

Una breve introducción a la mecánica de la fractura

Por: Rodrigo J. Mattos*
Asdrúbal Valencia**

Al lector:

Al escribir el presente artículo, no ha sido nuestra intención hacer un análisis profundo ni detallado de los conceptos en los cuales se basa la teoría moderna de la mecánica de Fractura.

Más bien el objetivo ha sido dar al lector una revisión general de los principios fundamentales de tan importante campo de la Ingeniería que poca o ninguna aplicación ha tenido en nuestro medio.

1. INTRODUCCION

El desarrollo de la Mecánica de la Fractura ha sido relativamente reciente y ha ocurrido a una tasa de progreso y hasta un nivel de sofisticación tales, que ha dejado atrás el diseño tecnológico.

La necesidad de la Mecánica de la Fractura ha sido espectacularmente demostrada primero por las fallas devastadoras de recipientes a presión, barcos, aviones, puentes, edificios, etc., los cuales han ocurrido a niveles de esfuerzos llamados "seguros" (inferiores al esfuerzo de cedencia σ_y) y a menudo a bajas temperaturas y segundo, por ciertos avances tecnológicos ocurridos durante los últimos 25 años, entre éstos la introducción de aleaciones estructurales de alta resistencia, el aumento de los esfuerzos de trabajo basado en los altos esfuerzos de cedencia, el uso de procedimientos de diseño límite como también el uso de secciones gruesas en ciertas aplicaciones y la unión de componentes por soldadura; estos factores inadvertidamente se han combinado para reducir a un nivel crítico la capacidad del material para absorber la deformación plástica local sin fractura.

La mecánica de la Fractura tuvo su origen en el concepto de la grieta de Griffith (1)* en 1920. En forma simplificada, Griffith propuso que una grieta (defecto) se propagaba cuando la energía de deformación aplicada se hacía igual a la energía superficial asociada con tal grieta. Los primeros experimentos realizados para comprobar esta teoría mostraron una buena correlación en materiales frágiles como el vidrio, pero muy pobre en materiales dúctiles como el acero.

Esta discrepancia se ha atribuido al trabajo plástico en la vecindad de la grieta antes de la fractura.

Después de los trabajos de Griffith, la Mecánica de Fracturas atravesó por un período de relativo estancamiento hasta que Westergaard (2) hizo una publicación revolucionaria sobre el tratamiento matemático de la distribución de esfuerzos en una grieta en términos de funciones complejas de esfuerzos. Esta publicación y el ímpetu dado por las fallas catastróficas ocurridas en varias partes, revivieron el interés en la Mecánica de Fractura y desde ese entonces ha continuado progresando a una tasa cada vez mayor.

El campo de la Mecánica de Fracturas se puede dividir en cuatro grandes áreas:

1. El análisis de los esfuerzos producidos por la presencia de la grieta.
2. La tenacidad de fractura.
3. La propagación de una grieta bajo condiciones de fatiga.
4. La fractura frágil (estática) debido al medio (fractura por esfuerzo, corrosión).

Esta presentación sólo tratará sobre algunos aspectos de la tenacidad de fractura, pero no se despreciará la importancia del análisis de esfuerzos en la vecindad de la punta de la grieta. Algunos de los tópicos que se mencionarán incluyen el desarrollo elástico del factor de intensidad de esfuerzo, K ; la presencia de un valor crítico de K_{Ic} , K ; la medida de la tenacidad de fractura en materiales de alta y baja resistencia y finalmente, una breve aplicación de los anteriores conceptos a un problema práctico.

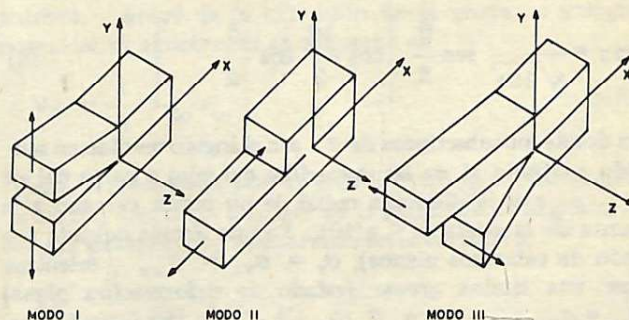


Figura 1. Modos básicos de carga que comprenden diferentes desplazamientos de la superficie de la grieta.

* Ph.D., Gerente de la Zona Central del Cerrejón. Guajira.

** G.M. Sc., Jefe Depto. Ing. Metalúrgica, Universidad de Antioquia.

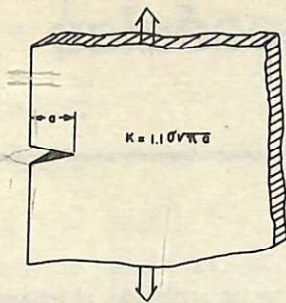


Figura 2. Lámina infinita con una grieta.

2. EL CONCEPTO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZO

El factor de intensidad de esfuerzo, K tiene su origen en la teoría de la elasticidad y es un parámetro que mide la elevación local del esfuerzo en la punta de una grieta. La interpretación de K depende de la forma de carga, éste es, del modo de apertura de la grieta.

Existen tres modos de extensión de la grieta los cuales se han denotado por los modos I, II y III y cuyos significados se ilustran en la figura 1. El caso más comúnmente considerado es el modo I o "modo de apertura".

Para ilustrar el concepto del factor de intensidad de esfuerzo, el caso más utilizado está basado en la solución elástica de una lámina infinita que contiene una grieta a través de su espesor. Como se ilustra en la figura 2, la grieta se asume que es aguda y que el material es linealmente elástico, isotrópico y homogéneo. El estado de esfuerzo en las cercanías de la punta de la grieta en tal lámina (figura 3), ha sido determinado y en coordenadas polares está dada por:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\cos \frac{3\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (3)$$

en donde los subscripts de σ son el ángulo medido en sentido contrario al de las manecillas del reloj a partir del eje x , y r es la distancia radial de un punto cercano a la punta de la grieta ($r < a/10$). En una lámina delgada (estado de esfuerzos planos), $\sigma_z = \sigma_{xz} = \sigma_{yz}$ mientras que una lámina gruesa (estado de deformación plana) $\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$ y $\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y)$. En este último caso, los desplazamientos u (en la dirección X), v (en la dirección Y) y ω (en la dirección z) de un punto (r, θ) cercano a la punta de la grieta están dados por:

$$\mu = \frac{K_I}{\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[\frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 + \nu} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (4)$$

$$\nu = \frac{K_I}{\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[\frac{(1 - \nu^2)}{1 + \nu} - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (5)$$

$$\omega = 0 \quad (6)$$

Para el caso de esfuerzos planos, el término $-2\nu^2$ de la ecuación (4) desaparece y el término $(1 - \nu^2)$ de la ecuación (5) se reemplaza por 1. μ es el módulo de cizalladura.

