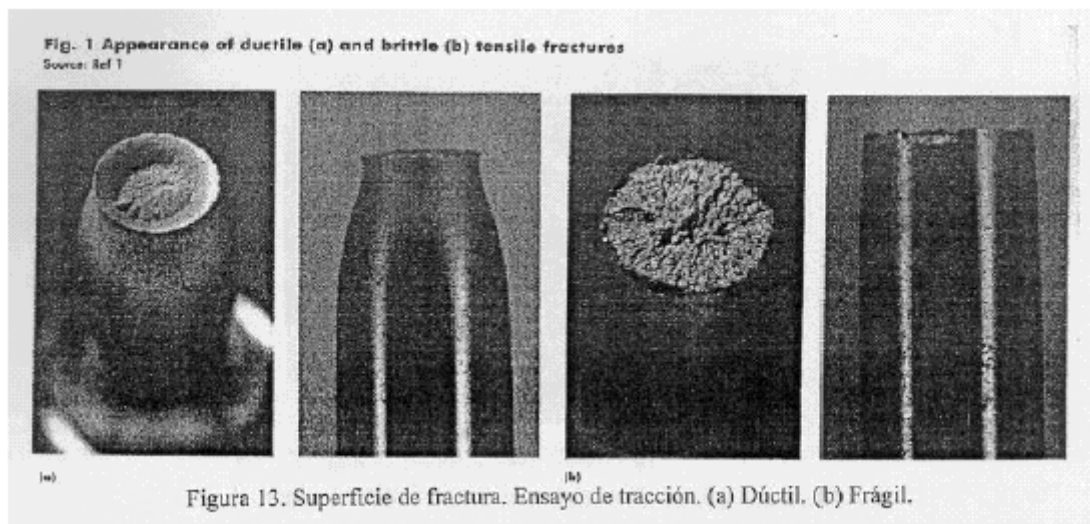


CONCEPTOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA.

Se puede definir a la Fractura como la culminación del proceso de deformación plástica. En general, se manifiesta como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un dado estado de cargas.

Algunos metales sometidos a un ensayo de tracción presentarán una estricción en la zona central de la probeta para romper finalmente con valores de reducción de área que pueden llegar en algunos casos al 100%. Este tipo de fractura se denomina dúctil.

Por el contrario, muchos sólidos presentan fracturas precedidas por cantidades muy pequeñas de deformación plástica, con una fisura propagándose rápidamente a lo largo de planos cristalográficos bien definidos que poseen baja energía superficial. Este tipo de fractura se denomina frágil.



Existe sin embargo considerable confusión respecto de la manera de diferenciar entre ambos tipos de fractura. Esto obedece fundamentalmente a que en general se tiende a considerar el proceso global de deformación que conduce al fenómeno de fractura. Ahora bien, un metal puede fallar por clivaje, que es un proceso de fractura frágil, luego de una deformación macroscópica importante. Del mismo modo, es posible tener en un metal una deformación plástica global despreciable, que finalmente falla de manera dúctil.

La confusión se reduce si en lugar de considerar el proceso global de deformación que precede a la fractura, se tiene en cuenta la deformación localizada en el material que rodea al vértice de la fisura durante la propagación de la misma. De este modo, la fractura frágil es aquella en la cual la fisura se propaga con muy poca deformación plástica en su vértice, mientras que la fractura dúctil es aquella que progresa como consecuencia de una intensa deformación plástica asociada al extremo de la fisura.

Si bien la diferenciación anterior es de gran importancia conceptual, desde el punto de vista ingenieril es también importante caracterizar el proceso de fractura según que el mismo se produzca de manera rápida o lenta. De este modo, la fractura rápida se caracteriza por la propagación inestable de una fisura en una estructura. En otras palabras, una vez que la fisura comienza a crecer, el sistema de cargas es tal que produce una propagación acelerada de aquella. Este tipo de fractura rápida puede o no ser precedida por una extensión lenta de la fisura. La característica de este tipo de fractura lenta es una propagación estable que requiere para su mantenimiento un incremento continuo de las cargas aplicadas.

