniería e investigación, Año 26, Nro. 001. Bogotá.
- Shigley, Joseph y Mischke, Charles (2002). *Diseño en ingeniería mecánica*. Editorial McGraw Hill.
- Wulpi, Donald (1966). *How Component Fail*. American Society for Metals. Metals Park, Ohio.