En la ecuación (1) a (3), K_I es el factor de la intensidad de esfuerzo para el modo I de apertura de grieta. Se debe notar que el denominador de cada ecuación es $\sqrt{2\pi r}$ consecuentemente, a medida que r se hace más pequeño (más cercano a la punta de la grieta) los esfuerzos se hacen más grandes y eventualmente cuando $r = 0$, éstos se hacen infinitos. Este hecho se conoce como una singularidad en la raíz cuadrada de r y es un resultado común en la mayoría de las soluciones de los problemas de grietas. El parámetro K_I es una medida de magnitud de los esfuerzos y de la influencia de la geometría en la región cercana a la punta de la grieta.

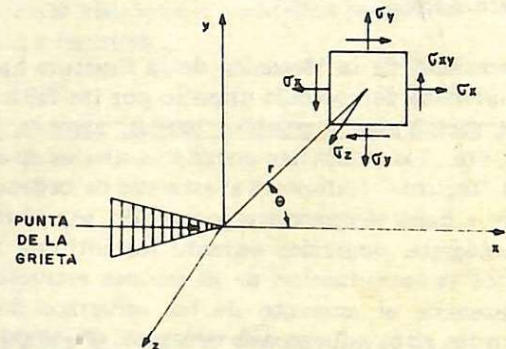


Figura 3. Estado de esfuerzos en la vecindad de la punta de una grieta con las coordenadas mencionadas en el texto

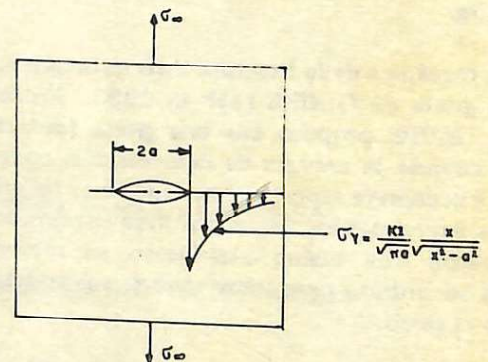


Figura 4. Configuración antes de la extensión de la grieta.

En el caso de la lámina infinita mostrada en la figura 2, K_I se puede determinar exactamente, éste es:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

en donde σ es el esfuerzo aplicado a la lámina en el infinito. Como las láminas infinitas son de una ocurrencia improbable en la mayoría de los problemas de ingeniería, debemos entonces limitarnos a formas geométricas finitas. Si la lámina infinita de la figura 2 se reduce en tamaño a una lámina finita que contiene una grieta en su centro a través de su espesor, el factor de intensidad de esfuerzo tiene la misma forma dada en la ecuación (7) pero con un factor de corrección por tamaño (7, 8), $F(a/W)$. Por lo tanto, la ecuación (7) se convierte en:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[\sec(\pi a/W) \right] \quad (8)$$

en donde "a" es la mitad de la longitud de la grieta y "W" es el ancho de la lámina. Se han desarrollado otros factores de correlación $F(a/W)$ para muchas geometrías con diversas grietas y modos de apertura de las mismas (6).

Hasta ahora el concepto del factor de intensidad de esfuerzo solamente ha sido útil para describir el estado de esfuerzo en la punta de la grieta. El resultado más útil y más importante es el hecho de que existe un valor crítico de K , llamado K_c alcanzado el cual comienza la extensión de la grieta. A menudo éste determina el nivel de intensidad de esfuerzo necesario para la ocurrencia de fractura inestable (rápida). Por consiguiente, dado el tamaño de grieta (a) y el valor crítico del factor de intensidad de esfuerzo (K_c), el esfuerzo de fractura (τ_f) se puede fácilmente calcular: esta relación se muestra para un caso general en la figura 4. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, τ_f está basado en el factor de intensidad de esfuerzo mínimo resultante del modo I en deformación plana y se ha denotado por K_{IC} . Para otros problemas distintos a los de deformación plana, K_c ha sido determinado, pero su uso debe hacerse con discreción.

La distinción entre K_c y K_{IC} se discute con más detalles en las secciones siguientes.

3. LA FUERZA DE LA EXTENSION DE LA GRIETA O LA RATA DE LIBERACION DE LA ENERGIA DE DEFORMACION G

Otro parámetro que expresa los efectos de una grieta aguda en un cuerpo es el denominado "fuerza de extensión de la grieta" G.G. se define en términos de la energía requerida para extender una grieta una distancia infinitesimal o sobre un área infinitesimal:

$$G = \frac{\partial V}{\partial A} \quad (9)$$

en donde V es la energía elástica de deformación almacenada en el cuerpo y A es el área agrietada.

Experimentalmente, el parámetro G, se determina de la siguiente manera. Consideramos un cuerpo elástico de espesor uniforme, B, que contiene una grieta de longitud a y que se carga como se muestra en la figura 5. A medida que la carga ρ aumenta, el desplazamiento δe , del punto de carga A, también aumenta. El diagrama carga-desplazamiento se muestra en la figura 6.

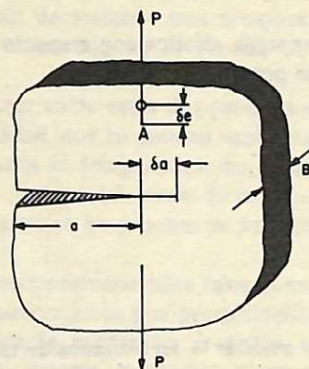


Figura 5. Modo de carga para determinar G.

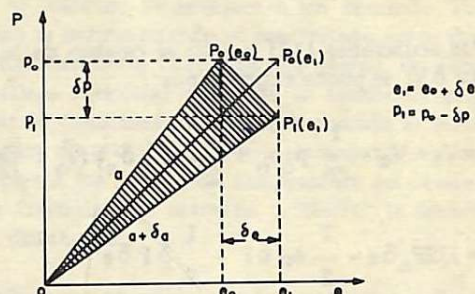


Figura 6. Diagrama carga - desplazamiento para la determinación de G.

Cuando la carga es ρ_0 y el desplazamiento del punto de carga es e_0 , considérese un experimento ficticio en el cual la grieta se extiende un pequeño incremento δa . Debido a este pequeño incremento de extensión de la grieta, δa , el punto de carga se desplaza un incremento δe y la carga decrece un incremento δp , como se muestra en la figura anterior. Antes de la extensión de la grieta, la energía potencial V_1 almacenada en el cuerpo es:

$$V_1 = \frac{1}{2} \rho_0 e_0 \quad (10)$$

y está representada por el área del triángulo rectángulo de vértice (ρ_0, e_0). Después de la extensión de la grieta, la energía potencial V_2 almacenada en el cuerpo es:

$$V_2 = \frac{1}{2} (\rho_0 - \delta p) (e_0 + \delta e) \quad (11)$$

y está representada por el área del triángulo rectángulo del vértice (ρ_i, e_i). En el proceso de extensión de la grieta, el

cambio de la energía potencial $V_2 - V_1$ es representado por la diferencia de área de las regiones rayadas en la anterior figura: una región vertical rectangular y una región diagonal triangular.