En la mayoría de los casos de fallas en servicio de estructuras por fractura rápida, estas fueron iniciadas por tensiones nominales aplicadas inferiores a las de diseño. Esto contribuyó al carácter catastrófico de las fallas y llevó a que ellas fueran consideradas en general como fracturas frágiles, independientemente de la naturaleza de los micromecanismos de rotura asociados al vértice de las fisuras. Nosotros retendremos este concepto ingenieril de fractura frágil, entendiendo por aquella en la cual el inicio de la inestabilidad se produce con tensiones nominales aplicadas inferiores a las requeridas para llevar al ligamento no fisurado a un estado de fluencia generalizado.

En la práctica, todas las estructuras ingenieriles contienen fisuras, o defectos tipo fisuras a alguna escala, en la mayoría de los casos detectables por medio de ensayos no destructivos. Muchas veces, un END revela algún defecto; como en general la estructura o pieza se ha estado comportando satisfactoriamente, se produce la discusión si el defecto deberá ser reparado o no. La situación se complica cuando se sabe, o se sospecha, que el defecto puede crecer lentamente por fatiga o por acción del medio ambiente. Además, sabemos que cuando existen ciertas condiciones, se puede producir una fractura frágil inestable a niveles de tensión bien por debajo del límite de diseño elástico (por ejemplo: bajas temperaturas de servicio, defectos de soldadura, etc.)

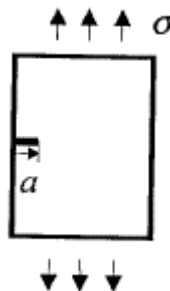
El conocimiento de la mecánica de fractura mejora las condiciones de diseño donde los efectos de los defectos y las condiciones de operación son explícitamente tomados en cuenta para reducir las consecuencias de una posible fractura.

La mecánica de fractura considera el efecto de los defectos semejantes a fisuras (tanto en micro como en macro escala) sobre la integridad estructural. Se basa en la suposición de que fisuras o defectos semejantes a fisuras están inicialmente presentes, o podrían desarrollarse durante el servicio.

En un criterio simple, la fractura está dada por la condición de que una fisura se propague. La mecánica de fractura busca cuantificar las combinaciones críticas de tensión y tamaño de fisura que produzcan la extensión de la misma.

Los tres parámetros importantes que analiza la mecánica de fractura son:

1. La tensión global aplicada sobre el componente o estructura (σ)
2. Las propiedades de resistencia a la fractura, características del material
3. El tamaño de cualquier defecto presente semejante a una fisura (a)



El concepto básico de la mecánica de fractura es relacionar las condiciones de carga aplicadas en el cuerpo (o estructura) fisurado y la resistencia del material al crecimiento de fisura y fractura. La falla ocurrirá si la resistencia del material a la fractura, con la presencia de una fisura aguda, es menor que las condiciones tensión-deformación impuestas por las condiciones de carga y geometría.

El origen del estudio y análisis que luego derivó en la teoría de mecánica de fractura está basado en el trabajo de Griffith e Irwin, quienes estudiaron los problemas de rotura que involucran fisuras, de una manera cuantitativa.

A continuación explicaremos los fundamentos de este campo y discutiremos un número de condiciones que se deben cumplir para que sea válido el uso de la fractomecánica en el análisis de falla.

Análisis de Griffith de las tensiones críticas para fractura frágil

Griffith estudió el comportamiento de la fractura del vidrio de sílice, un material muy frágil. A temperatura ambiente, la curva tensión-deformación para este tipo de vidrio es lineal hasta la rotura. La resistencia teórica de este tipo de vidrio es aproximadamente “E/10”, pero en presencia de pequeñas fisuras la tensión de rotura es varios ordenes de magnitud inferior a la resistencia teórica del vidrio. El análisis de Griffith fue exitoso en explicar por qué pasa esto y así brindó las bases para el campo de la mecánica de fractura.

El análisis de Griffith se basa en la primera ley de la termodinámica, que establece que en un sistema cerrado la energía se conserva. Dos tipos de energía son consideradas, energía de deformación y energía de superficie. Consideramos dos probetas en forma de láminas, delgadas, sujetas a una tensión de tracción “ σ ”. Una probeta tiene una fisura, que es muy pequeña en longitud respecto al ancho de la lámina; la otra no tiene fisura. Si cada una de estas probetas es cargada en tracción hasta obtener el mismo desplazamiento, habrá una pequeña diferencia en los gráficos carga-deformación, ya que se requerirá menos carga para extender la probeta fisurada que la no fisurada, una dada cantidad. La energía elástica almacenada en cada probeta hasta una dada deformación “ Δ ”, está dada por el área bajo la curva correspondiente y es igual a “ $\frac{1}{2}P.\Delta$ ”, donde “P” para la probeta fisurada es menor que para la probeta no fisurada. Griffith usó esta diferencia en la energía elástica almacenada para desarrollar una teoría para la rotura frágil. Razonó que, para ir del estado sin fisura al fisurado, no hay solo una disminución en la energía elástica, sino también un incremento en la energía de superficie, debido a la creación de una nueva superficie con fisura. A continuación se desarrolla el análisis realizado por Griffith: La energía de un cuerpo idealmente elástico y rígido son presencia de fisuras es:

