

## CAPÍTULO 1. FATIGA EN MATERIALES METÁLICOS

El proceso de fatiga causa la formación y el crecimiento de grietas en un componente. El fallo de éste se produce cuando la grieta supera un determinado tamaño y el componente ya no es capaz de soportar la carga a la que está sometido.

El proceso de fractura por fatiga puede dividirse en dos etapas: la nucleación de la grieta y la propagación de ésta hasta la ruina del componente. La frontera entre ambas etapas ha tenido una distinción clara. En términos generales, la nucleación tiende a considerarse como el estadio donde comienzan las primeras roturas de enlaces a nivel de los planos atómicos y la propagación como la fase de crecimiento desde que aparecen las primeras microgrietas hasta que se produce el fallo del componente.

Las microgrietas por fatiga se inician en defectos o discontinuidades en el material: inclusiones, cavidades, huellas superficiales, límites de grano, etc. La concentración de tensiones que se origina en tales defectos potencia la creación de grietas. Así pues, la nucleación dependerá fundamentalmente del tipo de material y del tratamiento termomecánico al que ha sido sometido, y evidentemente, también a la sollicitación de carga.

La propagación, a su vez, consta de dos etapas, según Forsyth [16]:

Etapa I: también denominada período de crecimiento cristalográfico. Corresponde a la fase inicial del crecimiento, en el que la grieta es del orden del tamaño microestructural característico. En esta etapa el crecimiento está altamente influenciado por la microestructura del material y se produce mayoritariamente en los planos de deslizamiento donde la tensión tangencial es máxima.

Etapa II: el tamaño de grieta es varias veces superior que el tamaño microestructural característico. El plano de propagación de la grieta se sitúa generalmente perpendicular a la dirección de la tensión principal máxima.

La vida a fatiga de un espécimen comprende por tanto las fases de nucleación y de propagación. No obstante, actualmente se tiene la predisposición a estimar la etapa de nucleación como muy corta o inexistente, considerando que la grieta empieza su crecimiento desde el primer ciclo de carga. En consecuencia, el proceso de fatiga queda

como un proceso de propagación de grietas desde que éstas son nucleadas hasta el fallo del material.

Tal estimación ha cambiado el significado que se tenía del límite de fatiga. Se ha abandonado el concepto de tensión por debajo de la cual no existen grietas en el material, para sustituirlo por el de nivel de tensión por debajo del cual las grietas nucleadas en el material no son capaces de propagarse más allá de un determinado tamaño, dependiente de la microestructura del material.

Para el estudio de la propagación de grietas es necesario realizar la siguiente distinción: grieta grande – grieta pequeña, pues va a condicionar la descripción del proceso de crecimiento de éstas.

Por grieta grande se entiende aquella grieta cuyo tamaño es varias veces superior al tamaño microestructural característico del material (Ej. el tamaño de grano) y al tamaño de la zona de deformación plástica que genera la grieta. La única longitud típica distinguible para la caracterización del crecimiento es el tamaño de la propia grieta. En estas circunstancias, se puede suponer que la propagación se produce a través de un medio continuo y homogéneo, siendo apropiado el uso de la Mecánica de la Fractura para la descripción del proceso de crecimiento.

La grieta pequeña se caracteriza por que su tamaño es del orden del tamaño microestructural del material, lo que obliga a conceder importancia a las propiedades microestructurales. El material deja de ser continuo y homogéneo, y ya no es tan apropiado aplicar los métodos clásicos de Mecánica de la Fractura.

La Mecánica de la Fractura se divide en Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) y Elasto-Plástica (MFEP). Comentaremos aquí brevemente sólo la primera de ellas.

La MFEL se basa en suponer que la zona plástica que se genera en el frente de la grieta es pequeña en comparación con la propia grieta, por lo que se considera que ésta se propaga en un sólido elástico lineal. El primer paso es, por tanto, su determinación.