Promediando sobre un pequeño incremento de longitud de grieta δa , G es:

$$GB\delta a = V_2 - V_1 = \delta V \quad (12)$$

el cambio de la energía elástica con respecto al área de la grieta está definido por:

$$G = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta V}{\delta A} \quad (13)$$

Donde:

$$\delta A = B \delta a$$

Es conveniente evaluar G en términos de la deformación C del espécimen definido por:

$$e = CP \quad (14)$$

De las ecuaciones (11) y (12) el cambio de la energía potencial δV , se puede expresar por:

$$\delta V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2} P_0 e_0 + \frac{1}{2} (P_0 - \delta P) (e_0 + \delta e) \quad (15)$$

$$\delta V = 1/2 P_0 \delta e - \frac{1}{2} e_0 \delta P - \frac{1}{2} \delta P \delta e \quad (16)$$

De la ecuación (14) se obtiene:

$$\delta e = C \delta P + P \delta C \quad (17)$$

Sustituyendo las ecuaciones (17) y (14) en la ecuación (16), se obtiene:

$$\delta V = \frac{1}{2} P_0 C \delta P + \frac{1}{2} P_0^2 \delta C - \frac{1}{2} C P_0 \delta P - \frac{1}{2} \delta P \delta e \quad (18)$$

Despreciando el producto: $\frac{1}{2} \delta P \delta e$

$$V = \frac{1}{2} P_0^2 \delta C \quad (19)$$

$$G = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{1}{2} P_0^2 \frac{\delta C}{\delta A} = \frac{1}{2} P_0^2 \frac{\partial C}{B \partial a} \quad (20)$$

La ecuación (20) indica que G es independiente de la rigidez de la estructura rodeante o de la máquina de ensayo y depende solamente del cambio de la deformación del miembro agrietado con respecto al área de la grieta.

$$\frac{1}{B} \cdot \frac{\partial C}{\partial a}$$

Relación entre K y G . Con referencia en la figura 5 la extensión δa de la grieta de longitud $2a$, produce un cambio en la energía de deformación elástica del miembro. El cálculo de la energía de deformación elástica producida al cerrar la grieta (el inverso de la extensión de la grieta) devuelve esta energía al miembro y conlleva a la relación deseada entre K y G . Para este cálculo, es conveniente eliminar el trabajo externo fijando los puntos de carga. En la figura 7 la grieta se cerrará sobre una pequeña longitud α , inicialmente la punta de la grieta se encuentre en el origen $X'Y'$, las superficies de las grietas están libres de esfuerzos y los desplazamientos iniciales de las superficies de la grieta están dados por las ecuaciones (4) y (5) con $\theta = \pi$. Después que la grieta se ha cerrado una longitud α , la punta de la grieta se encuentra ahora en el origen de XY , los esfuerzos sobre la longitud α están dados por las ecuaciones (1) a (3) con $\theta = 0$, y los desplazamientos finales son cero (en el eje X). Como el material se asume que es linealmente elástico, el trabajo de cierre de la grieta $\delta W''$ está dado por:

$$\delta W'' = 2 \int_0^{\alpha} \frac{1}{2} \sigma_y v dx \quad (21)$$

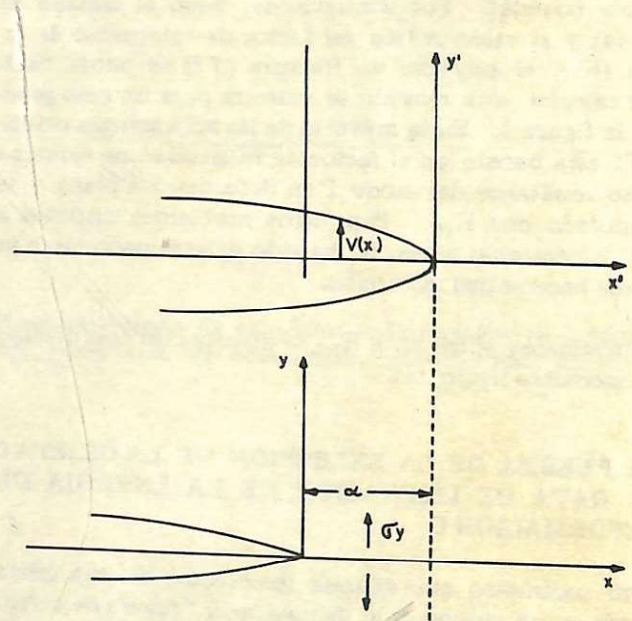


Figura 7. Diagrama que muestra el cierre parcial de la grieta sobre la distancia α

Este trabajo de cierre de la grieta $\delta W''$, es equivalente al cambio promedio de la energía de deformación elástica en una pequeña longitud α durante la extensión de la grieta. Por lo tanto, $G\alpha = \delta W''$ y,

$$G = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\delta W''}{\alpha} = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{2}{\alpha} \int_0^{\alpha} \frac{1}{2} \sigma_y \nu_x \quad (22)$$

En la integral es necesario conocer el desplazamiento ν relacionado al origen de XY evaluado para $\theta = \pi$, midiendo del origen XY, $r = x$ y el desplazamiento inicial está dado por la ecuación (5).

$$\nu \left| \begin{array}{l} r = x \\ \theta = \pi \end{array} \right. = \frac{4K}{E} \left(\frac{x}{2\pi} \right)^{1/2} \quad (23)$$

en donde $E = E$ para esfuerzos planos y $E' = E(1 - \nu^2)^{-1}$ para deformación plana. El valor final de ν al cerrar la grieta es por supuesto cero. También es necesario conocer el esfuerzo inicial σ_y relacionado al origen de XY evaluado para $\theta = 0$. Como la variable x está medida desde el origen XY la variable r en la ecuación (2) se hace $r = (\alpha - x)$, el esfuerzo es entonces:

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi(\alpha - x)}} \quad (24)$$

Sustituyendo la ecuación (23) y (24) en la ecuación (22) se obtiene:

$$G = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \left[\frac{2K^2}{\alpha \pi E'} \int_0^{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha - x} \right)^{1/2} dx \right] \quad (25)$$

La integral en la ecuación (25) es:

$$\int_0^{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha - x} \right)^{1/2} dx = \left[-x^{1/2} \alpha - x + \sin^{-1} \sqrt{\frac{x}{\alpha}} \right]_0^{\alpha} = \frac{\alpha \pi}{2} \quad (26)$$

De la ecuación (25) y (26), G es entonces:

$$G = \frac{K^2}{E'} \quad (27)$$

Sustituyendo valores apropiados de E' obtenemos:

$$\text{Esfuerzos planos: } G = K^2/E \quad (28)$$

$$\text{Deformación plana } G = K^2(1 - \nu^2)/E$$

4. LA TENACIDAD DE FRACTURA COMO UNA PROPIEDAD DEL MATERIAL

El concepto de la tenacidad de fractura proviene del factor crítico de intensidad de esfuerzo, K_{IC} . Como anteriormente se mencionó la fractura ocurrirá cuando la intensidad del esfuerzo en la punta de la grieta se haga igual al valor crítico del factor de intensidad de esfuerzo: ésto es, para un

material dado, los parámetros de tenacidad de fractura K_{IC} y G_c , son una medida de la resistencia del material a la fractura. El valor de K_{IC} es, sin embargo, particular para cada material, y es función de factores tales como la temperatura, la microestructura (tratamiento térmico), la composición química, la limpieza del material, la velocidad de deformación, la resistencia a la cedencia y la anisotropía.