$$U_0 = \sigma^2/2E \text{ energía por unidad de volumen}$$

Basándose en las investigaciones sobre cuerpos fisurados realizadas por Inglis (1913) el cual determino que la energía en un cuerpo fisurado, con fisura de tamaño $2a$ es:

$$U_e = \pi.a^2.\sigma^2/E$$

y tomando en cuenta que la energía superficial del cuerpo viene dada por

$$U_s = 2.2.a.\gamma_s$$

Donde γ_s Tensión superficial (determinada por Griffith de manera experimental)

Si se escribe la ecuación de la energía potencial total se tendrá:

$$U_t = U_0 - U_e + U_s$$

Donde el signo menos indica la disminución en la energía potencial elástica del sistema por la presencia de la fisura

Debido a que es un sistema cerrado, por el primer principio de la termodinámica, la energía se conserva. A partir de esto y de suponer un cuerpo previamente fisurado, Griffith razonó que la fisura ocurrirá cuando la velocidad en que disminuye la energía potencial elástica es igual a la velocidad con la que es absorbida para generara nuevas superficies de fisuras.

O bien, que es la misma idea, la propagación ocurrirá cuando la tasa o velocidad de energía de deformación liberada iguale a la tasa a la cuál la energía es absorbida para la creación de nuevas superficies de fractura/fisura. Esta condición puede ser expresada como

$$d/da (\pi.a^2.\sigma^2/E) = d/da (4.a.\gamma_s)$$

$$2.\pi.a.\sigma^2/E = 4.\gamma_s ; \text{ que lleva a}$$

$$\sigma_c = (2.E .\gamma_s/ \pi.a)^{1/2}$$

Donde: “ σ_c ” es la tensión crítica requerida para la propagación de una fractura frágil. Nótese que para tensiones inferiores al valor crítico, la fisura no se propagará ya que la energía de deformación que sería liberada, en un virtual avance de fisura, sería inferior a la necesaria para formar nuevas superficies.

De estos análisis se pudo observar, entre otras, que para el vidrio (elástico lineal y de comportamiento frágil) los resultados estaban de acuerdo con las predicciones basadas en estas ecuaciones ya que de ensayos de tracción realizados sobre estos materiales los valores de resistencia obtenidos eran inferiores a los determinados por las teorías que consideran la vinculación atómica para el cálculo de la resistencia.

La ecuación anterior también puede ser escrita como

$$\sigma_c (\pi.a)^{1/2} = (2.E .\gamma_s)^{1/2}$$

donde las cantidades extrínsecas “ σ_c ” y “ a ” quedan del lado izquierdo de la ecuación, y las cantidades intrínsecas “ E ” y “ γ_s ” quedan del lado derecho. $\sigma_c (\pi.a)^{1/2}$ es una combinación de términos comúnmente encontrados en fractomecánica, denominada “ K_c ”. “ K ”, en general es conocido como factor de intensidad de tensiones y depende de la geometría del componente, su nivel de tensión y la longitud de la fisura. Para la geometría de Griffith, $K = \sigma_c (\pi.a)^{1/2}$.

El subíndice c es usado para indicar que el valor de K es el valor crítico para fractura; esto es, “ $K_c = (2.E .\gamma_s)^{1/2}$ ”. “ K_c ” es conocido como “tenacidad a la fractura”. K_c es el valor crítico del factor de intensidad de tensiones que provoca la inestabilidad de la fisura.

En el rango lineal elástico, la tensión en el frente de una fisura bajo tensión es gobernada por el factor de intensidad de tensiones, que se expresa como “ $\sigma_{yy} (\pi.a)^{1/2} = K/(2.\pi.r)^{1/2}$ ”, donde “ r ” es la distancia medida desde la punta de la fisura.