Existen tres modos de apertura posibles de una grieta dependiendo del tipo de desplazamiento relativo entre las caras de la grieta (Fig. 1.1):

- Modo I: denominado también modo de tracción. Los flancos de la grieta se separan uno respecto al otro perpendicularmente al plano de la grieta.

- Modo II: las caras de la grieta deslizan perpendicularmente al borde de la misma. Modo de deslizamiento tangencial en el plano.
- Modo III: los flancos de la grieta deslizan paralelamente al frente de la grieta. Modo de deslizamiento tangencial fuera del plano.

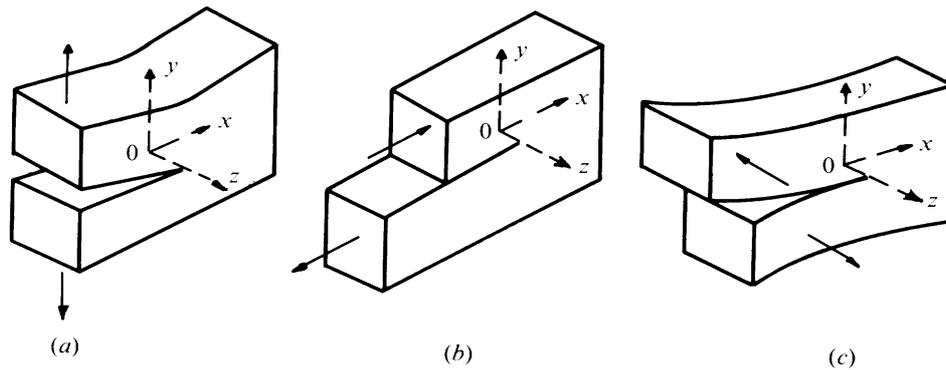


Figura 1.1. Modos de apertura de grieta: (a) Modo I, (b) Modo II, (c) Modo III

Para cualquiera de los modos, el campo de tensiones próximo al frente de la grieta presenta una singularidad en el vértice de ésta. Para representar la singularidad se emplea un escalar, el Factor de Intensidad de Tensiones. Este escalar va a depender de la geometría del componente, carga aplicada y la longitud de grieta. Por ejemplo, para una grieta en Modo I, el factor de intensidad de tensiones ( $K_I$ ) viene dado por la expresión:

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1.1)$$

donde  $Y$  es un factor geométrico dependiente de la forma del componente y de la forma de la grieta,  $\sigma$  es la tensión aplicada al componente y  $a$  la longitud de la grieta. Una expresión análoga se obtiene para el Modo II y para el Modo III.

Dentro de la hipótesis de la MFEL, el factor de intensidad de tensiones caracteriza completamente el estado tensional alrededor del vértice de la grieta. Si esto es así y

dado que la velocidad de crecimiento de una grieta depende del estado tensional generado por ésta en el material, parece razonable pensar que dicha velocidad esté directamente relacionada con el factor de intensidad de tensiones. Paris y Erdogan [17] enuncian una ley, conocida como la ley de Paris, para describir el incremento de la longitud de la grieta por ciclo en función del rango del factor de intensidad de tensiones:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1.2)$$

donde  $C$  y  $m$  son constantes determinadas experimentalmente para cada material y condiciones de carga.  $\Delta K$  es el rango de variación del factor de intensidad de tensiones en un ciclo de carga,  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ .

Observando la ecuación (1.2), se obtiene que dos grietas de un mismo material que exhiban el mismo  $\Delta K$  poseen el mismo ritmo de crecimiento.

La figura 1.2 presenta la variación de la velocidad de crecimiento de la grieta respecto a  $\Delta K$  en materiales metálicos. En ella se pueden apreciar tres regiones diferentes.

La región (A) está relacionada con un rango del factor de intensidad de tensiones umbral  $\Delta K_{\text{th}}$ , donde el incremento medio de la longitud de grieta por ciclo es del orden, o menor, que el espacio interatómico del material ( $10^{-8}$  mm / ciclo). Para valores de  $\Delta K$  inferior al umbral una grieta designada como grande no se propaga, o su crecimiento es indetectable.