A diferentes temperaturas de ensayo o las pruebas de K_{IC} , en aceros han demostrado una temperatura de transición similar a la observada en la prueba de impacto Charpy.

Sin embargo entre estas dos pruebas existe una diferencia: la tenacidad por lo general aumenta rápidamente una vez sobrepasada la temperatura de transición y a menudo no se hace horizontal para formar un límite superior como se observa en las pruebas de impacto Charpy. (9, 10).

Factores microestructurales tales como los ocurridos durante el endurecimiento por precipitación en aleaciones de aluminio y en la martensita revenida en aceros tratados térmicamente ejercen marcados efectos en la tenacidad de fractura. En aleaciones de aluminio endurecidas por el tratamiento de precipitación, la tenacidad de fractura es mayor en el estado del tratamiento de solución y decrece cuando el material se envejece a un revenido T6. Este fenómeno se invierte cuando el precipitado crece durante el sobre envejecimiento (11). En los aceros, las estructuras martensíticas revenidas muestran la tendencia general de aumentar la tenacidad de fractura cuando se aumenta la temperatura de revenido (12-16), sin embargo, en los aceros susceptibles a los rangos de temperatura en donde se presenta la fragilidad de revenido a 260°C, la tenacidad de fractura disminuye.

Las adiciones químicas, pueden aumentar o disminuir la tenacidad de fractura. Por ejemplo, en las aleaciones de aluminio, las adiciones de Mg tienden inicialmente a aumentar la tenacidad de fractura mientras que las adiciones de Zn causan una reducción inmediata de ésta (11). Similarmente, en los aceros las adiciones de Ni y Mo mejoran la tenacidad de fractura (17) y la temperatura de transición, pero el S, causa una reducción de la primera (11).

Recientemente la limpieza de los aceros ha sido categorizada en términos de la tenacidad de fractura. Pellini (18) y Banerjee (16) han observado que la tenacidad de fractura mejora notablemente a medida que el acero se hace más limpio. La desgasificación al vacío y la fusión y refusión por el proceso de la electro-escoria han proporcionado valores más altos en la tenacidad y la dificultad; estas ventajas sin embargo, son prácticas solamente para los aceros más costosos: los aceros llamados ultra especiales de alta resistencia.

La rata de deformación puede afectar marcadamente la tenacidad de fractura. No todos los materiales son sensitivos a las ratas de deformación, pero aquellos que lo son a menudo muestran grandes cambios en la tenacidad de fractura, K_{IC} (19, 20).

La resistencia a la cedencia es quizá el factor que más potencialmente afecta la tenacidad de fractura, decrece rápidamente cuando la resistencia a la cedencia sobrepasa los 110 MPa. Este descenso de tenacidad, es, desafortunadamente un hecho de la naturaleza porque es a estos altos niveles de esfuerzo que la tenacidad de fractura es crítica. Esto es, a medida que la tenacidad decrece, el tamaño de la grieta necesaria para producir la fractura también decrece, como también aumentan las dificultades de detección (por ultrasonido, por ejemplo).

Por último la orientación de la grieta aumenta la resistencia a la fractura del componente. En muchos casos se ha observado que las grietas alineadas en la dirección de la laminación son mucho menos severas que aquellas alineadas transversalmente (21). Esto es, la tenacidad de fractura depende de la anisotropía del material y, en una gran extensión de la orientación de las inclusiones alargadas.

5. EL EFECTO DEL TAMAÑO DEL ESPECIMEN EN LA TENACIDAD DE FRACTURA

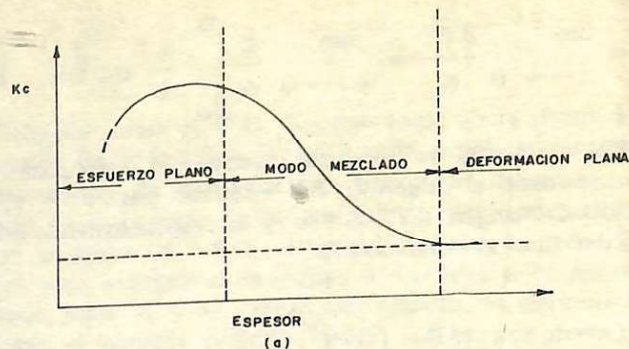
Hasta ahora sólo se han discutido los factores intrínsecos de material que afectan la tenacidad de fractura.

Sin embargo, aunque la tenacidad de fractura de un material particular depende definitivamente de la composición metalúrgica, el estado de esfuerzos en la punta de la grieta debido al tamaño del espécimen, altera drásticamente la tenacidad de fractura, este concepto a menudo se refiere como el "criterio de espesor" (22), cuyo efecto es ilustrado en la figura 8.

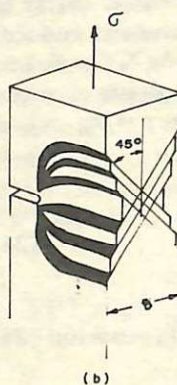
En esta figura se ve el valor crítico del factor de intensidad de esfuerzo (K_c) alcanza un máximo a pequeños espesores. El valor exacto del espesor en donde este máximo ocurre depende del material y de la resistencia.

También se observa en esta figura que la tenacidad de fractura decrece a ambos lados del máximo, sin embargo es de mayor interés el decrecimiento de éste cuando el espesor aumenta. Cuando el espesor (B) aumenta, K_c , decrece aproximadamente a un valor constante denotado por K_{IC} .

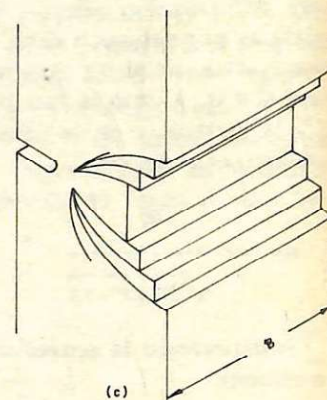
Este es el valor más bajo posible de la tenacidad de fractura obtenido bajo el modo I de carga y se conoce como la "tenacidad de fractura en deformación plana". Los dibujos de los especímenes en la figura 8 ilustran los efectos del espesor en el constreñimiento en la punta de la grieta. El espécimen de la izquierda muestra las líneas de deslizamiento a 45° asociados con secciones delgadas. Como el material en la dirección z se contrae cuando éste se carga, en la punta de la grieta existe entonces un campo de deformación tridimensional y un campo de esfuerzos bidimensional. Estas condiciones se refieren como esfuerzos planos y a menudo producen superficies de fractura tipo oblicuas. El espécimen en el lado derecho de la figura 8 (especimen grueso), muestra un conjunto diferente de líneas de deslizamiento. En este caso no hay deformación en la dirección



a. EFECTO DEL ESPESOR DE LA PROBETA SOBRE EL FACTOR CRÍTICO DE INTENSIDAD DE ESFUERZOS



b. ESFUERZO PLANO



c. DEFORMACION PLANA

DEFORMACION EN LA PUNTA DE LA GRIETA

Figura 8. Criterio del espesor.

