

CAPÍTULO 1

FATIGA EN MATERIALES METÁLICOS

El término fatiga define en ingeniería el fenómeno de rotura en un material debido a la acción repetida de tensiones o deformaciones por debajo de su límite de rotura. El proceso tiene lugar con la formación y crecimiento de grietas que avanzan a través del material hasta producir el fallo de un componente. Este fenómeno se puede producir de diversas formas: debido a fluctuaciones de la carga a la que está sometido el componente (fatiga mecánica); sometido además a altas temperaturas (creep-fatiga) o bajo la acción combinada de cargas cíclicas y temperaturas también fluctuantes (fatiga termomecánica); en ambientes agresivos (corrosión fatiga); o acciones fluctuantes asociadas a contactos con rozamiento (fretting fatiga). Todos estos procesos tienen como punto en común el producirse bajo la acción de cargas cíclicas cuyos valores extremos son considerablemente menores que las cargas límite calculadas en análisis estáticos.

En este capítulo se realizará una revisión de la filosofía actual de diseño así como de algunos de los conceptos más importantes a la hora de caracterizar el crecimiento de grietas por fatiga.

1.1. FILOSOFÍA ACTUAL DE DISEÑO

La necesidad de proporcionar un método práctico de diseño y la búsqueda de profundizar más en el conocimiento del fenómeno han promovido el desarrollo de diversos métodos de análisis de fatiga.

En el proceso de daño del material pueden distinguirse tres etapas:

- Iniciación o nucleación de la grieta.
- Crecimiento estable.
- Fallo catastrófico.

La longitud de la grieta para la que se produce la transición entre iniciación y propagación es normalmente desconocida y a menudo depende del punto de vista con el que se realiza el análisis y del tamaño del componente analizado. Por ejemplo, en análisis realizados con equipos microscópicos la longitud de transición puede ser del orden de una imperfección en la red cristalina, una dislocación o 0,1 mm; mientras que para un inspector de campo será del orden de la grieta más pequeña que es capaz de detectar mediante procedimientos no destructivos. Pese a ello, la distinción entre el periodo de iniciación y el de propagación es importante. Para cargas con ciclos de amplitud pequeña, más del 90% de la vida del componente puede transcurrir en la iniciación del defecto; y con cargas de gran amplitud, la mayor parte de la vida a fatiga se debe a la propagación de la grieta.

La vida total a fatiga de un componente se definirá como la suma del número de ciclos necesarios para iniciar la grieta y el necesario para propagarla de forma estable hasta un tamaño final.

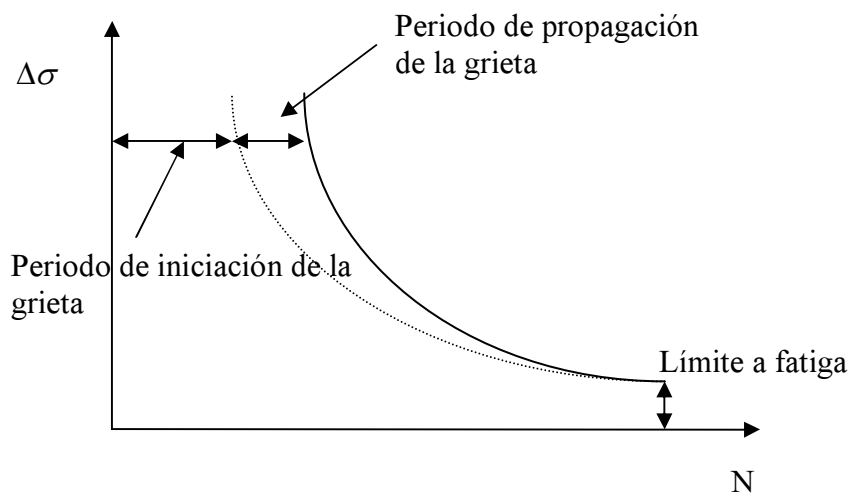


Figura 1.1: *Variación de la amplitud de tensiones cíclicas frente al número de ciclos hasta la rotura.*

Los métodos de diseño hacen uso de la mecánica de la fractura y se basan en una filosofía de tolerancia al daño. En todos los componentes se supone inherente la presencia de defectos, y la vida a fatiga se define entonces como el número de ciclos necesarios para

propagar una grieta desde un tamaño inicial hasta una dimensión crítica. El diseño se basa pues en conocer hasta cuando el defecto puede ser tolerado.