La siguiente zona, región (B) o de Paris, describe un aumento progresivo del crecimiento de la grieta, casi lineal. La ley de Paris describe la velocidad de crecimiento de una grieta larga en esta zona. La última región (C), presenta una velocidad de crecimiento que aumenta rápidamente hasta provocar el fallo de la pieza. El valor máximo del factor de intensidad de tensiones ha alcanzado un valor crítico  $K_C$ , denominado tenacidad a la fractura del material.  $K_C$  representa el valor máximo del  $K_I$  que puede soportar la grieta bajo carga estática antes de propagarse de manera inestable. Este valor crítico es una característica del material.

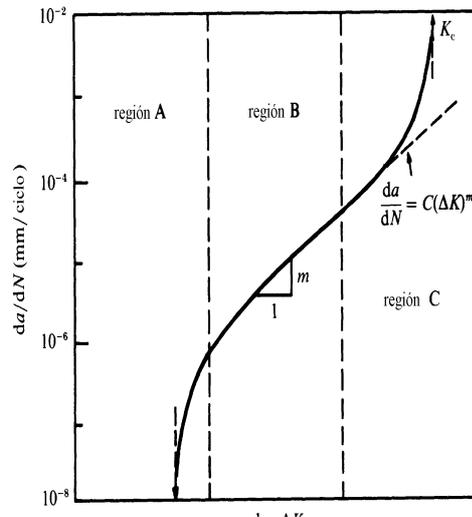


Figura 1.2. Velocidad de crecimiento de grieta vs.  $\Delta K$

Como se comentaba anteriormente, la zona de plastificación alrededor del vértice de la grieta debe ser pequeña con respecto al tamaño de la grieta. De no ser así, no es posible aplicar la MFEL para caracterizar el crecimiento de la grieta, empleando en su lugar métodos de la MFEP, cuya descripción va más allá de esta breve exposición.

### Crecimiento de grietas pequeñas

Una de las diferencias entre las grietas pequeñas y las grietas grandes se presenta en el patrón de crecimiento. Las velocidades de crecimiento de grietas pequeñas en la fase inicial son relativamente más elevadas que para grietas grandes (superior a la predicha por MFEL), disminuyendo éstas a medida que las grietas se aproximan a los límites de grano. Las microgrietas pueden entonces dejar de propagarse definitivamente o retardarse, para después acelerarse tras superar una de estas barreras microestructurales. Las microgrietas muestran una progresión oscilante, como puede observarse en la figura 1.3. Este comportamiento va desapareciendo conforme su tamaño va aumentando. Cuando éstas alcanzan una longitud del orden de 10 a 20 veces el tamaño de grano, el ritmo de crecimiento se asemeja al de las grietas grandes y la microestructura deja de influir.

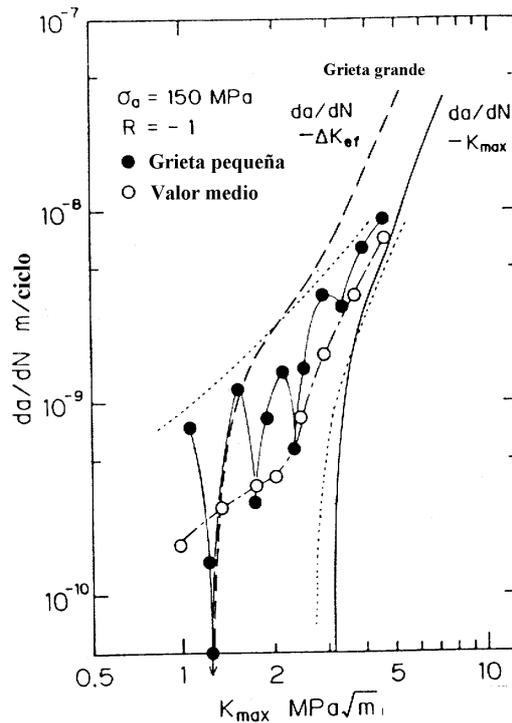


Figura 1.3: Comportamiento típico de las grietas pequeñas

La estimación de la vida total a fatiga de componentes debe tener en cuenta el periodo de grieta pequeña, pues, como se ha visto, debido a las aceleraciones y desaceleraciones gran parte de la vida transcurre en él.

