

## INTRODUCCION AL CONCEPTO DE TENACIDAD A LA FRACTURA

*Por: Asdrúbal Valencia Giraldo  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Antioquia*

---

---

### RESUMEN

Partiendo de algunas consideraciones sobre el fenómeno de fractura frágil se hace una sumarisíma presentación de los conceptos de la Mecánica Lineal Elástica de Fractura; seguidamente se desarrolla la idea de los factores de intensidad de esfuerzos para llegar a la formulación de la tenacidad de fractura. Se comparan los criterios de diseño basados en la tenacidad de fractura de deformación plana y los que parten de las tensiones de cedencia. Se muestra cómo en muchas aplicaciones es necesario utilizar el diseño basado en la Mecánica de la Fractura.

### 1. EL DISEÑO CONVENCIONAL

En el diseño, fabricación y operación de estructuras (o componentes) el propósito del ingeniero es producir una parte que realice su función en forma eficiente, económica y segura. Para lograr esto se predicen: a) las cargas de servicio; b) las tensiones resultantes y c) las cargas que causarían la falla funcional de la estructura. Además de la falla química debida a corrosión ambiental, los principales modos de falla mecánica a los cuales debe prestar atención el ingeniero son:

- a) Falla por inestabilidad elástica (combado).
- b) Falla por deformación elástica excesiva.
- c) Falla por deformación plástica apreciable (fluencia).

- d) Falla por inestabilidad en tracción (estrangulamiento).
- e) Falla por fractura rápida.

Para evitar estos tipos de falla los criterios de diseño convencionales se basan en los siguientes tres principios: a) mantener las cargas que actúan sobre el miembro por debajo del límite elástico de modo que no ocurra deflexión en gran escala; b) mantener las cargas aplicadas por debajo de la resistencia última para que no se produzca inestabilidad mecánica (combado o estrangulamiento) y c) preservar la integridad estructural del conjunto como un todo, dejando márgenes de seguridad que tengan en cuenta la inevitabilidad de la fluencia local en las discontinuidades.

Todos estos enfoques del diseño suponen que la tensión necesaria para producir fractura es superior al esfuerzo de cedencia e igual o superior a la resistencia última, Figura 1a. de este modo se confía en el diseño basado en un código apropiado que relaciona el esfuerzo aplicado con la tensión de cedencia del material, lo cual se origina en experiencias pasadas y en el uso de factores de seguridad que mantienen las cargas de trabajo por debajo de la tensión de cedencia y de la resistencia

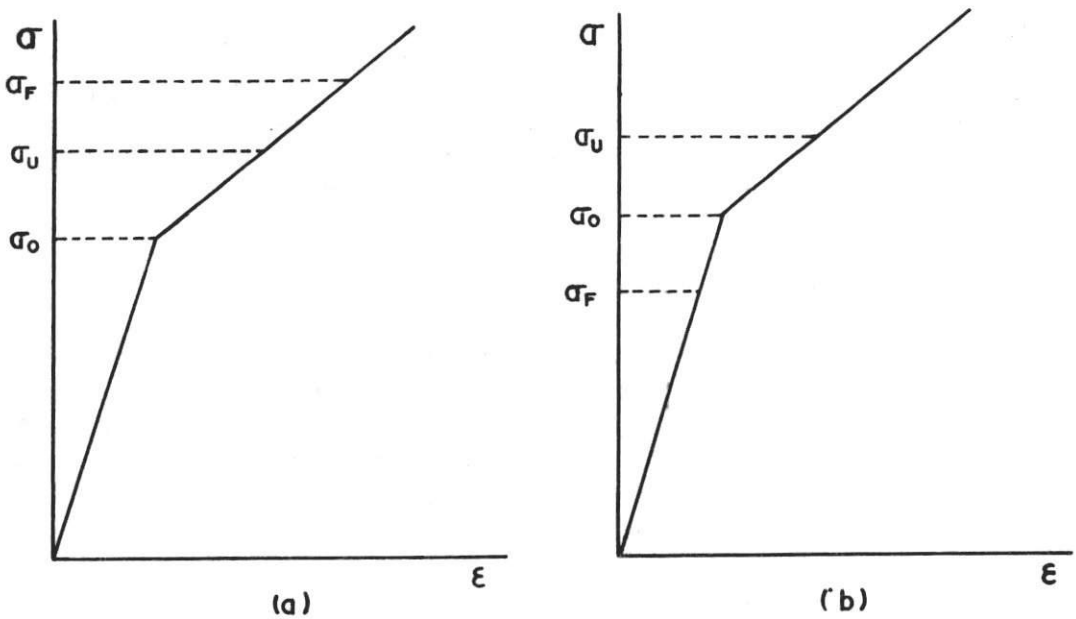


FIGURA 1. a) En un material dúctil la fractura ocurre después de mucha deformación plástica.  
 b) La fractura frágil puede ocurrir antes de que se alcance el límite elástico. (Ref. 1)

última y por tanto, por debajo de la tensión de fractura. La principal razón para usar factores de seguridad se debe a que aunque se hayan hecho análisis de tensiones muy detalladas, persiste un grado de incertidumbre respecto a la situación en una estructura real en servicio. Muchas veces no se conocen bien los valores operativos de las tensiones locales, esto se ve agravado por las tensiones residuales que se encuentran en las placas y secciones metálicas después de las operaciones de conformado y fabricación, o por la distribución no uniforme de la carga durante el montaje y manipulación. Es por ello que el ingeniero sigue un código de diseño, que le asegura que los esfuerzos calculables en su estructura no excederán la tensión de cedencia o la resistencia última, devidido por un número apropiado, factor de seguridad o factor de "ignorancia". Esta cifra generalmente está comprendida entre 1.5 y 2.0 cuando se diseña con base en el esfuerzo de fluencia  $\sigma_0$ . El uso de un factor de seguridad aplicado a la resistencia última es de menos utilidad porque en ese caso estará comprendido entre 2.5 y 4.0 produciendo resultados pesimistas respecto al esfuerzo aplicado tolerable.

En cualquier caso el código de diseño implica que si una estructura de una configuración geométrica dada debe someterse a tensiones elevadas, se debe usar un material con resistencia uniaxial mayor. La disponibilidad de materiales estructurales de más alta resistencia y los avances del diseño han hecho posible la producción de estructuras más esbeltas y elegantes sometidas a tensiones mayores que las producidas por las generaciones anteriores. Por otro lado, junto a esta mayor elegancia y eficiencia se ha hecho evidente que tales estructuras tienen tendencia a fallar por fractura rápida.

## 2. EL PROBLEMA DE LA FRACTURA RAPIDA

El procedimiento de diseño indicado es aceptable en muchas estructuras de ingeniería como lo atestiguan las "relativamente" pocas fracturas accidentales que han ocurrido en servicio. Aún así la suma total de fallas y el daño ocurrido en esos casos es terrible; la literatura sobre el tema(2) está llena de casos de fallas catastróficas de aviones, barcos, puentes, turbogeneradores, estructuras de acero, recipientes a presión, gasoductos, reactores, etc. Por estas razones sería deseable que se pudiera dar algún *aviso antes* de que ocurriera la falla. Sería bueno que la fractura ocurriera lentamente, porque cuando ocurre súbitamente se libera gran cantidad de energía de deformación, esto hace que la estructura se despedace o aún que se pulverice y en muchos casos es esta desintegración la que causa más daño.