1.2. CARACTERIZACIÓN DEL CRECIMIENTO DE GRIETA

La aplicación de la teoría de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) para la caracterización del crecimiento de grietas requiere del estudio del campo de tensiones y deformaciones alrededor del vértice de la grieta, relacionando su magnitud y distribución con las tensiones remotas aplicadas, el tamaño y forma de la grieta y las propiedades del material.

Además de las hipótesis utilizadas en la elasticidad, inherentes también al MFEL, se introduce como hipótesis principal la homogeneidad del material. De este modo, el tamaño de la grieta debe ser varios órdenes de magnitud superior a la dimensión microestructural característica, lo que implica aplicar únicamente la mecánica de la fractura en el régimen de crecimiento de grietas.

Se distinguen tres modos básicos de desplazamiento de las superficies de la grieta que dependen de la dirección de aplicación de las cargas con respecto al plano de ésta; denominados modo I, modo II y modo III. Generalmente, el modo I de tracción es el modo por el que se producen la mayoría de las roturas en fenómenos de fatiga.

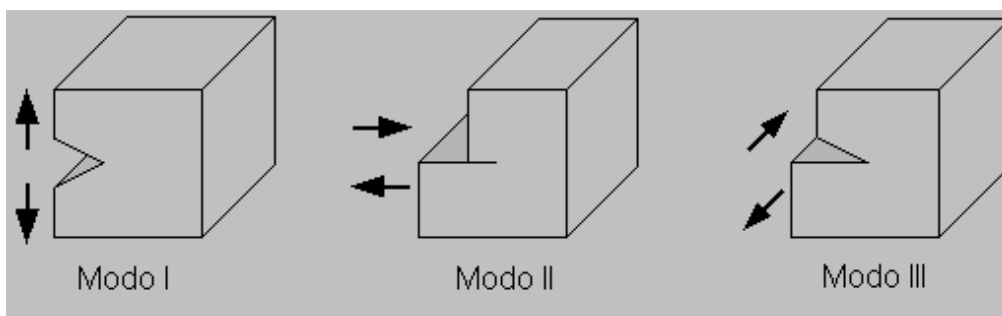


Figura 1.2: *Modos de apertura de grieta.*

A continuación se revisarán los conceptos que permiten caracterizar el crecimiento de grietas por fatiga.

Factor de intensidad de tensiones en modo I (K_I): Define la magnitud de las tensiones locales en el entorno del vértice de la grieta. Depende del tipo de cargas, tamaño y forma de la grieta y de las condiciones de contorno geométricas. De forma general se puede expresar como:

$$K_I = f(g)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

donde a es la longitud de la grieta, $f(g)$ un factor de corrección que depende de la geometría de la probeta y de la grieta y σ la tensión remota aplicada.

Las tensiones locales en el entorno de la grieta tienen de forma general la siguiente expresión:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots \quad (2)$$

donde r y θ son las coordenadas cilíndricas en un punto con respecto al borde de la grieta.

Se han obtenido soluciones del factor de intensidad de tensiones para una gran variedad de problemas. A continuación se representan las soluciones de algunas configuraciones comunes.