Se han realizado numerosos estudios para caracterizar este comportamiento, dada su importancia y por la incapacidad de la MFEL para describirlo: el medio no puede ser considerado homogéneo; no representa las desaceleraciones de las microgrietas ni la propagación de éstas a  $\Delta K$  inferiores al umbral.

El estudio realizado por Kitagawa y Takahashi se centra en calcular la tensión mínima necesaria (tensión umbral,  $\Delta\sigma_{th}$ ) para hacer crecer la grieta en función de su longitud. La figura 1.4 representa el conocido diagrama de Kitagawa-Takahashi. Como se puede observar, existen grietas pequeñas cuya tensión umbral corresponde con el límite de fatiga del material ( $\Delta\sigma_0$ ). Al aumentar el tamaño de la grieta la tensión umbral para la propagación disminuye, tendiendo, para grietas suficientemente grandes, a una línea recta de pendiente  $-1/2$  en escala logarítmica. Dicha recta viene dada por la tensión

umbral correspondiente al factor de intensidad de tensiones umbral de grieta larga,  $\Delta K_{th\infty}$ , dado por la MFEL.

Taylor y Knott definieron tres longitudes de grieta características para distinguir el comportamiento de las grietas. La longitud  $a_1$  se presenta como la máxima longitud de grieta para la que la tensión umbral es constante e igual al límite de fatiga del material. La longitud  $a_2$  representa la longitud mínima por encima de la cual la tensión umbral se puede expresar en función de  $\Delta K_{th\infty}$  (la MFEL es aplicable). Finalmente la longitud  $a_0$  es la intersección de las asíntotas del límite de fatiga y del factor de intensidad de tensiones umbral de grieta grande. La zona comprendida entre las longitudes  $a_1$  y  $a_2$  representa la transición de grieta pequeña a grieta grande en el umbral de crecimiento.

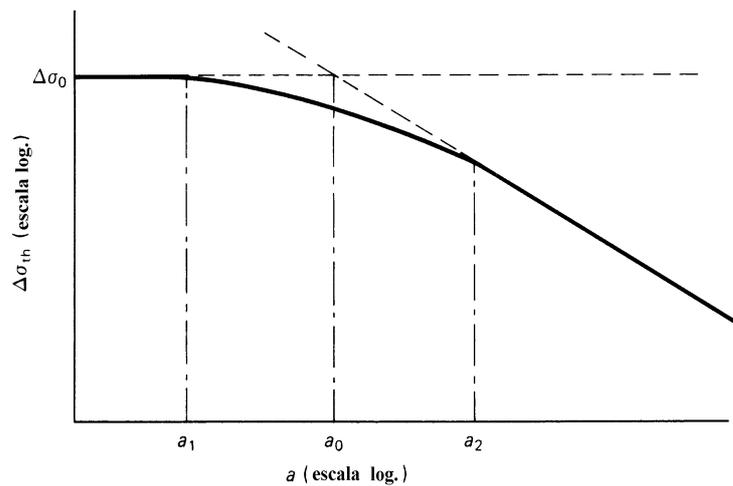


Figura 1.4: Diagrama de Kitagawa-Takahashi

### Fatiga en entallas

Como ya se ha comentado anteriormente, las entallas o concentradores de tensión producen tensiones más elevadas en sus proximidades que las que sufre el resto del componente. Este hecho puede provocar la aparición prematura de grietas en el material, disminuyéndose la resistencia a fatiga de la pieza.