Lo esencial de la fractura rápida es un mecanismo de falla que comprende la propagación *inestable* de una grieta en una estructura; en otras palabras, una vez que

la fisura empieza a moverse, el sistema de carga es tal que produce un crecimiento acelerado. En la historia de las fallas por fractura rápida de estructuras en servicio, éstas casi siempre han sido causadas por tensiones aplicadas, menores que la tensión de diseño calculada con el código y el factor de seguridad apropiados, Figura 1b. Naturalmente, esto ha aumentado la naturaleza catastrófica de las fallas y ha hecho que en general se les describa como “frágiles”.

En este contexto la fractura es dúctil o frágil según la deformación unitaria presente en el momento de la fractura. En la fractura frágil hay poca o ninguna deformación y el cambio de forma es mínimo. La fractura dúctil se ve precedida de una deformación plástica apreciable antes de la separación real y el cambio de forma es notable.

En términos prácticos, la definición de “frágil” se refiere al surgimiento de la inestabilidad cuando el esfuerzo aplicado es menor que el esfuerzo de cedencia general.

Algunos aspectos del proceso de fractura se tratarán posteriormente; sólo es necesario puntualizar que cuando las condiciones son favorables para la fractura inestable, los valores de resistencia última o de esfuerzo de cedencia que dan los manuales son inadecuados para manejar el problema. Los criterios de diseño se deben basar en la confiabilidad contra la fractura frágil.

Para los aceros en particular, las medidas de la “fragilidad” se han obtenido observando la cantidad de energía absorbida cuando se rompe una probeta estallada, generalmente bajo carga de impacto. Sin embargo, la información obtenida en un ensayo de éstos no se puede aplicar directamente a la evaluación de la resistencia a la propagación de la fractura rápida en una pieza en servicio, porque ni la apariencia de la fractura ni la cantidad de energía absorbida se pueden relacionar de una manera cuantitativa con las tensiones de diseño aplicadas, ni aún en el caso en que se pudiera decir que la geometría y la tasa de deformación asociadas con el ensayo de impacto producen efectos idénticos a los originados por las condiciones de servicio.

El principal uso ingenieril de los ensayos de impacto es en la selección de materiales que sean resistentes a la fractura frágil por medio de las curvas de transición dúctil-frágil, en este caso el diseño se centra en la determinación de la temperatura por encima de la cual no ocurrirá fractura frágil a niveles de esfuerzo elástico. Obviamente, mientras menor sea la temperatura de transición mayor será la tenacidad a la fractura del material. En resumen, operando dentro de límites muy definidos, el ensayo de impacto puede usarse para dar valores comparativos de tenacidad en aceros nominalmente idénticos, por tanto es adecuado para el control rutinario de calidad. Pero la información no se puede usar para calcular la magnitud

del esfuerzo aplicado capaz de producir la propagación rápida de una grieta en una estructura que contenga defectos de varios tamaños y geometrías, y por eso surgió la necesidad de buscar otra medida cuantitativa de la resistencia del material o tal propagación de fisuras. Esta resistencia se dice que es la "tenacidad a la fractura" o tenacidad de fractura del material y se puede decir que controla la falla por fractura rápida de la misma manera que el esfuerzo general de cedencia controla la falla por fluencia. Ambos parámetros dependen de la temperatura de ensayo, la velocidad de deformación, la configuración geométrica y la microestructura del material. Estos temas se estudian con detalle dentro de la formulación general de la Mecánica de la Fractura.

### 3. EL ESTUDIO DE LA FRACTURA

El tema de la fractura es muy amplio y comprende disciplinas tan diversas como la física del estado sólido, la ciencia de los materiales y la mecánica del continuo.

La fractura por agrietamiento se puede introducir de varias maneras, especialmente por la aplicación de cargas externas ya sean lentas o por impacto, por carga repetitiva (fatiga) o por deformación dependiente del tiempo (sobre todo a altas temperaturas). Cada uno de estos temas es suficientemente extenso como para que sea en sí un campo de estudio. Sin embargo, en todos los casos el proceso de fractura se puede considerar en términos de las siguientes etapas:

- a. Acumulación del daño (deformación plástica).
- b. Iniciación de una o más grietas.
- c. Propagación de la grieta hasta fractura.

La acumulación del daño está asociada con las propiedades de un material debidas a su estructura atómica, tipo de red cristalina, defectos de la red, límites de grano e historia de carga (o tipo de sollicitaciones). La fractura de los materiales debe explicarse en última instancia en términos de su constitución atómica o al menos microscópica. Los conceptos de la teoría de las dislocaciones se han usado para explicar la nucleación de microgrietas, así mismo las macrogrietas se originan en discontinuidades tales como las inclusiones. Esto nos indica que para el metalurgista esta es un área de estudio cuya intención será explicar en el sentido más básico por qué y cómo se generan las grietas.

Otra manera de abordar el asunto es la denominada *Mecánica Lineal Elástica de Fractura (MLEF)*, donde se describen los campos de tensiones alrededor de las

puntas de grietas de varios tamaños y formas; es esencialmente de naturaleza matemática pues usa conceptos tomados de la mecánica del continuo para construir un marco formal dentro del cual deben actuar los procesos físicos de fractura y proporciona criterios prácticos para estimar la tenacidad de fractura o resistencia de un material a la propagación de grietas. Por ello la MLEF se emplea como una herramienta de diseño en aquellas situaciones donde el diseño tradicional no es adecuado en términos de análisis.

En breve, la MLEF aplica la teoría de la elasticidad lineal al estudio de la propagación de las grietas y no se preocupa por el problema de la nucleación de ellas.

La principal tarea de la MLEF es conservadora, es decir: aprender lo suficiente sobre grietas para evitar que aparezcan o crezcan, o al menos estar en posición de predecir su comportamiento. Este diseño supone que todas las estructuras contienen grietas iniciales o fisuras de ciertos tamaños mínimos (generalmente el mínimo tamaño que puede detectarse con ensayos no destructivos) las cuales no debe permitirse que crezcan hasta un tamaño crítico durante la vida de servicio esperada.

Hay todavía otro aspecto más de la fractura llamado análisis de fallas o fractografía. Este es un examen post-mortem, pues la falla ya ha ocurrido y mediante un estudio cuidadoso de la superficie de la fractura (examen visual, con microscopio óptico o con microscopio electrónico) se pretende determinar las razones por las que ocurrió. Esta información se puede usar para prevenir fracturas similares en el futuro; obviamente éste es un método muy costoso.

Lo anterior hace evidente que desde el punto de vista de la ingeniería el camino más promisorio para prevenir la fractura rápida es la MLEF.

#### 4. TENSION DE FRACTURA

Teniendo en cuenta las interacciones entre los átomos de un sólido se determina que la máxima resistencia teórica  $\sigma_m$ , es:

$$\sigma_m = (E \gamma / a_0)^{1/2} \approx E/10 \quad (1)$$

$\gamma$  = tensión superficial, E = módulo de elasticidad

$a_0$  = parámetro de la red.