z , i, e: $\epsilon_z = 0$ y por lo tanto existe un estado triaxial de esfuerzo en la punta de la grieta $\sigma_z = \sigma_x + \sigma_y$ o sea condición de deformación plana. En este tipo de deformación la superficie de fractura generalmente es plana. En los espesores intermedios, las líneas de deslizamiento están compuestas por ambos tipos y muestran fracturas oblicuas en las superficies libres y fractura plana en su interior. El estado triaxial de esfuerzos es responsable del decremento de la tenacidad de fractura a un valor mínimo K_{IC} . El grado de constreñimiento, en deformación plana, que asegura reproducibilidad ha sido establecido para materiales de alta resistencia y de baja tenacidad en términos del criterio de espesor y de longitud de grieta, esto es, si

$$\frac{B}{a} \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (29)$$

entonces,

$$K_c = K_{IC} \quad (30)$$

6. EL EFECTO DE LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES EN LA MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA

En la sección anterior se discutió el efecto del tamaño

del espécimen en la tenacidad de fractura, principalmente en términos del factor crítico de intensidad de esfuerzo, K_{Ic} . Los mismos requerimientos se aplican a la medida de la tasa crítica de la liberación de la energía de deformación, G_c ; i, e, el criterio de Griffith de extensión de la grieta. Sin embargo se pueden utilizar métodos y consideraciones diferentes de medidas dependiendo de la resistencia del material.

La Mecánica de la Fractura linealmente elástica ha alcanzado un grado de sofisticación tal que caracteriza exactamente la fractura en materiales de alta resistencia (23) mientras que el análisis para materiales de baja resistencia y bajo grado de constreñimiento en la punta de la grieta es todavía objeto de desarrollo.

Como se menciona en la introducción, la hipótesis original de Griffith de la extensión de la grieta basada en consideraciones de la energía superficial no se puede aplicar adecuadamente a los metales que exhiben grandes cantidades de deformación plástica. Aunque es imposible eliminar totalmente la zona plástica en la punta de la grieta proveniente del alto factor de intensidad de esfuerzo, ésta sin embargo puede mantenerse pequeña. En la terminología de la Mecánica de la Fractura esto es conocido como "cedencia en pequeña escala" (23).

En la Mecánica de la Fractura linealmente elástica, la pequeña zona plástica se idealiza como un cilindro de radio r_p a lo largo de la longitud de la punta de la grieta (24) como se muestra en la figura 9. El material dentro del cilindro se asume que está sometido a un estado de esfuerzos constantes. El radio de la zona plástica r_p es función de la tenacidad de fractura en deformación plana y de la resistencia de cedencia y está dada por (22):

$$r_p = \frac{1}{\beta \pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (31)$$

En donde β es una constante igual a 2 para esfuerzos planos o a 6 para condiciones de deformación plana. La anterior ecuación se obtiene de la ecuación (2) haciendo $\sigma_y = \sigma_y$ (el esfuerzo de cedencia del material) y evaluándola para $\theta = 0$.

El tamaño de la zona plástica refleja la longitud de la grieta en el componente. Es decir, la longitud de la grieta plásticamente corregida es:

$$a' = a + r_p \quad (32)$$

En materiales de alta resistencia el tamaño de la zona plástica es pequeño y por lo tanto puede despreciarse: sin embargo en materiales de baja resistencia, ésta está lejos de ser despreciable y por lo tanto se debe incorporar en el cálculo de tenacidad de fractura.

Con referencia a la lámina finita que contiene una discontinuidad (grieta) a través de su espesor el factor crítico

de intensidad de esfuerzo según la expresión (8), es entonces:

$$K = \sigma \sqrt{\pi(a+r_p)} \left[\sec \frac{\pi(a+r_p)}{W} \right]^{1/2} \quad (33)$$

Los requerimientos de tamaño de especímenes y los métodos estándar de la medida de la tenacidad de fractura dentro del contexto de la Mecánica de la Fractura linealmente elástica se describen en las referencias 25 y 26.

La tenacidad de fractura de los materiales de baja resistencia y de alta tenacidad a menudo es difícil de medir utilizando las técnicas de la Mecánica de la Fractura linealmente elástica. La principal dificultad en estos materiales proviene de la cedencia en gran escala, i, e; plasticidad masiva en la punta de la grieta, requiriendo especímenes muy grandes, capaces de producir el constreñimiento necesario en la punta de la grieta. A menudo el ligamento no agrietado es elastoplástico o totalmente plástico cuando se carga el espécimen, lo cual hace los resultados de la mecánica de la Fractura linealmente elástica de dudosa validez. Afortunadamente, sin embargo, aunque puede prevalecer considerable plasticidad en el ligamento adyacente no agrietado, la grieta retiene su naturaleza singular.

El avance más reciente en la medida de la tenacidad de fractura en materiales de baja resistencia ha sido mediante

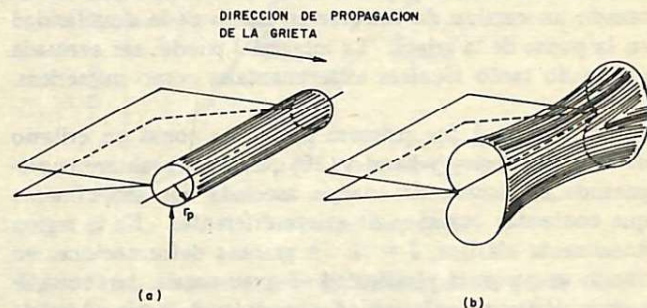


Figura 9. Ilustración de la zona plástica en la punta de la grieta. a. Ideal - b. Placa de espesor finito.

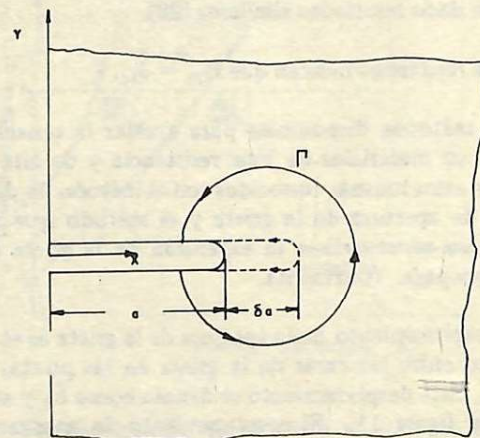


Figura 10. Definición de la integral J.

el uso de la integral J , propuesta por J.R. Rice (27). Con referencia a la figura 10, J es definida por:

$$J = \int_{\tau} \left(v dy - T \frac{\partial \mu}{\partial x} ds \right) \quad (34)$$

En donde v es la densidad de la energía de deformación definida por:

$$u = u(x, y) = \int_0^{\xi} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

$\xi = E \epsilon_{ij}$ es el tensor infinitesimal de deformación, τ es una curva que rodea la punta de la grieta. T es el vector tracción definido de acuerdo a la normal hacia afuera y a lo largo de τ , $T_i = \sigma_{ij} n_j$ y u es el vector de desplazamiento y ds es un elemento de longitud de arco a lo largo de τ . La integral es evaluada en sentido contrario al de las agujas del reloj comenzando de la superficie plana inferior de la grieta y continuando a lo largo del recorrido de τ hasta la superficie plana superior.