El efecto de la entalla se deja notar con más relevancia en la componente de tensión en la dirección de la carga aplicada. En la figura 1.5 se presenta la forma típica de la tensión  $\sigma_{yy}$  en el fondo de una entalla genérica sometida a tracción, en un material que permanece en régimen elástico. La distribución de tensiones alcanza su valor máximo en la raíz del concentrador y disminuye progresivamente al alejarnos de ésta. Para el estudio de esta distribución nos centraremos en la tensión máxima y el gradiente de tensiones.

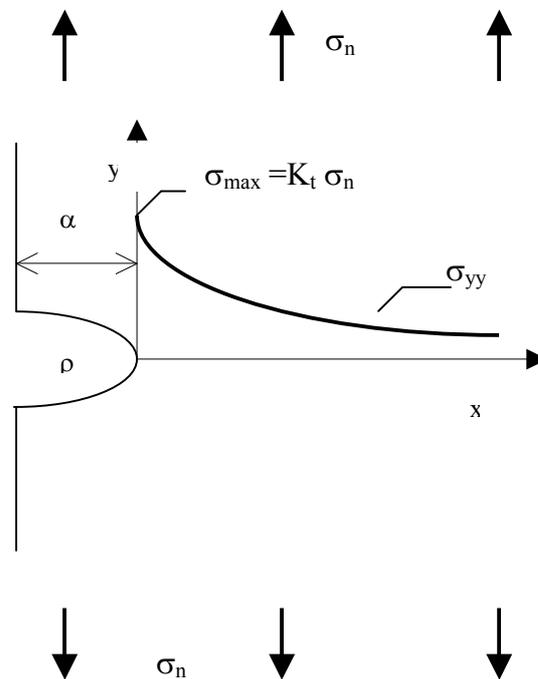


Figura 1.5: Distribución de tensiones  $\sigma_{yy}$  en la raíz de una entalla a tracción.

La tensión máxima se expresa en función del factor de concentración de tensiones  $K_t$ :

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_n \quad (1.3)$$

donde  $\sigma_n$  es la tensión nominal tomada como referencia de la tensión aplicada al espécimen, normalmente referida a la sección neta. El factor de concentración de

tensiones depende de la geometría de la entalla, de la geometría global del componente y del tipo de carga ejercida ( tracción, flexión,...).

Los estudios de Inglis [18] muestran que el factor de concentración de tensiones para entallas elípticas en un medio infinito sujetas a tracción, puede ser expresado como una función de la profundidad de la entalla  $\alpha$  y del radio de curvatura  $\rho$  en su raíz, de la forma

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\alpha/\rho} \quad (1.4)$$

A partir de la expresión anterior se puede obtener una más general expresando  $K_t$  de la forma

$$K_t = 1 + F\sqrt{\alpha/\rho} \quad (1.5)$$

donde F es un factor de corrección dependiente de la geometría del espécimen y de la sollicitación.

La expresión (1.5) es aplicable a numerosas geometrías de entallas y tipos de carga. Actualmente, la determinación del factor de concentración de tensiones no conlleva dificultad alguna.

El factor determinante en el gradiente de tensiones generado por una entalla en el material, es la geometría en el fondo de la entalla. Se ha demostrado que, para entallas diferentes, cuando se adimensionalizan las distribuciones de tensión mediante la tensión máxima, éstas presentan una evolución muy similar en la región próxima al concentrador. La geometría global del espécimen no influye notoriamente en dicha evolución. En consecuencia, algunos autores describen la distribución de tensiones en la entalla a partir de dos únicos parámetros: el factor de concentración de tensiones  $K_t$  y el radio de curvatura del concentrador  $\rho$ . La distribución puede expresarse de la siguiente forma

$$\sigma_{yy}(x) = \sigma_{\max} f(x, \rho) \quad (1.6)$$

donde  $f$  es una función que depende de la distancia al fondo de la entalla  $x$  y del radio de curvatura de ésta. Al aumentar  $x$  la función  $f$  disminuye, más aún cuanto menor sea el radio de curvatura.