Para el caso del acero donde  $\gamma = 1000 \text{ erg/cm}$ ,  $a_0 = 2.5 \text{ \AA}$

$$\gamma E = 30 \times 10^6 \text{ PSI} = 2.07 \times 10^5 \text{ GPa}$$

$$\sigma_m = 29 \text{ GPa}$$

Sin embargo, se sabe que en la práctica la resistencia de los sólidos es menor que su resistencia teórica en varios órdenes de magnitud. El primer intento de explicar esta discrepancia fue hecho por A. A. Griffith en 1920(4), quien postuló que los sólidos deben contener grietas o fisuras muy finas, no importa que tan cuidadosamente se elaboren. En la punta de esas grietas o fisuras la concentración de tensiones hace que la resistencia cohesiva teórica se alcance aunque el esfuerzo nominal aparente sea mucho menor que  $\sigma_m$ .

El modelo de Griffith se basa en una solución elástica de una cavidad en forma de elipse. La Figura 2 representa una cavidad elíptica. La tensión máxima ocurre en el extremo del eje mayor. En 1913, C.E. Inglis(5) hizo el análisis de las tensiones en un hueco elíptico contenido en una placa deformada elásticamente y cargada uniformemente, su fórmula es:

$$\sigma_{max} = \sigma (1 + 2a/b) \quad (2)$$

$\sigma$  = tensión aplicada;  $2a$  y  $2b$ : ejes mayor y menor de la elipse.

La tensión aumenta mientras más achatada sea la elipse; si la punta tiene un radio de curvatura  $\rho = b^2/a$  (caso de una grieta aguda):

$$\sigma_{max} = \sigma (1 + 2 \sqrt{a/\rho}) \approx 2 \sigma \sqrt{a/\rho}, \quad \rho \ll a \quad (3)$$

$$\text{Si } \rho \rightarrow 0 \quad \sigma_{max} \rightarrow \infty$$

$$\sigma_{max} = \sigma K_t \quad (4)$$

$K_t$  es el factor de concentración de tensiones que aparece en los manuales. Las fórmulas exactas varían con la forma de la grieta, pero en todos los casos  $K$  aumenta al decrecer el radio de curvatura.

¿Pero si el análisis de Inglis es aplicable, cómo se explica que en la práctica las grietas mayores se propagan más fácilmente que las pequeñas? ¿Cuál es el significado físico del radio de curvatura en la punta de la grieta?

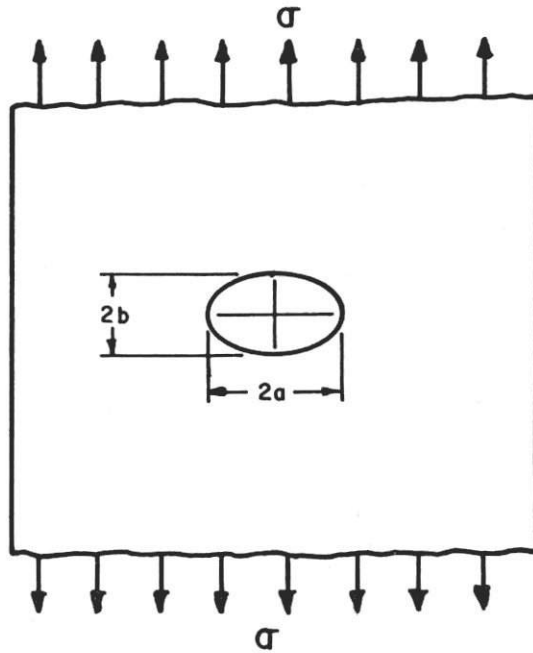


FIGURA 2. Esquema del modelo de Griffith.

#### 4.1 El criterio de Griffith.

A.A. Griffith aplicó criterios termodinámicos al análisis elástico de Inglis haciendo un balance de energía; notó que cuando se introduce una grieta en una placa de material elástico tensionado se debe establecer un equilibrio entre la disminución de la energía elástica (relacionada con la liberación de energía elástica almacenada y el trabajo hecho por las cargas externas) y el aumento en la energía de superficie que resulta al crearse la grieta. Por tanto, una grieta preexistente crecería un incremento  $\Delta a$  si el sistema suministrara la energía superficial adicional, Figura 3. Con este balance energético Griffith estableció que, para tensión biaxial:

$$\sigma = (2E \gamma / \pi a)^{1/2} \quad (5)$$

Aquí  $\sigma$  es la tensión necesaria para hacer crecer una grieta preexistente de longitud  $2a$ .



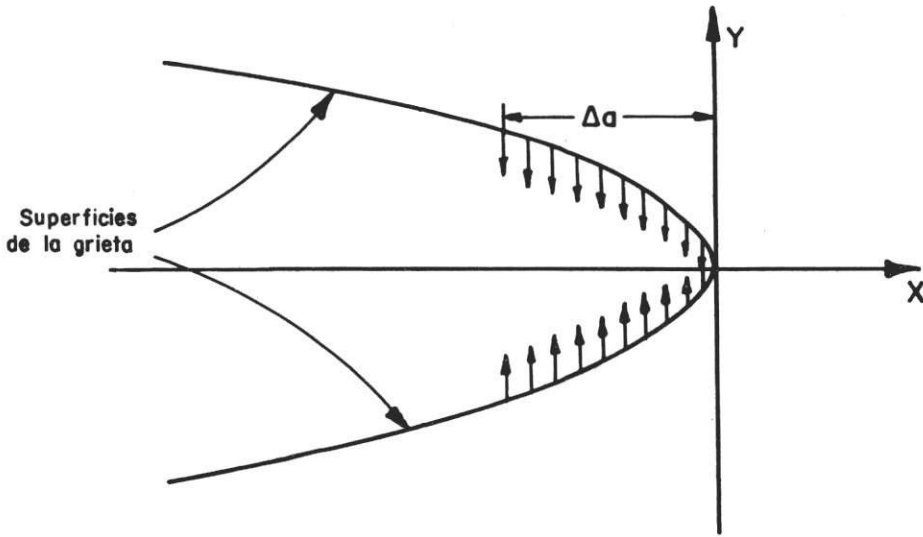


FIGURA 3. Trabajo para incrementar la grieta en  $\Delta a$ .

Cuando el espesor es apreciable y se llega a constreñir y suprimir la deformación en la dirección  $z$ , se crean condiciones de deformación plana (y tensión triaxial), en ese caso:

$$\sigma = [ 2E \gamma / \pi a (1 - \gamma^2) ]^{1/2} \quad (6)$$

$\gamma$  = relación de Poisson.