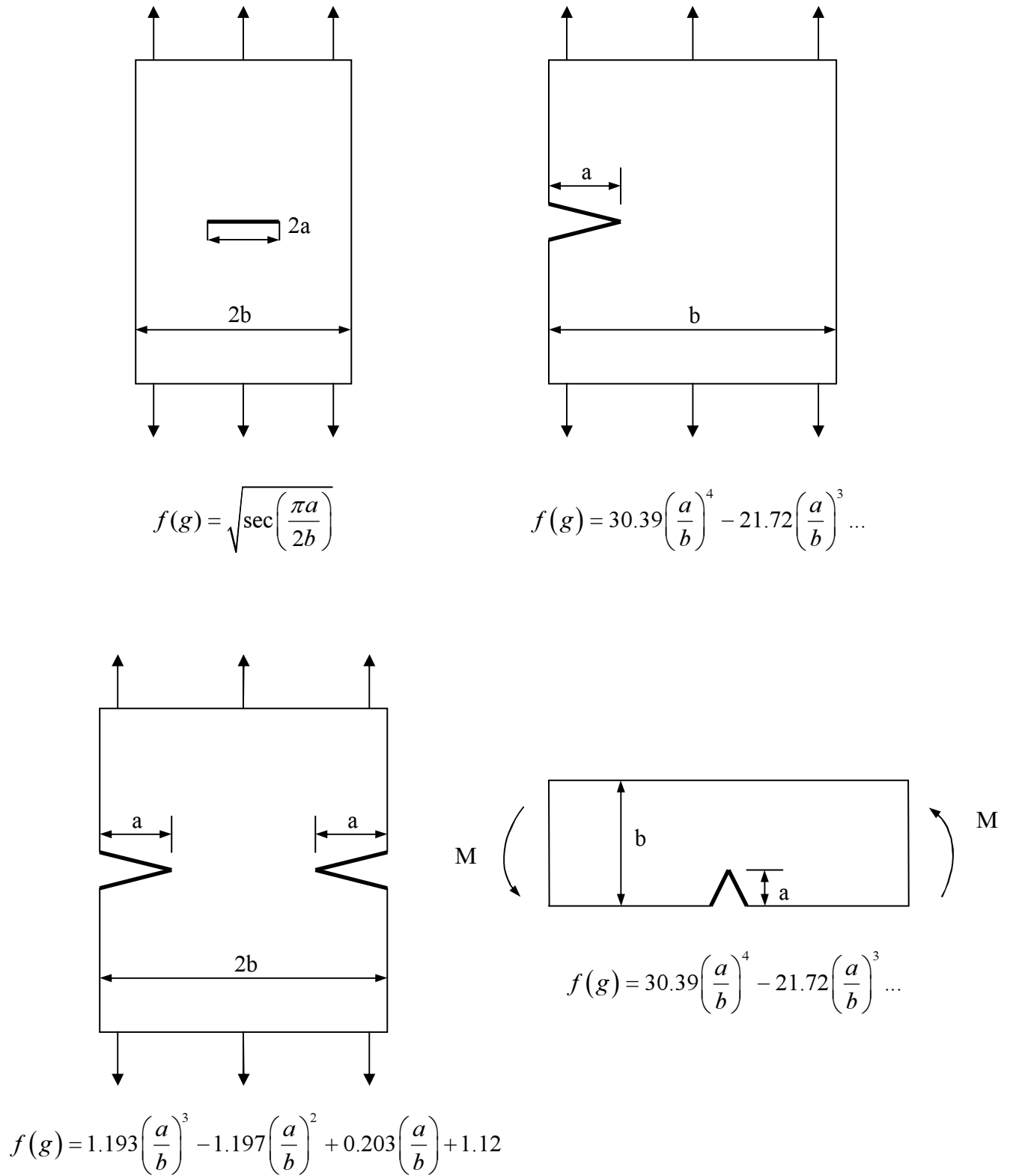


Figura 1.3: Factor de intensidad de tensiones para algunas configuraciones de grieta sencillas.

El cálculo del factor de intensidad de tensiones para condiciones geométricas y de carga más complejas se realiza normalmente por superposición de los casos sencillos.

Zona plástica: De la expresión (2) para las tensiones locales, se observa como la distribución de tensiones en el borde de la grieta toma un valor infinito para $r = 0$, valor que no se alcanza debido a la redistribución de tensiones provocada por la plastificación del material más próximo al borde de la grieta. El tamaño de esta zona plástica dependerá principalmente del factor de intensidad de tensiones y del estado de tensiones, tensión plana o deformación plana, en el que se encuentre el componente. La redistribución de tensiones que sigue a la aparición de la zona plástica en el borde de la grieta se muestra en la *figura 1.4*.