La integral J es una herramienta poderosa que es aplicable a estados de esfuerzos linealmente elásticos, elasto-plásticos y totalmente plásticos. Esta integral es independiente del recorrido y por lo tanto puede ser evaluada tomando un camino de integración lejano de la singularidad en la punta de la grieta. La integral J puede ser evaluada utilizando tanto técnicas experimentales como numéricas.

La integral J fue primero propuesta como un criterio de falla por Begley y Landes (28) quienes la evaluaron comparando el cambio de energía asociada con especímenes que contenían tamaños de grieta diferentes. En la región linealmente elástica, $J = G$. A grandes deformaciones en donde se presenta plasticidad en gran escala, también se incluye el trabajo plástico. Las medidas de la tenacidad de fractura, hasta ahora, de G_{Ic} (medida en grandes especímenes por métodos de Mecánica de la Fractura linealmente elástica y J_{Ic} (medida en especímenes mucho más pequeños) han dado resultados similares (28).

Estos resultados indican que $G_{Ic} = J_{Ic}$.

Hay métodos disponibles para evaluar la tenacidad de fractura en materiales de baja resistencia y de alta tenacidad. De estos los más conocidos son el método de desplazamiento de apertura de la grieta y el método que mide el cambio en resistencia a la extensión de la grieta cuando ésta se propaga. (Curvas R).

El desplazamiento de la apertura de la grieta es el desplazamiento entre las caras de la grieta en las puntas físicas de ésta. Este desplazamiento se denota como δ_I y se muestra en la figura 11. El desplazamiento de apertura de la grieta es un desplazamiento que ocurre muy cercano al momento de separación y, debido a que hay un camino fi-

nito de deformación en la punta de la grieta, δ_I está claramente definido a cargas bajas cuando la zona plástica es pequeña. A cargas altas cuando la zona plástica es grande y aún en el rango de cedencia de la sección recta, el parámetro, σ_I se puede utilizar para caracterizar la fractura en forma equivalente a G_I o K_{Ic} y se puede expresar en términos de estas cantidades, esto es, para esfuerzos planos:

$$\delta_I = \frac{4}{\pi} \frac{K_{Ic}^2}{E \sigma_y} = \frac{4}{\pi} \frac{G_I}{\sigma_y} \quad (36)$$

Las curvas R describen el cambio de energía necesaria para continuar la extensión de la grieta (29). Estas curvas también se pueden utilizar para describir el comportamiento tanto en materiales de alta como de baja resistencia y además son aplicables tanto a altos como bajos confinamientos (21, 30) en la punta de la grieta. R (resistencia) se puede medir en cualquiera de los parámetros apropiados a la figura 12 las curvas inferiores representan la resistencia de la grieta en materiales de baja tenacidad (materiales "frágiles"). Las curvas idénticas 1, 2, 3 a diferentes longitudes iniciales de grieta indican que la resistencia depende solamente del cambio de la longitud de la grieta y no de la

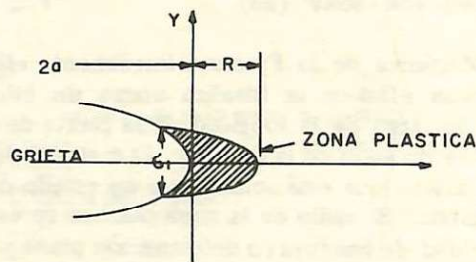


Figura 11. Esquema del desplazamiento de apertura de la grieta δ_I .

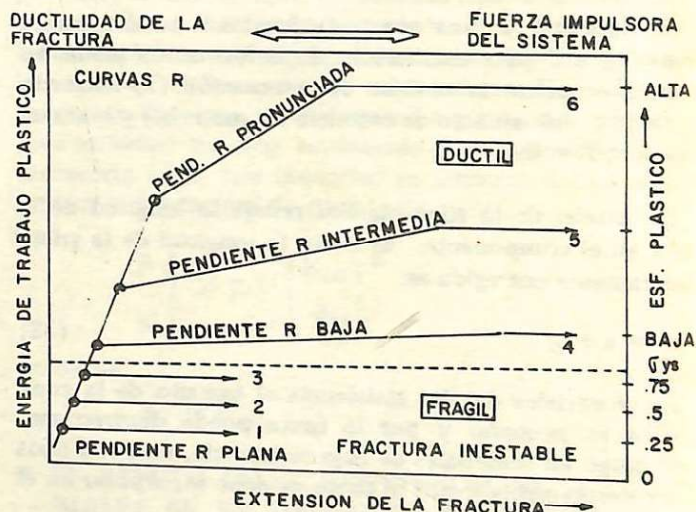


Figura 12. Diagrama de curva R generalizado con un sistema de clasificación de tenacidad de fractura de 6 niveles.

longitud inicial de la misma. Las curvas de fuerza de extensión de la grieta G , las cuales varían linealmente con la longitud de la grieta, se dibujan intersectando cada curva en un punto de tangencia. Este es el punto de inestabilidad o en donde la fuerza de extensión de la grieta es igual a la resistencia, i. e. G_c . Las curvas para materiales frágiles (al pie) muestran que G_c es aproximadamente constante e independiente del tamaño de la grieta debido al cambio abrupto a un valor constante de R en las curvas de resistencia. Similarmente en las curvas superiores se aumenta cuando la grieta se extiende debido a que la resistencia a la extensión de la grieta también aumenta; los materiales de este tipo sufrirán una excesiva deformación antes de fracturarse.

7 APLICACIONES DE LA MECANICA DE FRACTURA EN LA FATIGA

La falla de los componentes estructurales como un resultado de las cargas cíclicas ha sido un gran problema de diseño desde hace mucho tiempo, lo cual ha generado numerosas investigaciones sobre el crecimiento de grieta por fatiga. Aunque se dispone de una enorme cantidad de datos sobre fatiga, la mayoría de estos están relacionados con el esfuerzo nominal requerido para producir la fractura en un número dado de ciclos, específicamente la curva S. N. Tales datos generalmente son obtenidos en laboratorios en especímenes pulidos, y aunque de alguna utilidad cualitativa en la selección de materiales, éstos no indican el efecto de las discontinuidades o de los concentradores de esfuerzo en la resistencia o la fatiga. Los límites de fatiga obtenidos de las curvas convencionales S. N. sólo muestran el esfuerzo nominal máximo necesario para evitar la iniciación de una grieta, sin embargo, en los componentes estructurales en servicio estos esfuerzos nominales se exceden fácilmente en las discontinuidades, o en los puntos de concentración de esfuerzo.