Debe notarse que la tensión de tracción en fractura es ahora una función del tamaño de la grieta e inversamente proporcional a  $\sqrt{a}$ . De las ecs. 5 y 6 se ve que la cantidad  $\sigma_c \sqrt{\pi a}$  es una propiedad que depende de las constantes del material, el subscrito  $c$  indica condición de fractura, usando la ecuación 3:

$$\sigma_c \sqrt{\pi a} = 1/2 (\sigma_{max})_c \sqrt{\pi \rho} = \text{constante} \quad (6b)$$

Lo importante en la ecuación 6b es que en vez de los parámetros  $(\sigma_{max})_c$  y  $\rho$  que son difíciles de medir se pueden usar la tensión aplicada y el tamaño del defecto que son fáciles de medir. La cantidad  $\sigma_c \sqrt{\pi a}$  se denota con el símbolo  $K_c$ , llamado tenacidad de fractura:

$$K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a} = \text{constante} \quad (6c)$$

## 4.2 Extensión del criterio de Griffith.

El uso apropiado de las ecuaciones 4, 5 y 6 está restringido a los sólidos cuya fractura sólo requiere suficiente energía de deformación como para superar la energía superficial  $\gamma_s$ , vale decir los sólidos completamente frágiles; pocos materiales reales satisfacen esta restricción; en efecto, aún metales como el hierro gris, que ciertamente es frágil en sentido general, muestra alguna deformación plástica durante el proceso de fractura. Cuando esto sucede, la forma de la punta de la grieta se altera debido a la deformación plástica y se embota. Hay otro factor importante y es el tiempo que se toma la deformación para ocurrir, de manera que la cantidad de ésta en la punta de la grieta dependerá de la rapidez con que la grieta se está moviendo. Para tener en cuenta estas características tanto E. Orowan como G.R. Irwin(6) en 1949, propusieron modificaciones a la ecuación de Griffith. La modificación de Orowan es:

$$\sigma = [ 2E ( \gamma_s + \gamma_p / a ) ]^{1/2} = [ \frac{2E}{\pi a} \gamma_s ( 1 + \frac{\gamma_p}{\gamma_s} ) ] \quad (7a)$$

$\gamma_p$  es la energía de deformación plástica, como  $\gamma_p \gg \gamma_s$ :

$$\sigma \approx [ \frac{2E \cdot \gamma_s}{\pi a} ( \gamma_p / \gamma_s ) ]^{1/2}$$

Por su parte Irwin usó la energía elástica por unidad de incremento de grieta  $\partial U / \partial a$ , y la llamó G, demostrando que:

$$\sigma = (EG / \pi a)^{1/2} \quad (8)$$

Esta ecuación es una de las más importantes relaciones en la mecánica de la fractura. Comparando las ecuaciones 7a y 8 se ve que:

$$G = 2 ( \gamma_s + \gamma_p ) \quad (9)$$

En el punto crítico de inestabilidad, la tasa de liberación de energía G (también llamada fuerza de extensión de la grieta) alcanza un valor crítico  $G_c$ , bajo el cual ocurre la fractura. Esta tasa crítica de liberación de energía elástica  $G_c$ , se puede interpretar como un parámetro del material y como una cuantificación de la tenacidad de la fractura, además se puede medir en el laboratorio.

## 5. MECANICA LINEAL ELASTICA DE FRACTURA

Partiendo de la premisa de que las estructuras contienen grietas o fisuras, la falla se puede estudiar con un análisis de tensiones basado en los conceptos de la

teoría de la elasticidad. En vez de seguir los métodos de Griffith el examen se puede concentrar en la punta de la grieta, una región que es pequeña comparada con todo el miembro, pero es suficientemente grande con respecto a las dimensiones atómicas de modo que se puede aplicar la teoría de la elasticidad lineal. Esto fue lo que hizo H.M. Westgaard en 1939(7) llegando a determinar la naturaleza de la distribución de tensiones en la punta de una grieta aguda.

Los campos de tensiones que rodean la punta de una grieta se pueden dividir según tres modos principales de carga que comprenden diferentes desplazamientos de la superficie de la grieta, tal como se muestra en la Figura 4.

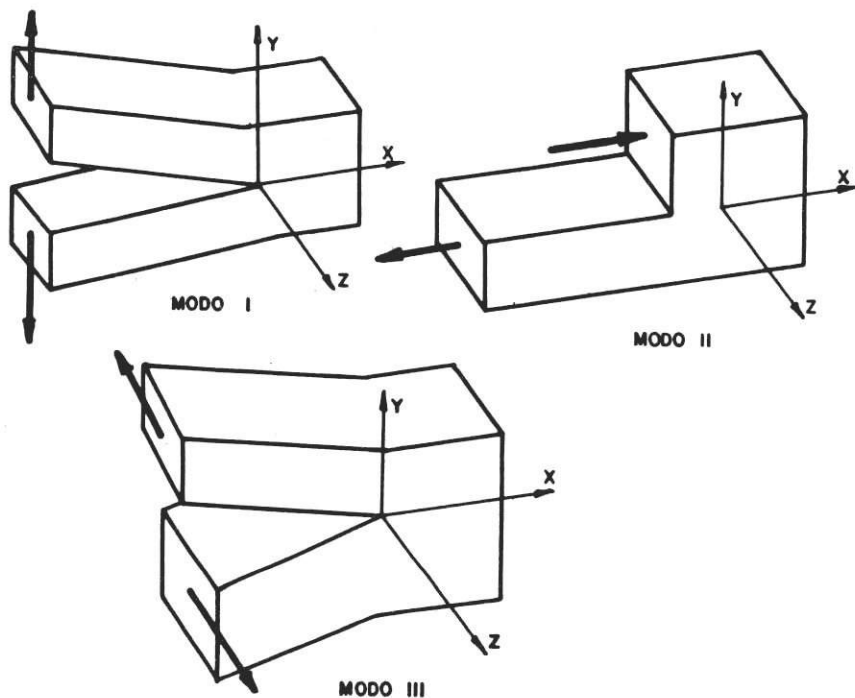


FIGURA 4. Modos básicos de carga.

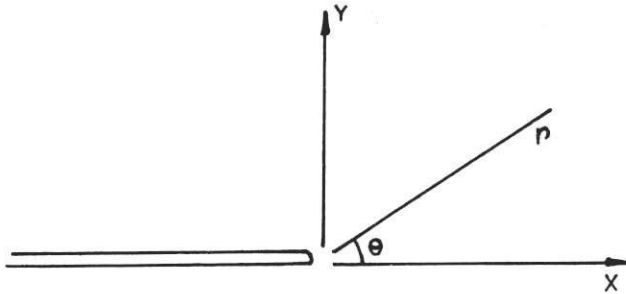
MODO I: de abertura o de tracción, las superficies de las grietas se apartan.

MODO II: de deslizamiento o cizallamiento en un plano, las superficies de las grietas se deslizan una sobre otra en una dirección perpendicular al borde activo de la grieta.

MODO III: de rasgado o cizallamiento antiplanar, las superficies de las grietas se mueven de manera relativa una a otra y paralelamente al borde activo de la grieta.

El modo I es el que se encuentra en la mayoría de las situaciones reales donde se fracturan componentes. Es por ello que el análisis se centrará en el modo I.

La solución de Westgaard(7) para las tensiones adelante de una grieta son:



$$\begin{aligned}
 \sigma_y &= \sigma (a/2r)^{1/2} \cdot \cos \Theta/2 \cdot (1 + \text{sen } \Theta/2 \cdot \text{sen } 3\Theta/2) + \dots \\
 \sigma_x &= \sigma (a/2r)^{1/2} \cdot \cos \Theta/2 \cdot (1 - \text{sen } \Theta/2 \cdot \text{sen } 3\Theta/2) + \dots \\
 \gamma_{xy} &= \sigma (a/2r)^{1/2} \cdot \text{sen } \Theta/2 \cdot \cos \Theta/2 \cdot \cos 3\Theta/2 + \dots
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

donde r y  $\Theta$  son coordenadas polares.