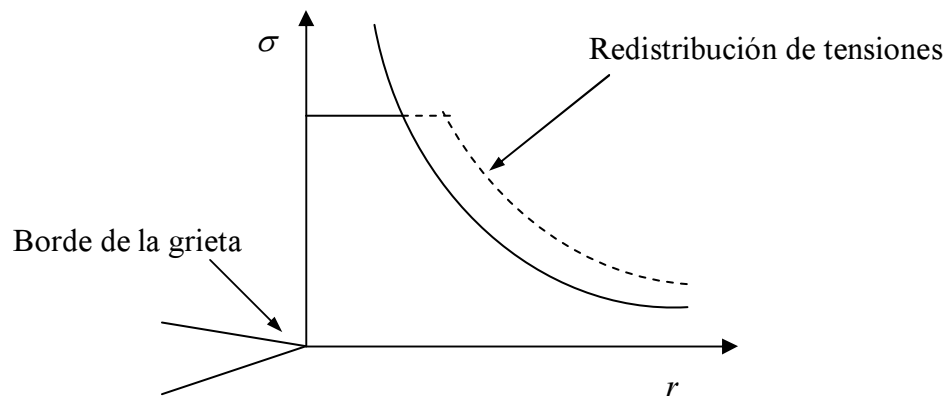


Figura 1.4: Tensiones en las proximidades del borde de la grieta.

La hipótesis de homogeneidad del material que fundamenta la aplicación de la MFEL seguirá siendo válida siempre y cuando el tamaño de esta zona plástica sea pequeño en comparación con las dimensiones de la grieta y del resto del componente.

Existen diversas estimaciones del tamaño de la zona plástica. Una de la cuales es la propuesta por Irwin (1957), que considera además la redistribución de las tensiones

ocasionada por la influencia de la zona deformada plásticamente. El radio de la zona afectada plásticamente es:

$$r_y = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\alpha \sigma_e} \right)^2 \quad (3)$$

Donde α es el *factor de constricción* ($\alpha = 1$ para tensión plana y $\alpha = 3$ para deformación plana) que introduce en la ecuación la influencia del estado de tensiones sobre el tamaño y la forma de la zona plástica. En probetas de espesor finito el campo de tensiones en la superficie se corresponde con condiciones de tensión plana y lejos de ella el estado de tensiones se aproxima a la condición de deformación plana. Por esta razón a veces se proponen valores intermedios para este coeficiente.

En la *figura 1.5* puede observarse la variación de la zona plástica a lo largo del espesor de la probeta.

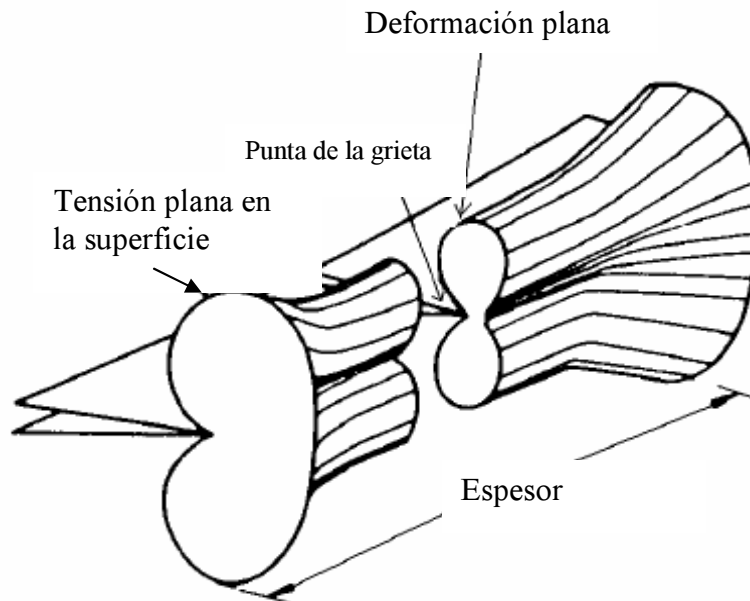


Figura 1.5: Variación del tamaño y forma de la zona plástica en el espesor.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el proceso de fatiga tiene lugar bajo la aplicación de cargas cíclicas y por tanto es necesario considerar el comportamiento del material en la

descarga. Al producirse ésta, la región plástica próxima al borde de la grieta es comprimida por la zona elástica que la rodea y se origina un flujo plástico en sentido contrario. La nueva zona de material deformada plásticamente, conocida como zona plástica cíclica, se corresponde aproximadamente con una cuarta parte de la zona plástica de tracción.