Entonces, para que se produzca una fractura, se debe exceder un valor característico de cada material. Este parámetro es de gran importancia pues cuanto mayor sea su valor, tanto mayor será la tenacidad o sea, la “resistencia” que un material presenta a la fractura.

Hasta ahora el único tipo de geometría analizada es una lámina ancha conteniendo una pequeña fisura. Cuando la longitud de la fisura es apreciable con respecto al ancho, entonces debe realizarse una corrección en el factor de intensidad de tensiones debido al ancho finito. Teniendo en cuenta el factor de corrección para una placa con una fisura centrada, el factor de intensidad de tensiones es

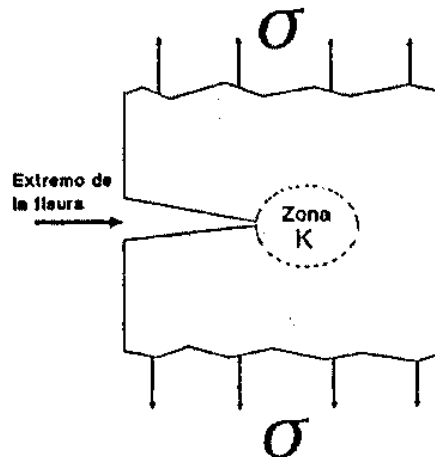
$$K = \sigma (\pi.a)^{1/2} . (\sec (\pi.a/W))^{1/2}.$$

En el caso de una fisura semicircular superficial, el factor de intensidad de tensiones en la superficie es

$$K = 1,12 \cdot (2/\pi) \cdot \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2}.$$

Donde a la profundidad máxima "a", el factor de intensidad de tensiones es un poco menor.

$$K = (2/\pi) \cdot \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2}.$$



La mecánica de fractura define un parámetro K, denominándolo factor de intensidad de tensiones, que como se explicó anteriormente, depende entre otras cosas del tipo de carga y la geometría de la fisura presente (σ y a). El trabajo necesario por unidad de área para extender la fisura suele designarse fuerza impulsora crítica y representarse con el símbolo G_c . Genéricamente $Kc^2 = E G_c$.

El valor crítico de K con respecto al inicio de la fractura, K_c , es por lo tanto el parámetro que caracteriza la resistencia a la fractura del material y se lo denomina Tenacidad a la Fractura o Fractoténacidad del Material, y permiten evaluar el potencial de falla y la vida útil remanente de una estructura o componente conteniendo un defecto.

Para evitar la falla, la resistencia del material debe exceder las condiciones aplicadas en el extremo de la fisura, denominada genéricamente como: fuerza impulsora de fisura.

Resistencia del Material > Fuerza Impulsora de Fisura

La idea básica es describir ambos lados de esta ecuación con términos comunes, que representen tanto las condiciones de impulso de fisura (G_c), como el comportamiento del material, o su respuesta a esas condiciones.

Las principales áreas de estudio de la mecánica de fractura relacionan las propiedades de los materiales, los defectos presentes y las tensiones actuantes. Factores como la tenacidad del material, las condiciones operativas, las condiciones de carga y la geometría del componente gobiernan la selección del análisis de la mecánica de fractura apropiado.



Se han desarrollado diferentes parámetros que caracterizan las condiciones en el extremo de la fisura, para cada una de las tres categorías en que se divide la mecánica de fractura:

1. Mecánica de Fractura Elástica Lineal (LEFM)
2. Mecánica de Fractura Elasto-Plástica (EPFM)
3. Mecánica de Fractura dependiente del tiempo, a alta temperatura (HTTDFM)

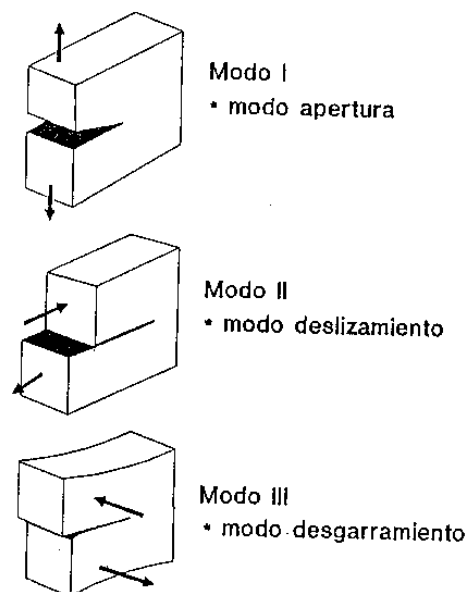
Cualquier movimiento relativo de las superficies de una fisura puede obtenerse como una combinación de tres movimientos básicos o modos de apertura, o sea, existen tres diferentes modos de carga en un cuerpo fisurado:

Modo I: apertura; el cuerpo fisurado se carga con tensiones normales.