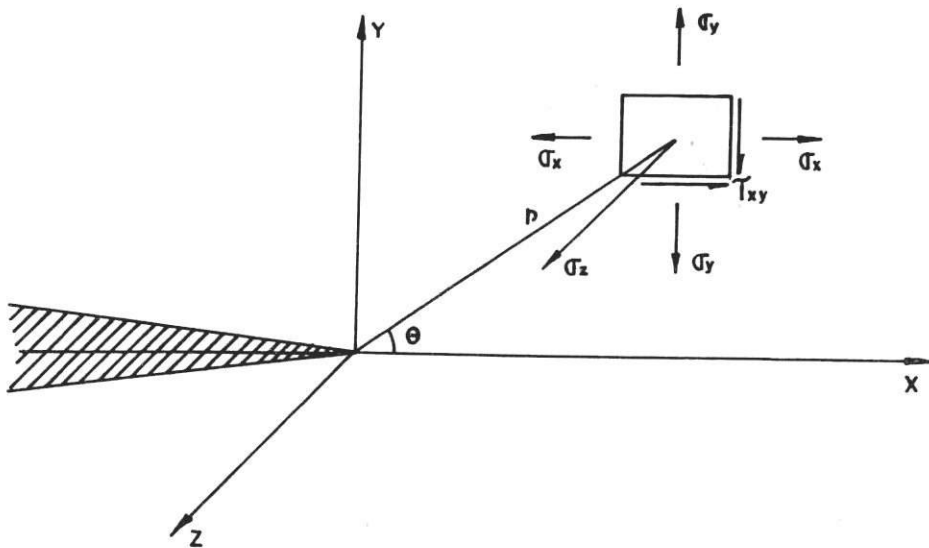


FIGURA 5. Distribución de tensiones en la vecindad de una grieta.

En la notación de la Figura 5 los esfuerzos en la punta de la grieta son:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2 \pi r}} \cos \Theta/2 (1 + \operatorname{sen} (\Theta/2) \operatorname{sen} (3 \Theta/2)) \\ \sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2 \pi r}} \cos \Theta/2 (1 - \operatorname{sen} \Theta/2 \cdot \operatorname{sen} 3 \Theta/2) \\ \gamma_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2 \pi r}} (\operatorname{sen} \Theta/2 \cdot \cos \Theta/2 \cdot \cos 3 \Theta/2)\end{aligned}\tag{11}$$

El campo elástico de tensiones se puede separar en dos partes. Una tiene que ver con la distribución de tensiones y es función solamente de las coordenadas; esta parte es  $f(\Theta) / \sqrt{2 \pi r}$ . La otra parte tiene que ver con la intensidad del esfuerzo como función de la geometría de la probeta y es linealmente proporcional a la carga aplicada. En este caso es  $K$  o "factor de intensidad de esfuerzos"; por esta razón  $K$  encarna las características externas (tensión nominal aplicada  $\sigma$  y tamaño de grieta  $a$ ) que corresponden a la fractura.

En las ecs. 11 se ve que las tensiones locales pueden elevarse a valores extremadamente altos cuando  $r \rightarrow 0$ , esto no ocurre por el surgimiento de la deformación plástica en la región adyacente al ápice de la grieta. En esas ecuaciones  $K$  es un número real finito que sirve para ajustar la velocidad a la cual los esfuerzos en la punta de la grieta cambian con la singularidad  $1/\sqrt{r}$ . Por ejemplo, el comportamiento de  $\sigma_y$  (cuando  $\Theta = 0$ ) para tres valores diferentes de  $K$  se ilustran en la Figura 6.

De lo anterior, se deduce algo importante para las ecs. 11 y es que la distribución de esfuerzos alrededor de una grieta en cualquier estructura es similar y sólo depende de las coordenadas  $r$  y  $\Theta$ . La diferencia entre un componente agrietado y otro, reside en la magnitud de  $K$ ; por ello, decimos que  $K$  caracteriza las tensiones en la punta de la grieta y en esencia sirve como un factor de escala para definir la magnitud del campo de tensiones en la punta de la grieta; por esta razón, para el análisis de tensiones de cualquier componente estructural agrietado sólo se requiere conocer  $K$  y la distribución remota de tensiones.

Es importante distinguir el factor de intensidad de esfuerzos  $K$  del factor de concentración de tensiones  $K_t$ . El factor  $K_t$  tiene en cuenta las variables geométricas, longitud de la grieta y radio en la punta; pero el factor  $K$  no sólo incorpora los términos geométricos (la longitud de la grieta aparece explícitamente, mientras el radio en la punta se supone muy pequeño) sino también el nivel de tensiones. En este sentido el factor de intensidad de esfuerzos proporciona más información

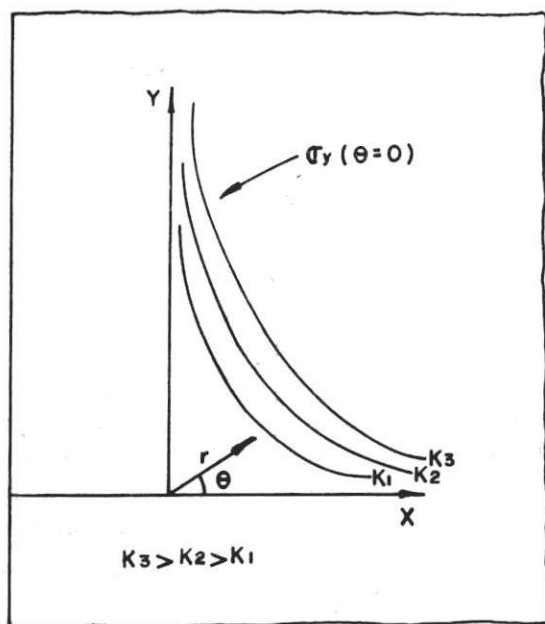


FIGURA 6. Efecto de  $K$  sobre  $\sigma_y$  cuando  $\Theta = 0$ .

que  $K_t$ . Como  $K$  caracteriza las condiciones externas que corresponden a la fractura, una vez que este parámetro se conoce para una muestra dada es posible determinar el máximo factor de intensidad de esfuerzos que causarí la falla. Este valor de  $K$  crítico se denomina "tenacidad de fractura", en condiciones de tensión plana se designa  $K_c$  y en deformación plana  $K$ .