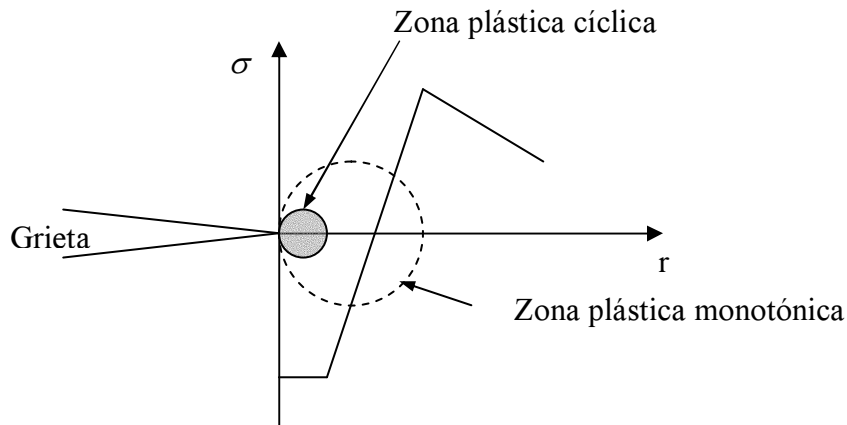


Figura 1.6: *Tamaño de la zona plástica cíclica.*

En general, el tamaño de la zona plástica establece la condición con la cual la solución está bien definida en términos del factor de intensidad de tensiones, consideración que en la gran mayoría de los casos resulta ser válida.

Ley de crecimiento: La velocidad de crecimiento de grietas sometidas a cargas cíclicas se expresa en incrementos de longitud de grieta por ciclo, $\frac{da}{dN}$. Uno de los objetivos del diseño a fatiga es el desarrollo de métodos fiables de caracterización de la velocidad de crecimiento de la grieta.

Paris (1963) sugirió que esta caracterización de la velocidad de crecimiento de la grieta se estableciera en función del *rango del factor de intensidad de tensiones* ($\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$) donde $K_{\max}$ y $K_{\min}$ son los valores máximo y mínimo del factor de intensidad de tensiones

durante un ciclo de tensión. Paris mostró que la velocidad de crecimiento podía relacionarse con ΔK a través de la ley:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (4)$$

donde C y m son constantes que dependen de diversos factores del material, de la carga y del ambiente.

Experimentalmente se comprueba que esta relación se corresponde con el crecimiento estable de la grieta solamente en una parte de la curva total. En ella se distinguen tres regímenes distintos de crecimiento: la región I o régimen próximo al umbral; la región II, con valores intermedios de ΔK y en la cual es aplicable la ley de Paris; y la región III, de rápida propagación de la grieta.

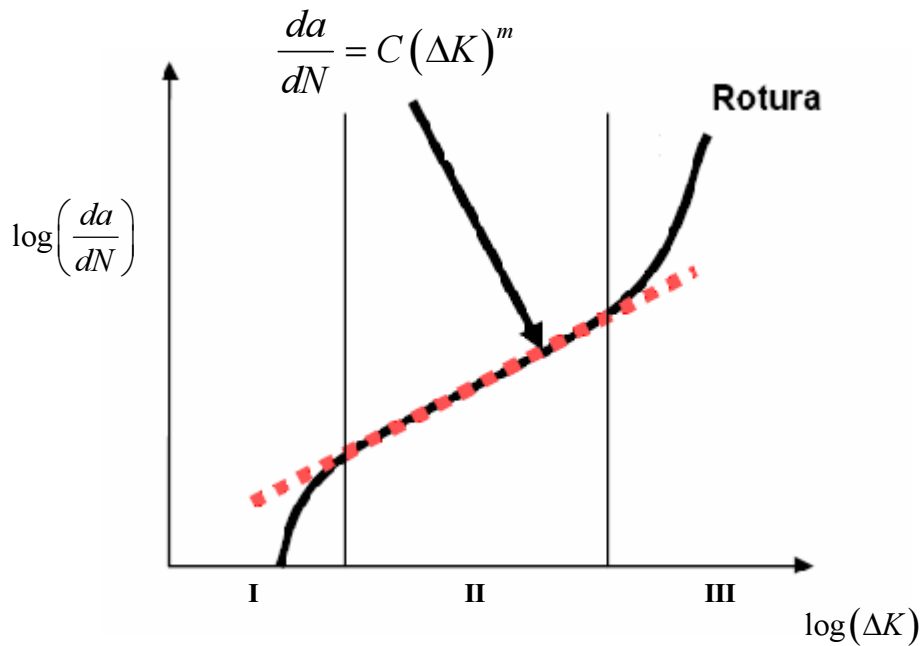


Figura 1.7: Ley de crecimiento.