Modo II: deslizamiento o corte plano; el desplazamiento de la superficie de la fisura se halla en el plano de fisura y es perpendicular al borde principal de la fisura.

Modo III: rasgado, causado por corte fuera de plano; el desplazamiento de las superficies de la fisura se halla en el plano de fisura y es paralelo al borde principal de la fisura.

Desde el punto de vista técnico, el Modo I es el modo de carga más importante, y estudiaremos solo este modo de falla.

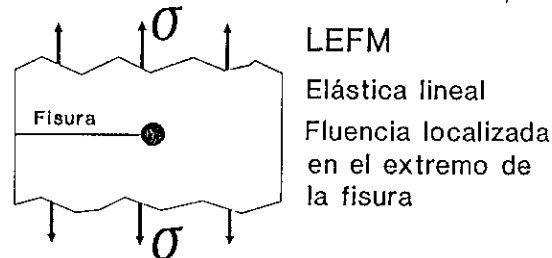


Los tres modos típicos de falla.

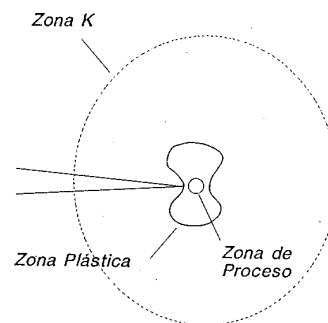
MECÁNICA DE FRACTURA ELÁSTICA LINEAL (LEFM)

Mecánica de Fractura Elástica Lineal (LEFM, Linear-Elastic Fracture Mechanics)

La LEFM se basa sobre el análisis de tensiones elásticas en materiales relativamente frágiles, conteniendo fisuras infinitamente agudas.



La LEFM se aplica a situaciones de fractura frágil, donde la respuesta carga-deflexión de un cuerpo fisurado muestra esencialmente un comportamiento elástico-lineal hasta el punto donde ocurre una fractura inestable frágil. Existe una plasticidad (fluencia) altamente localizada en el extremo de la fisura, que precede a la fractura frágil, pero su zona de influencia es muy pequeña y no afecta el comportamiento total carga-deflexión. Las tensiones corresponden a las de fluencia o por encima de ella debido al endurecimiento por deformación localizado.



Algunas de las condiciones que promueven la aparición de este tipo de fisuras son:

- Alta resistencia a la fluencia, materiales relativamente frágiles
- Bajas temperaturas de operación
- Espesores de pared o secciones muy gruesas
- Constricciones mecánicas presentes en la estructura
- Velocidades de carga muy altas (impacto)

Bajo estas condiciones el material puede fracturar de una manera frágil, sin ninguna deformación plástica perceptible.

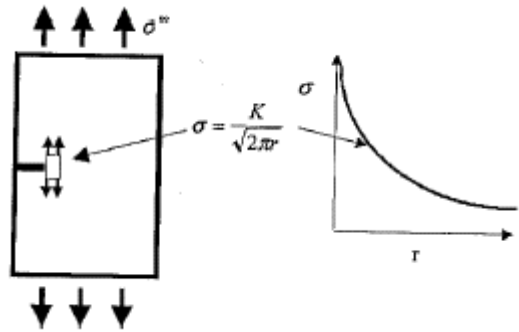
La intensidad del campo tensión-deformación elástico y localizado en las proximidades del extremo de la fisura, está descrito por medio del “*Factor de Intensidad de Tensiones = K*”

Irwin demostró que la LEFM puede ser usada incluso en presencia de deformación plástica. Sin embargo es necesario imponer límites en la extensión de la deformación plástica para que la LEFM continúe siendo válida. Es necesario que el tamaño de la zona plástica que se desarrolla en un metal en la punta de la fisura sea pequeña con respecto a la longitud de la fisura.

Empleando la mecánica del continuo (para geometría y cargas aplicadas especificadas), podemos caracterizar los campos de tensión (y deformación) próximo al extremo de la fisura.