Como los valores de  $K$  están determinados por la geometría de la grieta y la carga aplicada, éstos se pueden determinar para cualquier forma geométrica que sea de interés. Como un ejemplo tómesese una placa elástica sometida a tracción uniaxial perpendicular a una grieta central de longitud  $2a$ , Figura 7, para esta geometría el factor de intensidad de tensiones es:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (14)$$

Esta es una forma simple que establece que las unidades de  $K$  son  $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$  o  $\text{Ksi} \sqrt{\text{in.}}$

Como los cuerpos de tamaño infinito no tienen interés práctico al analizar formas de dimensiones finitas se acostumbra considerar una solución para placa infinita modificada por una función algebraica o trigonométrica  $\alpha = f(\Theta) = f(a/W)$ , que

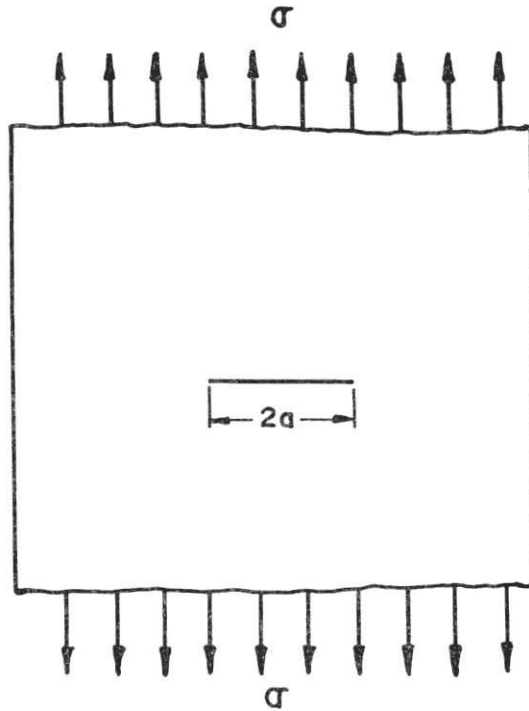


FIGURA 7. Placa elástica infinita con una grieta en el centro.

se escoge de modo que las fuerzas superficiales sean iguales a cero, así se ha obtenido la siguiente solución aproximada para una grieta en el centro de un cuerpo rectangular de ancho  $W$ , Figura 8.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \left[ \frac{W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{W} \right] \quad (15)$$

$$= \sigma \sqrt{\pi a} \left[ 1 + \frac{\pi^2 a^2}{6W^2} + \dots \right]$$

Así para un sólido infinito en que  $a/W = 0$ ,  $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ . Para una grieta en el borde de una placa semi-infinita  $K = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a}$ .

En general  $K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} = f(\sigma, a)$ ; el (coeficiente  $\alpha$  depende de la geometría del cuerpo sometido a la tensión  $\sigma$  y de la grieta misma. En la literatura se encuentran valores de esta función  $\alpha = \frac{1}{Q} = f(a/W)$  hallados por distintos métodos para distintas geometrías(8).

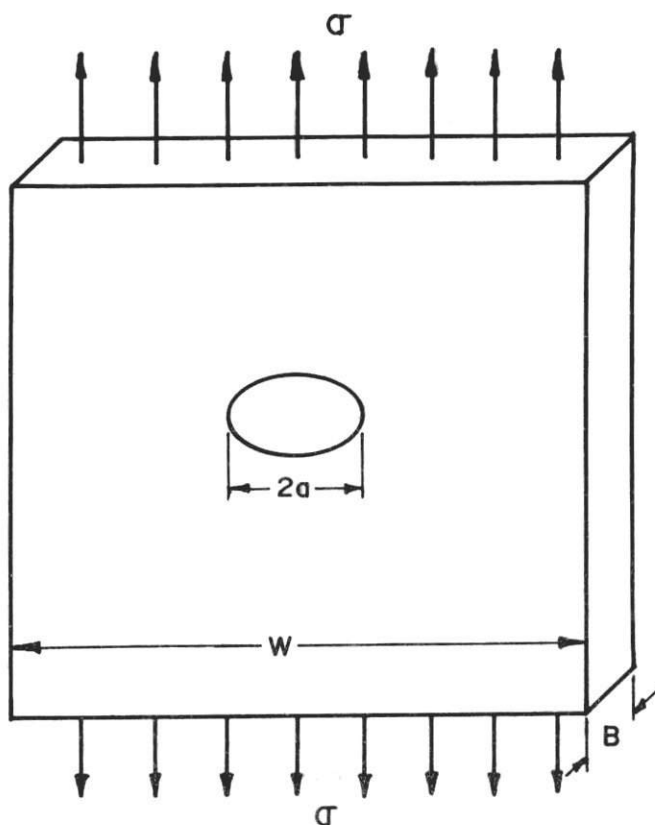


FIGURA 8. Cuerpo rectangular elástico agrietado en el centro.

Es importante distinguir entre  $K$  y  $K_c$ , es decir entre el factor de intensidad de esfuerzos y la tenacidad de fractura. Una buena analogía es la tensión y la resistencia: un componente puede experimentar muchos niveles de esfuerzo, dependiendo de la carga aplicada y el tamaño del componente pero sólo hay un nivel de tensión que produce deformación plástica permanente y otro nivel que causa la falla. Estos niveles de esfuerzo son el esfuerzo de cedencia  $\sigma_0$  y la resistencia última  $\sigma_u$ . De la misma manera  $K$ , el nivel de intensidad de esfuerzos en la punta de la grieta varía con el tamaño de ésta y la carga aplicada. El nivel de intensidad de esfuerzos único que causa la falla se llama  $K_c$ , nivel de intensidad crítico o *tenacidad de fractura*.

Empero debemos recordar que en la punta de las grietas en materiales metálicos se forma una zona plástica y cuando la muestra es gruesa en una dirección paralela al frente de la grieta, se puede generar una tensión  $\sigma_z$  que restringirá la deformación en tal dirección. Se demuestra que el tamaño de esta zona plástica en condi-



ciones de deformación plana es mucho menor que en el caso de tensión plana. Como la tenacidad de fractura depende del volumen de material capaz de deformarse plásticamente antes de la fractura y puesto que este volumen depende del espesor del cuerpo de prueba, se comprende que la tenacidad de fractura  $K_c$  varíe con el espesor como se muestra en la Figura 9.

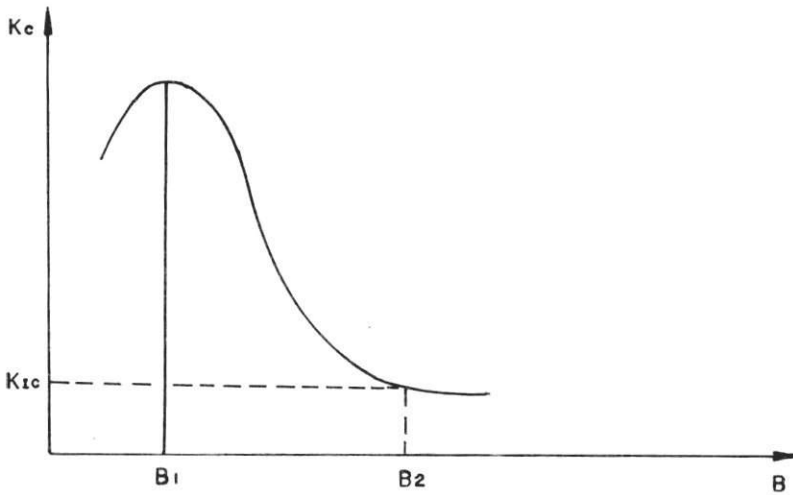


FIGURA 9. Variación de la tenacidad de fractura  $K_c$  con el espesor  $B$  de la muestra.