Por consiguiente, utilizando este método, el tiempo (ciclos) predicho de falla de un componente o estructura dada, puede estar severamente subestimado.

La vida en fatiga de una estructura se puede considerar que consiste de tres etapas distintas: (a) la iniciación de la grieta, (b) la propagación de grieta, (c) la fractura rápida (final). La presencia de defectos pre-existentes actuarán como concentradores de esfuerzos y a su vez, reducirán o eliminarán la etapa de iniciación. En muchas consideraciones de diseño, la segunda etapa o aquella de crecimiento de las grietas por fatiga es la de mayor importancia, ya que es realístico asumir que alguna forma de discontinuidad está presente en la estructura inicialmente.

A medida que una grieta crece por fatiga bajo una carga cíclica constante la intensidad del esfuerzo en la punta de la grieta aumenta debido al aumento en el esfuerzo aplicado y en la longitud de la grieta. Eventualmente la grieta crece lo suficiente para que la intensidad del esfuerzo sea igual al valor crítico K_{IC} , al cual ocurre la fractura rápida.

La dependencia de la rata de crecimiento de grieta por fatiga del factor de intensidad de esfuerzo (K) ha sido verificado por muchos investigadores. París (31) ha propuesto una ley potencial generalizada de la rata de crecimiento de la grieta por fatiga de la siguiente forma:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (37)$$

en donde da/dN es la rata de crecimiento de la grieta, C y m son constantes que dependen del material, del esfuerzo medido y de la frecuencia, y ΔK es el rango del factor de intensidad de esfuerzo durante un ciclo de carga.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}.$$

N : es el número de ciclos.

La figura 13 muestra el efecto del rango típico de la carga cíclica sobre el crecimiento de la grieta y los mismos datos son regraficados en términos de da/dN versus K en la figura 14.

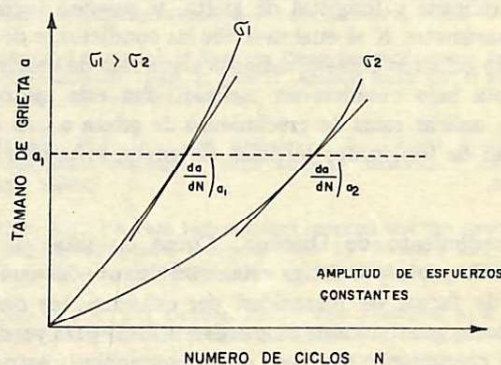


Figura 13a. Esquema del crecimiento de la grieta vs. número de ciclos para dos niveles de esfuerzo pero la misma grieta inicial.

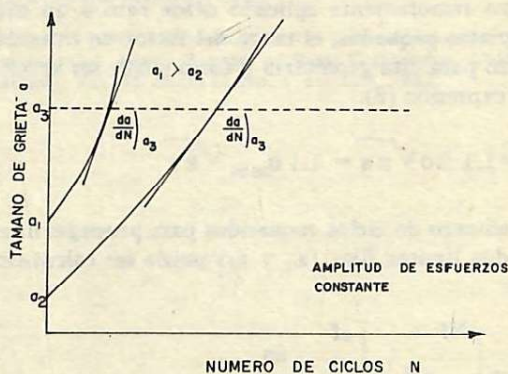


Figura 13b. Crecimiento de la grieta vs. número de ciclos para dos grietas iniciales diferentes y el mismo nivel de esfuerzo.

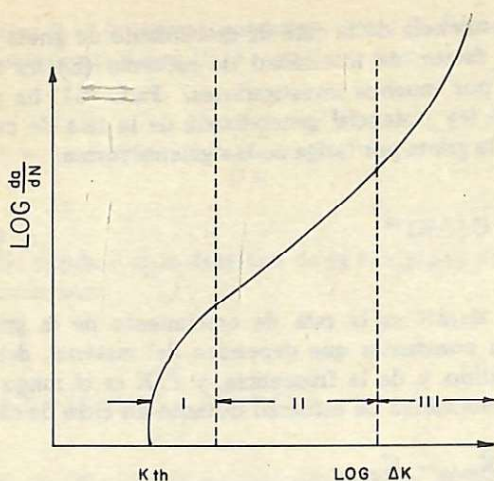


Figura 14. Esquema de la velocidad de crecimiento de la grieta como función de ΔK

De la comparación de las figuras 13 y 14, es aparente la ventaja del método de la Mecánica de la Fractura en el estudio del crecimiento de grietas en donde las variaciones carga aplicada y longitud de grieta, se pueden incorporar en el parámetro K el cual describe las condiciones de intensidad de esfuerzo correspondiente a una tasa de crecimiento de grieta bajo condiciones cíclicas. Por este método, es posible aplicar tasas de crecimiento de grieta a una amplia variedad de longitudes iniciales de grieta, esfuerzos y geometrías.

Procedimiento de Diseño: Como las tasas de crecimiento de grieta por fatiga están correlacionadas con el rango de factor de intensidad del esfuerzo, los datos de laboratorio generalmente se pueden utilizar para predecir la tasa de crecimiento de grieta en un componente estructural en servicio obteniéndose así estimativos de la vida de tal componente. El procedimiento es bastante sencillo y se puede ilustrar con el siguiente ejemplo. Se supone que el componente de interés es el ilustrado en la figura 15; esto es, una lámina con una grieta en su borde cargada con un esfuerzo remotamente aplicado desde cero a un máximo. Para grietas pequeñas, el rango del factor de intensidad de esfuerzo para esta geometría y carga puede ser aproximado por la expresión (6).

$$K = 1.1 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} = 1.1 \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \quad (38)$$

El número de ciclos requeridos para propagar una grieta entre dos límites fijos (a_o y a_f) puede ser calculado utilizando:

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{da/dN} \quad (39)$$

Como la tasa cíclica de la grieta se puede expresar como una función del rango del factor de intensidad del esfuerzo

y por lo tanto de la longitud de grieta, la anterior ecuación en su forma general se hace:

$$N_f = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (40)$$

Para el componente mostrado en la figura 15, la ecuación (38) se sustituye en la ecuación (40) obteniéndose un estimativo de la vida cíclica.

$$N_f = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{C(1.1 \sigma \sqrt{\pi a})^m} \quad (41)$$

Para geometrías más complejas o en situaciones de cargas reales sufridas por componentes en servicios, probablemente será necesario una integración numérica de la ecuación (40).