En el Modo I de carga, para apertura de fisura en la dirección yy:

$$\sigma_{yy} = K / (2\pi r)^{1/2} \quad \text{para } r \rightarrow 0$$



Así, para condiciones elásticas lineales, los campos de tensiones en los extremos de las fisuras pueden caracterizarse por un único valor singular, único de K , que también constituye un valor particular del parámetro fuerza impulsora de fisura.

Es decir, la magnitud de la intensificación de las tensiones elásticas en la región del extremo de la fisura puede describirse por un término singular único, K , que depende de:

- La carga aplicada externamente, " σ "
- La longitud de la fisura, " a "
- La geometría del cuerpo fisurado y método de aplicación de carga, \mathfrak{S}

$$K = f(\sigma \sqrt{a} \mathfrak{S})$$

La iniciación de fisura ocurre si:

$$K > K_{IC}$$

Factor de intensidad de tensiones aplicado > Tenacidad del material

El parámetro K_{IC} es una medida de la resistencia del material a la fractura frágil, en deformación plana, y se lo conoce usualmente como la tenacidad a la fractura en deformación plana. Se predice que ocurre extensión rápida de la fisura cuando K alcanza K_{IC} , siendo K_{IC} una propiedad singular del material para una dada condición del material, temperatura y velocidad de carga.

Las expresiones de K se determinaron para una gran número de diferentes geometrías de cuerpos fisurados, configuraciones de fisura, y situaciones de carga. Cada expresión de K contiene todos los términos que se requieren para suministrar las relaciones necesarias entre la tensión aplicada nominal, tamaño de fisura y condiciones de geometría. K también puede relacionarse con las propiedades de los materiales.

En esencia, estas expresiones de K solo son formas más elaboradas de la ecuación: Resistencia del Material > Fuerza Impulsora de Fisura, que facilitan la evaluación del balance entre las condiciones aplicadas en el extremo de la fisura (o fuerza impulsora de fisura), y la resistencia del material al crecimiento de fisura y fractura.

Partiendo de la hipótesis de un material elástico-lineal completamente frágil, sabemos que los materiales reales desarrollan inevitablemente una zona plástica en el vértice de una fisura bajo carga. Consideremos un continuo elástico lineal o hookeano fisurado y sometido a una carga P , que solicita a la pieza en Modo I de apertura, como consecuencia de la carga aplicada se produce una extensión da de la fisura.

Para determinar K_{IC} , es necesario adoptar algún criterio que nos permita identificar con precisión satisfactoria el evento correspondiente a la iniciación de la propagación inestable de la fisura, a fin de obtener K_{IC} simplemente como el valor de K_I correspondiente a dicho evento.

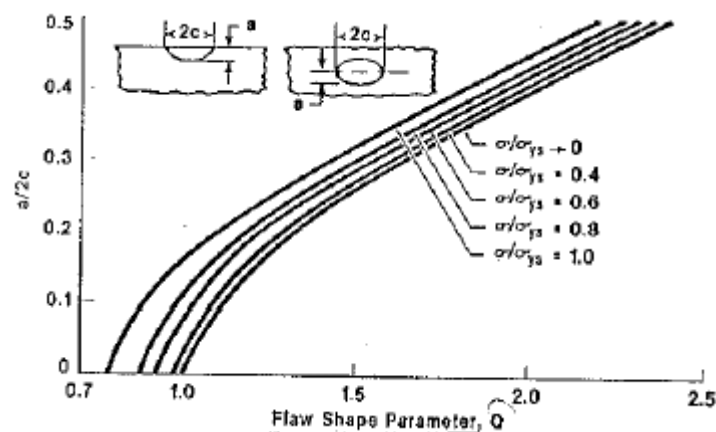
El objetivo fundamental consiste en la identificación y determinación de un parámetro (K_{IC}), que bajo ciertas condiciones (esencialmente deformación plana), caracterice la iniciación de la extensión de una fisura preexistente en un cuerpo dado. Ojo, la iniciación de la extensión no coincide necesariamente con el comienzo de la propagación inestable (y por lo tanto, catastrófica) que conduce al colapso instantáneo del cuerpo o estructura. Esto se debe a que, en general, bajo cargas estáticas o cuasi-estáticas (es decir, aplicadas en forma gradual y lenta), una fisura posee dos comportamientos fundamentales: propagación rápida o inestable, o extensión lenta estable. La experiencia demuestra que aquellos materiales con capacidad para deformarse plásticamente, la propagación (rápida), si llega a producirse, está generalmente precedida por una extensión (lenta) de la fisura. Esta extensión estable puede ser significativa, ya que en muchos casos resulta comparable o aún mayor que la longitud inicial de la fisura. Por lo tanto, desde el punto de vista práctico, es muy importante poder determinar no solo las condiciones de iniciación sino también aquellas para las cuales se produce la propagación inestable de una fisura.