Cuando la muestra es delgada (por ejemplo en  $B_1$ ) y el grado de constricción plástica en la punta es mínimo, prevalecen las condiciones de tensión plana y la tenacidad es máxima. Al aumentar el espesor se presenta la restricción de la plasticidad y la tenacidad disminuye hasta un valor de  $K_{1c}$  que ya no cambia al aumentar el espesor. Este valor  $K_{1c}$  o tenacidad de fractura en deformación plana es importante porque es un límite inferior de la tenacidad del material en cualquier aplicación. Una vez que  $K_{1c}$  se ha determinado para un material que tenga al menos el espesor  $B_2$ , cualquier componente más grueso que  $B_2$  tendrá la misma tenacidad.

En resumen, la tenacidad de fractura en deformación plana  $K_{1c}$  sólo depende de los factores metalúrgicos; por esta razón la mejor manera de comparar materiales de diferente espesor es  $K_{1c}$ .

## 6. TENACIDAD A LA FRACTURA EN DEFORMACION PLANA, $K_{Ic}$

Recapitulando esta brevísima introducción a la MLEF, se puede decir que uno de los principios básicos de la mecánica de la fractura es que la fractura rápida (o inestable) ocurre cuando  $K$  alcanza un valor crítico  $K_c$ . El estado de tensiones en la punta de la grieta es uno de los factores que más influye en la determinación de  $K_c$ . En condiciones de tensión plana ocurre una deformación plástica significativa y, en efecto la falla será relativamente lenta. Por otro lado, cuando el estado de tensiones triaxial lleva la energía de deformación hasta el máximo que puede absorberse se dan las condiciones de deformación plana. Al aumentar los esfuerzos se alcanza el valor de  $K_{Ic}$ , y ocurre una falla súbita y catastrófica con muy poca deformación plástica.  $K_{Ic}$  representa la habilidad inherente del material para soportar una intensidad dada del campo de tensiones en la punta de la grieta y para resistir la extensión progresiva de la grieta en condiciones de deformación plana.

### 6.1 El ensayo para determinar $K_{Ic}$ .

Si el diseñador conoce el valor de  $K_{Ic}$  podrá determinar el tamaño de las grietas que se pueden tolerar en los miembros estructurales para un nivel de esfuerzos de diseño dado. Siendo  $K_{Ic}$  una propiedad del material tan importante en la prevención de la fractura, es apropiado considerar los procedimientos para medirla.

El objeto de este ensayo es obtener valores reproducibles de la tenacidad de fractura limitante mínima de un material cuando se ensaya en secciones suficientemente grandes para que no se presente plasticidad detectable en la fractura. Al mismo tiempo, la fractura debe realizarse bajo condiciones cuasielásticas, es decir el tamaño de la zona plástica debe ser mucho menor que la sección normal de la probeta  $B \geq (K_{Ic} / \sigma_0)^2$ . Un tercer requerimiento es que la región de interés en la punta de la grieta debe ser mucho menor que la longitud de ésta de manera que el advenimiento de la extensión de la grieta sí sea caracterizado por  $K_{Ic}$ . Los procedimientos recomendados para el ensayo de  $K_{Ic}$  intentan cumplir estos tres requisitos en probetas de un tamaño que sea económico respecto al uso de material y que se pueda ensayar con facilidad en el laboratorio.

Entre las varias especificaciones para el ensayo de  $K_{Ic}$  la más conocida en el medio es la norma ANSI/ASTM E-399, la cual debe consultarse para conocer los detalles del procedimiento.

Esta norma está definida muy cuidadosamente de modo que se minimicen las variaciones en los valores de  $K_{Ic}$ . Todos los aspectos del ensayo, incluyendo geo-

metría de la probeta, preagrietamiento, determinación de la tenacidad y verificación de la prueba han recibido cuidadosa atención.

Algunas veces se usa el valor  $K_{Ia}$  o sea el valor de la tenacidad obtenido en condiciones dinámicas, generalmente en un ensayo de impacto instrumentado. Para los materiales de alta resistencia  $K_{Ia} \approx K_{Ic}$  y por esta razón se puede usar  $K_{Ia}$  para estimar la tenacidad de fractura.

### 6.2 Uso de $K_{Ic}$ en el diseño.

Los valores de  $K_{Ic}$  en aceros varían desde  $13 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$  en un acero 52100 hasta  $100 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$  en un 4340 templado y revenido a  $425\text{C}$ ; en las aleaciones de aluminio puede variar entre  $14$  y  $50 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ . El concreto tiene un valor de  $K_{Ic}$  entre  $0.13$  y  $1.3 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ , algunos polímeros tienen valores próximos a  $3.0 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ . Lo cierto es que  $K_{Ic}$  para muchos materiales apenas se está determinando.

Los principios de aplicación de  $K_{Ic}$  en el diseño se pueden apreciar a partir del caso simple de una lámina grande con una grieta en el centro, donde:

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (16)$$

Selección del material      Esfuerzo del diseño      Tamaño permisible de la grieta, o tamaño máximo detectable con END.

La relación anterior se puede usar de varias maneras para diseñar contra fractura. Por ejemplo, si en un caso dado el material está definido por otras consideraciones, como resistencia a la corrosión, el valor de  $K_{Ic}$  queda fijado y la tensión de diseño estará determinada en función de la máxima grieta admisible, teniendo en cuenta la sensibilidad de los END. O por el contrario si se permite la presencia de una grieta grande y estable (de modo que se pueda detectar y reparar fácilmente) el esfuerzo de diseño queda fijado y debe ser menor que  $K_{Ic} / \sqrt{\pi a}$ .

En el caso de que la tensión de diseño quede determinada por consideraciones de peso, por ejemplo, el material se puede seleccionar en función de la grieta admisible. En resumen, fijando dos variables, la tercera queda determinada por consideraciones de mecánica de fractura.

Aunque la principal aplicación de los conceptos de tenacidad de fractura se dan en el caso de grietas por fatiga, a continuación se presentan dos ejemplos sencillos para ilustrar los principios enunciados.

Caso 1:

Una placa de aleación de aluminio 7075-T6 tiene una grieta en el centro y está sometida a carga de tracción, con las siguientes características:

$$\begin{aligned}2a &= 10.0'' \text{ (254mm)} \\ W &= 50.0'' \text{ (1.27m)} \\ B &= 0.50'' \text{ (12.7mm)} \\ \sigma_o &= 77000 \text{ psi (531 MPa)} \\ \sigma_u &= 84000 \text{ psi (579 MPa)} \\ K_{Ic} &= 30\text{Ksi } \sqrt{\text{in}} \text{ (33 MPa } \sqrt{\text{m}} \text{ )}\end{aligned}$$

Se quiere determinar si la placa soportará una carga de 160000 lb (712999N). Si es así, determinar el factor de seguridad y el tamaño crítico de la grieta para esta carga.

Para que la fractura ocurra en deformación plana el espesor mínimo B debe ser:  
 $B \geq 2.5 (K_{Ic} / \sigma_o)^2$

$$B = 2.5 (30 \text{ Ksi } \sqrt{\text{in}} / 77 \text{ Ksi})^2 = 0.379 \text{ in (9.6mm)}$$

Como el espesor es de 12.7 mm, el requisito de deformación plana se cumple.