El comportamiento de las grietas en entallas viene determinado fundamentalmente por el nivel de tensiones y la evolución de éstas. El nivel de tensiones debe ser suficientemente elevado para provocar la nucleación de una microgrieta, mientras que la evolución de las tensiones debe permitir la propagación de la grieta nucleada a través del material. Sólo así se producirá el fallo del componente.

A menor radio de curvatura la concentración de tensiones es más elevada, pero por el contrario la disminución de las tensiones más acusada. De esta forma, en dos entallas de igual profundidad y radios de curvaturas distintos, sometidas a la misma tensión, una grieta encontrará mayor dificultad para propagarse en la entalla de menor radio, pudiendo detenerse si la disminución de tensiones es suficientemente grande.

### **Sensibilidad a la entalla**

Se ha demostrado experimentalmente que el límite de fatiga de un espécimen entallado es mayor que el valor obtenido de dividir el límite de fatiga del espécimen sin entalla entre el factor de concentración de tensiones teórico de la entalla  $K_t$ . Este hecho hace necesario establecer un nuevo factor de concentración de tensiones efectivo a fatiga o también denominado factor de reducción de resistencia a fatiga de la entalla,  $K_f$ :

$$K_f = \frac{\sigma_{FL}}{\sigma_{FL}^N} \quad (1.7)$$

donde  $\sigma_{FL}$  y  $\sigma_{FL}^N$  son los límites de fatiga de un componente sin entalla y del componente entallado respectivamente, ambos límites obtenidos bajo el mismo tipo de sollicitación.

Tal como ha sido definido,  $K_f$  es normalmente menos que  $K_t$ .

En la práctica se emplea un parámetro que relaciona los factores  $K_f$  y  $K_t$ , denominado índice de sensibilidad a la entalla ( $q$ )

$$q = (K_f - 1) / (K_t - 1) \quad (1.8)$$

Este índice toma generalmente valores entre 0 y 1. El valor 0 ( $K_f = 1$ ) significa que la entalla no produce reducción en la resistencia a fatiga del espécimen. Por el contrario, un valor de  $q$  igual a la unidad indica que la entalla ejerce su máxima influencia, es decir  $K_f = K_t$ .

En la figura 1.6 se presenta la evolución de  $q$  en función del radio de curvatura de la entalla, para entallas geoméricamente semejantes y distintos materiales. Se puede observar que para un mismo material, la sensibilidad a la entalla aumenta al aumentar el radio de curvatura. La diferencia entre  $K_f$  y  $K_t$  resulta ser más marcada cuando la entalla es más aguda. Para radios grandes  $K_f \rightarrow K_t$  al aumentar el tamaño del espécimen.

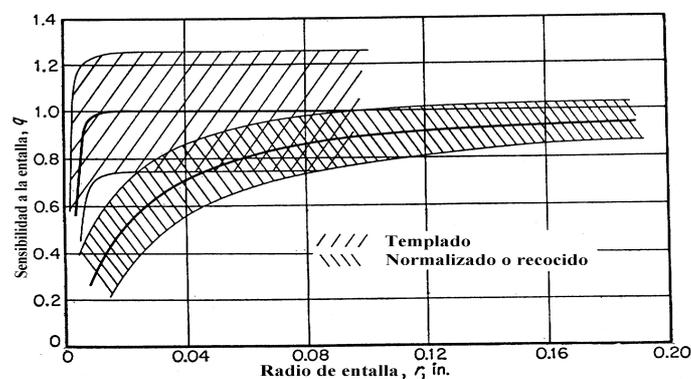
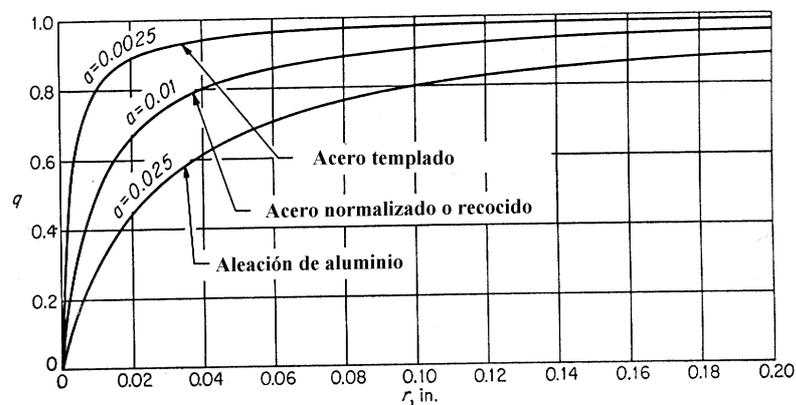