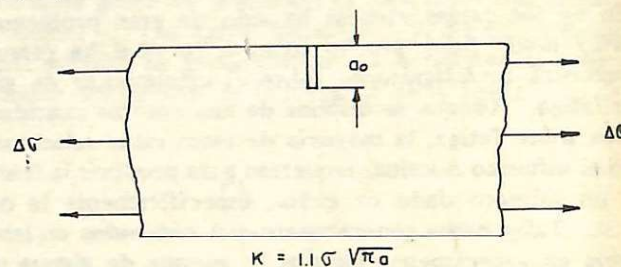


Figura 15. Componentes del ejemplo del texto.

Debido a la simplicidad de la ecuación (41) la integración se puede efectuar directamente y la siguiente ecuación resulta ($m \neq 2$):

$$N_f = \frac{1}{C} \cdot \frac{2}{(m-2)} \cdot \frac{a_f}{(1.1 \Delta \sigma \sqrt{\pi a_f})} \left[\left(\frac{a_f}{a_o} \right)^{\frac{m}{2}-1} - 1 \right] \quad (42)$$

En la anterior ecuación se pueden hacer dos observaciones: (a) el número de ciclos para producir la fractura decrece rápidamente a medida que el nivel de esfuerzo aplicado se aumenta (para aceros, m generalmente varía entre 2 y 4) y (b) las mayores vidas estructurales se observan para los tamaños iniciales de grietas pequeñas.

8 SUMARIO

Se ha intentado hacer una revista de las principales áreas de la Mecánica de Fractura en una forma muy resumida.

Los autores tienen el convencimiento de que el buen entendimiento y la acertada aplicación de tales principios a problemas prácticos de Ingeniería tales como en líneas de conducción de fluidos a altas o medianas presiones (oleoductos, vapor, etc.) recipientes a presión, puentes, estructuras remachadas o soldadas, etc. llevarían a un mejor diseño y a riesgos mucho menores de falla por fractura frágil.

REFERENCIAS

1. Griffith, A.A., "The Phenomena of Rupture and Flaw in Solids", Philosophical Transactions, Royal Society, Series A, Vol. 221, pp. 163-198, 1920.
2. Westergaard, H.M., "Bearing Pressure and Cracks", Transactions, American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics, Vol. 61, pp. A49-A53, 1939.
3. Irwing, G.R. "Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate". Transactions, ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, pp. 361, 1957.
4. Williams, M.L., "Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack", Transaction, ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, pp. 109, 1957.
5. Sneddon, I.N. and Lowengrub, M. "Crack Problems in the Classical Theory of Elasticity", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1969.
6. Paris, P.C., and Sih, B.C., "Stress Analysis of Cracks", Fracture Toughness Testing and its Applications, ASTM STP 281, pp. 30-81, 1966.
7. Feddersen, C.E., Discussion in "Plane Strain Fracture Toughness Testing", ASTM STP 410, pp. 77, 1967.
8. Isida, M., "Crack Tip Stress Intensity Factors for Tension of an Eccentrically Cracked Strip", Lehigh University, Department of Mechanics Report, 1965.
9. Gerberich, W.W., Williams, A.J. Martin, C.F., and Heise, R.E., "Ausform Fabrication and Properties of High-Strength Alloy Steel". Structure and Properties of Ultra High-Strength Steels, ASTM STP 370, pp. 154-171, 1965.
10. Steigerwald, E.A., "Crack Toughness Measurements of High-Strength Steels". Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing, ASTM STP 463, 1970.
11. Kaufman, J.G. and Hunsicker, H.Y. "Fracture Toughness at Alcoa Research Laboratories", Fracture Toughness Testing and Its Applications, ASTM STP 381, pp. 290-308, 1966.
12. Priest, A.H., and May, M.J., "Fracture Toughness of a Series of Experimental High-Strength Steels", Fracture Toughness of High Strength Materials: Theory and Practice, ISI Publication 120, pp. 95-111, 1970.
13. Wie, R.P. "Fracture Toughness Testing in Alloy Developments", Fracture Toughness Testing and Its Applications, ASTM 381, pp. 279-289, 1966.
14. Pascover, J.G. Hill, and Matas, S.J., "The Applications of Fracture Toughness Testing to the Development of a Family of Alloy Steels", Fracture Toughness Testing and Its Applications, ASTM STP 381, pp. 310-323, 1966.
15. Baker, A.J., Lauta, F.J. and Wei, R.P., "Relationship Between Microstructure and Toughness in Quenched and Tempered Ultra High-Strength Steels", Structure and Properties of Ultra High-Strength Steels, ASTM STP 370, pp. 3-29, 1965.
16. Banerjee, B.R., "Fracture Micromechanics in High-Strength Steels", Structure and Properties of Ultra High Strength Steels, ASTM STP 370, pp. 94-115, 1965.
17. Dunn, R.G., Whiteley, G.F. and Fairhurst, W. "Wolybdenum's Place in the Pressure Vessel Field", Climax Molybdenum Company, 1969.
18. Pellini, W.S. "Evolution of Engineering Principles for Fracture Safe Design of Steel Structures", NRL Report 6957, Sept 23, 1969.
19. Corten, H.T., "Fracture Mechanics Dimensional Parameters: Introduction to K", Dept. of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois, Urbana (Illinois).
20. Shoemaker, A.K. and Rolfe, S.T. "The Static and Dynamic Low". Temperature Crack Toughness Performance of Seven Structural Steels", U.S. Steel Corp., Applied Research Lab., Monroeville, Pa., Nov. 1968.
21. Strawley, J.E. and Brown, W.F. Jr., "Plane Strain Fracture Toughness Testing", ASTM STP 410, 1967.
22. Strawley, J.E. and Brown, W.F. Jr. "Fracture Toughness Testing Methods", Fracture Toughness Testing and its Applications, ASTM STP 381, pp. 133-195, 1966.
23. "Fracture Testing of High-Strength Sheet Materials", Third Report of a Special ASTM Committee, Material Research and Standards, pp. 877-885, Nov. 1961.
24. Rice, J.R., "Mathematical Analysis in the Mechanics of Fracture". Ed. H. Leibowitz, Fracture: An Advanced Treatise, Vol. II Academica Press, New York, pp. 191, 1968.
25. Standard Methods of Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, E. 399-72, Annual Book ASTM Standards, Part 31, pp. 955-974, 1972.
26. Brown, W.F. Jr., and Straley, J.E., "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Materials", ASTM STP 410, 1966.
27. Rice, J.R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Journal of Applied Mechanics, pp. 379-386, June 1968.
28. Begley, J.A. and Landes, J.D., "The J-Integral as a Fracture Criterion", Fracture Toughness, ASTM STP 514, pp. 1-20, 1972.
29. Corten, H.T., "Testing Methods for the Determination of Fracture Toughness of Metals", Pressure Vessels and Piping, Vol. 1, pp. 299-316, 1973.
30. Yukawa, S., and McMullin, J.G., "Effect of Specimen Size and Notch Acuity on the Brittle Fracture Strength of a Heat Treated Steel", Journal of Basic Engineering, ASME Transaction, pp. 541-544, December 1961.
31. Paris, P.C., and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Journal of Basic Engineering, ASME Transaction, Vol. 85, Series D, No. 4, pp. 528, 1963.