Para la geometría dada:

$$K = \frac{P}{WB} \sqrt{\pi a} \left( \frac{W}{a} \tan \frac{a}{W} \right)^{1/2} = \frac{P}{WB} \left( W \tan \frac{a}{W} \right)^{1/2}$$
$$K = 25.8 \text{ Ksi } \sqrt{\text{in}} = 28.4 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$$

De este modo la carga será soportada con un factor de seguridad de:

$$F.S. = 30/25.8 = 1.16$$

El tamaño crítico de la grieta se obtiene resolviendo:

$$K_{Ic} = \sigma_c \left( W \tan \frac{\pi a_c}{W} \right)^{1/2} \quad \tan \frac{\pi a_c}{W} = \frac{1}{W} (K_{Ic}/\sigma_c)^2$$
$$a_c = (W/\pi) \tan^{-1} \left[ \frac{1}{W} (K_{Ic}/\sigma_c)^2 \right] \quad a_c = 6.6 \text{ in}$$

La grieta crítica es de 13.2 in (335mm).

Caso 2:

Dos metales X y Y de la misma densidad se pueden usar para diseñar una placa de 1,83m de ancho (6 pies) y 3.05m de largo (10 pies). A lo largo de la placa actuará una carga de tracción máxima de 4.5MN y se debe considerar la posible existencia de grietas, las más peligrosas serían las normales al esfuerzo aplicado y que atraviesen el espesor de la placa. Los medios de inspección permiten detectar una grieta mínima de 2.54mm. (0.0100in).

Las propiedades de X y Y son:

	K <sub>Ic</sub>	σ <sub>o</sub>
X =	115 MPa √ m	910 MPa
Y =	95 MPa √ m	1035 MPa

¿Cuál material se recomendaría si la placa debe tener un peso mínimo?

En esencia, se requiere un espesor mínimo y se puede diseñar, a) de modo tradicional, b) usando K<sub>Ic</sub>.

a. Usando la resistencia a la fluencia.

$$\text{Para X, } \sigma_o = \frac{P}{A} = \frac{4.5 \text{ MN}}{B \times 1.83} = 910 \text{ MPa}$$

$$B = \frac{4.5 \text{ MN}}{910 \text{ MPa} \times 1.83 \text{ m}} = 2.7 \text{ mm}$$

$$\text{Para Y, } B = 2.7 \times \frac{910}{1035} = 2.38 \text{ mm}$$

Es obvio que el material con mayor resistencia requiere menor espesor.

b. Diseñando con tenacidad de fractura.

Para estas dimensiones se puede considerar que se cumple la ecuación de la placa infinita.

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c} \quad a_c = 1.27 \text{ mm}$$

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}} = \frac{115}{\sqrt{\pi \times 1.27 \times 10^{-3}}} \text{ MPa} = 1.82 \text{ GPa para X,}$$

Como la tensión de fluencia (910 MPa) es mucho menor que el máximo esfuerzo permisible (1820 MPa) antes de que empiece a crecer la grieta, si usa el metal X el diseño estará gobernado por la cedencia en tracción. Esto también se puede visualizar si se calcula B.

$$B = \frac{4.5 \text{ MN}}{(1.82 \text{ GPa}) (1.83\text{m})} = 1.35 \text{ mm, que es menor que } 2.7 \text{ mm}$$

Para Y,  $\sigma_c = 1.82 \times (55/115) = 870 \text{ MPa}$ .

Este esfuerzo crítico es menor que el esfuerzo de cedencia (1035 MPa), de modo que en este caso el diseño con el metal Y está gobernado por el crecimiento de la grieta;

$$B = 1.35 (1.82/.87) = 2.82 \text{ mm comparado con el valor } 2.38 \text{ mm.}$$

Para el metal X el mínimo valor que satisface los dos criterios de diseño es 2.7mm, mientras que en el metal Y es 2.82mm. En esta situación el metal X que tiene menor  $\sigma_o$  y más alto  $K_{Ic}$  se prefiere para dar un peso mínimo.

Este es un ejemplo esquemático que muestra cómo en ciertas situaciones es necesario diseñar con los criterios de la mecánica de fractura, pero obviamente esto se visualiza mejor en situaciones más críticas por ejemplo en el caso de la falla por fatiga que es una de las más insidiosas; sin embargo, ese es un tema fuera del alcance de esta breve presentación.

Para terminar es bueno señalar que el factor de intensidad de esfuerzos, y por tanto la tenacidad de fractura, están relacionados con la fuerza de extensión de la grieta por las expresiones:

$$K_{Ic} = GE \text{ (tensión plana); } K_{Ic} = [GE/(1 - \gamma^2)]^{1/2} \text{ (deformación plana)}$$

Es evidente que los factores  $K_{Ic}$  que se usen en el diseño deben haber sido estimados de una manera muy cuidadosa y por ello el ensayo debe ser muy riguroso, requiriéndose en general equipo especial como las máquinas electrohidráulicas(12). Este parámetro  $K_{Ic}$  es un criterio de fractura sólo en condiciones de deformación plana, es decir dentro del dominio de la MLEF muy adecuado para materiales de alta resistencia.

Cuando las posibilidades de deformación plástica son apreciables por cualquier razón, ya no es válido este criterio y habrá que acudir a otros parámetros válidos en la región elastoplástica y plástica, esos criterios son el desplazamiento de apertura de la grieta, las curvas R, la integral J, y el criterio de la energía liberada o criterio T, pero éstos son temas adecuados tal vez para futuras presentaciones.

## BIBLIOGRAFIA

1. Tetelman, A.S. and A.J. McEvily. *Fracture of Structural Materials*. John Wiley, New York, 1967.
2. Hertzberg, R.W. *Deformation and Fracture of Engineering Materials*. John Wiley, New York, 1976.
3. Mattos, R.J. *Mecánica de fracturas*. Curso dictado en la U.P.B., Medellín, 1976.
4. Caddell, R.M. *Deformation and Fracture of solids*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1980.
5. Liu, H.W. "On the fundamental basis of fracture mechanics". *Engineering fracture mechanics*. 17(5), 1983, p.425.
6. Eshelby, J.D. "Fracture mechanics". *Science Progress*. 59, 1971, p.161.
7. Knott, J.F. *Fundamentals of fracture mechanics*. Halsted Press, Toronto, 1979.
8. Isida, M. "On the determination of stress intensity factors for some common structural problems". *Engineering fracture Mechanis*. 2, 1970, p.61.
9. Cetlin, P.R. e P.S. Pereira da Silva. *Análise de fraturas*. ABM, Sao Paulo, 1981.
10. Jones, D.L. "Practical applications of fracture mechanics". *Metal Progress*. March, 1982, p.64.
11. Meyers, M.A. e K.K. Chawla. *Principios de metalurgia mecánica*. Cap. 3. Editora Edgar Blucher, Ltda. Sao Paulo, 1982.
12. Churchill, R.W. "The equipment and techniques used in fracture mechanics". MTS Systems Corp. Minneapolis, 1971.