En la *figura 1.7* se pueden apreciar las tres regiones descritas. En la región I la velocidad de crecimiento aumenta muy rápidamente con ΔK desde valores muy bajos. Se define el *rango umbral del factor de intensidad de tensiones*, ΔK_{th} , como el umbral por debajo del cual la grieta no crece. El comportamiento en la región II es esencialmente lineal, correspondiéndose con la ley de Paris. Para valores de ΔK altos la velocidad de crecimiento aumenta muy rápidamente hasta que el valor máximo del factor de intensidad de tensiones, K_{max} , alcanza un valor para el que se produce la rotura. Este valor se denomina *factor crítico de intensidad de tensiones*, K_{IC} , y representa el máximo factor de intensidad de tensiones que una grieta puede soportar bajo carga estática antes de propagarse inestablemente.

Existen una gran variedad de modelos más complejos que la ley de Paris que tratan de reproducir el comportamiento de la grieta en las regiones I y III o introducen el efecto de otros factores como la relación de cargas. Más adelante haremos referencia a la ley de crecimiento propuesta en el modelo de Newman e implementada en el programa **FASTRAN II**.

Cierre de grieta: Aunque en capítulos posteriores se analizará más en profundidad el concepto de cierre de grieta y sus consecuencias sobre el crecimiento de grietas debido a fatiga, es necesario mencionar aquí la idea principal de dicho fenómeno.

Una grieta ideal de espesor nulo en el material permanece cerrada únicamente con carga cero o de compresión. Sin embargo, se observa experimentalmente que grietas provocadas por fatiga cierran durante la descarga antes de ser nula la tensión. Esta diferencia de comportamiento se debe a la plastificación de la zona adyacente a la grieta. Cuando la grieta crece, la deformación residual acumulada a ambos lados de la grieta actúa sobre la grieta hasta cerrarla.

Cuando un componente agrietado es traccionado, la grieta permanece total o parcialmente cerrada hasta que se alcanza un determinado valor del factor de intensidad de tensiones

(K_{op}) con el cual la grieta se abrirá totalmente. Durante la descarga, se producirá el primer contacto entre las superficies de la grieta para cierto valor del factor de intensidad de tensiones (K_{cl}) , a partir del cual la grieta se cierra gradualmente, como puede verse en la *figura 1.8*.

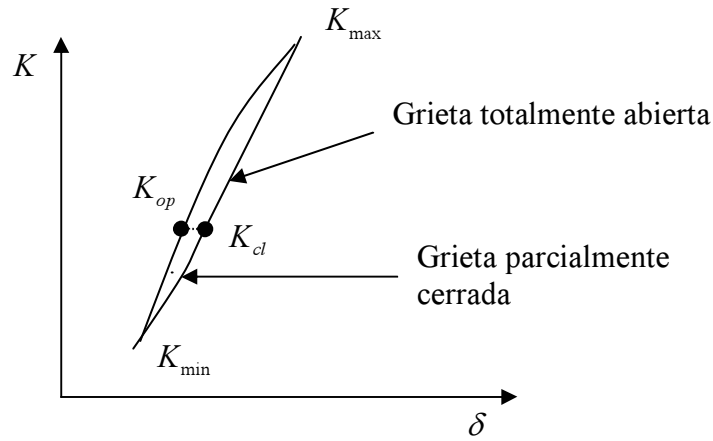


Figura 1.8: Diagrama de flexibilidad en función del factor de intensidad de tensiones.

Considerando que sólo puede producirse crecimiento de la grieta cuando ésta está totalmente abierta, es necesario definir un nuevo coeficiente que tenga en cuenta el cierre de la grieta. Elber (1971) definió el *rango efectivo del factor de intensidad de tensiones*, ΔK_{ef} , como:

$$\Delta K_{ef} = K_{max} - K_{op} \quad (5)$$

quedando definida ahora la velocidad de crecimiento de la grieta por la ecuación:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_{ef})^m \quad (6)$$

Con la definición del rango efectivo del factor de intensidad de tensiones y su utilización dentro de la ley de crecimiento se comienza a tener en consideración uno de los aspectos

más importantes del crecimiento de grietas por fatiga como es que el crecimiento de la grieta en un determinado ciclo de carga depende de la historia de carga anterior.