Figura 1.6:  $q$  vs.  $\rho$  en entallas geoméricamente semejantes

Otro hecho observado ha sido que los materiales con mayor resistencia a la tracción presentan valores de  $q$  más próximos a la unidad que aquellos de características inferiores. Más aún, materiales de grano muy fino, como los aceros templados, pueden mostrar valores de  $q$  superiores a la unidad. Todo esto implica que el factor de reducción de resistencia a fatiga de la entalla depende del tipo de material y del tamaño del espécimen.

Frost [19, 20, 21] y Dugdale [22] han estudiado el crecimiento de las grietas en concentradores de tensión. En entallas agudas, sometidas a tensiones menores o igual al límite de fatiga del componente entallado, se han observado grietas en la raíz de la entalla que se desarrollan hasta una cierta distancia para pararse posteriormente, sin provocar el fallo del espécimen. Estas grietas son denominadas no-propagantes y suelen aparecer en entallas con un factor de concentración de tensiones superior a un determinado valor crítico, normalmente  $K_t$  mayor de 4. En estos casos, el límite de fatiga del espécimen  $y$ , por tanto  $K_{t_f}$ , no dependen de una manera significativa de la concentración de tensiones en la entalla.

En la figura 1.7 muestra el clásico diagrama obtenido originariamente por Frost, donde se representa el límite de fatiga de un componente entallado en función de  $K_t$ . En él se pueden observar dos curvas distintas: curva (a) o límite de iniciación y curva (b) o límite de propagación hasta el fallo. El límite de iniciación representa la tensión mínima necesaria para iniciar una grieta en la raíz de la entalla. Para tensiones inferiores a este límite no se observan grietas en el material. El límite de propagación señala la tensión máxima aplicable sin se produzca el fallo en la pieza, es decir, es el límite de fatiga convencional del espécimen entallado.

Se observa que ambos límites coinciden para valores de  $K_t$  pequeños, es decir, una vez iniciada la grieta en la raíz de la entalla, ésta es capaz de propagarse hasta producir el fallo de la pieza. Sin embargo, conforme el factor  $K_t$  aumenta, la diferencia entre los dos límites se hace más patente, delimitando entre ambos una región denominada de grietas no-propagantes. Para provocar la rotura del componente es necesario aplicar una carga superior a la curva (b).

Experimentalmente se comprueba que la longitud de las grietas no-propagantes dependen del nivel de la tensión aplicada, de la geometría de la entalla y del tipo de material.

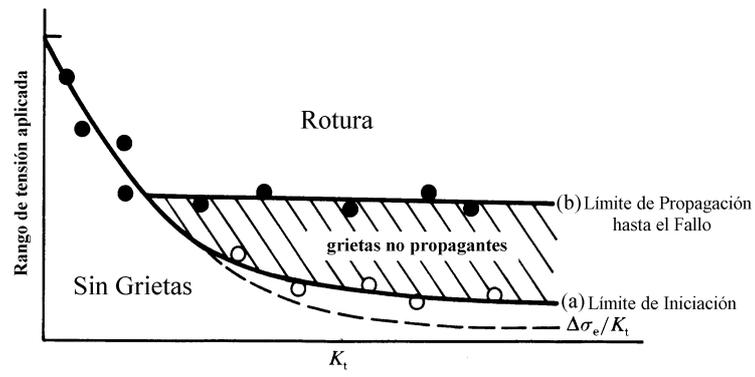


Figura 1.7: Diagrama de Frost