Hay varios métodos para establecer el valor de K apropiado para una situación específica: programas de computación de elementos finitos, calibraciones experimentales, técnicas fotoelásticas. En la práctica, se puede hallar la expresión apropiada en un manual de mecánica de fractura, que equipare adecuadamente la geometría del cuerpo fisurado, el tipo de fisura, y las condiciones particulares de carga.

Por ejemplo, para una fisura semielíptica, orientada normalmente a la tensión aplicada:

$$\text{Fisura superficial: } K^2 = 1.21 \pi \sigma^2 (a/Q); \quad \text{Fisura Interna: } K^2 = \pi \sigma^2 (a/Q);$$

Donde σ es la tensión de tracción nominal; a es la profundidad de la fisura, y a/Q es un parámetro de forma de la fisura.



La esencia de la LEFM es permitir relacionar el K aplicado (fuerza impulsora de fisura) al crecimiento de la fisura, y las características de resistencia a la fractura para un material dado (que puede expresarse en términos de niveles críticos de K).

Cuando se considera fractura frágil bajo condiciones de carga elástica lineal (deformación plana), un material dado puede tolerar solo un nivel determinado de K aplicado (intensidad de tensiones) antes de que fracture.

Si vemos la figura, para un tamaño de fisura (a) y geometría fijos, el K aplicado en la región del extremo de la fisura continuará incrementándose a medida que se incremente la carga (tensión σ). Cuando la tensión alcance un valor crítico (equivalente a la resistencia a la fractura específica del material, la fisura se hará inestable y frágil y ocurrirá una fractura rápida. Este valor crítico

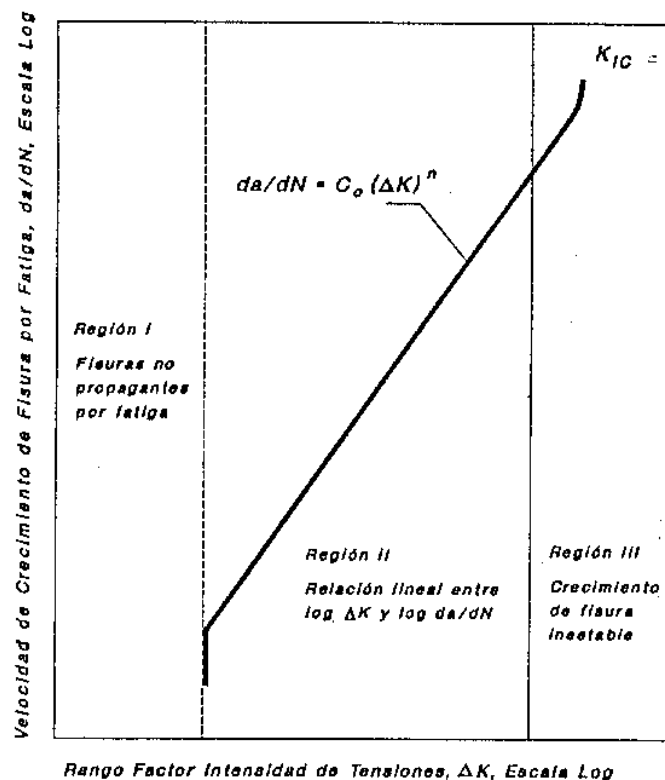
de K se denomina K_{IC} (tenacidad a la fractura en deformación plana, Modo I de fractura), y puede ser considerada como una constante del material para unas dadas condiciones metalúrgicas, de temperatura y velocidad de carga. Por lo tanto, para un material dado, la fractura ocurrirá cuando el K aplicado alcance K_{IC} , sin tener en cuenta la geometría, el tamaño de la fisura y la forma de carga del cuerpo fisurado.

K_{IC} puede ser medido en laboratorio con una geometría de probeta simple, y este valor puede ser usado para evaluar el potencia de fractura frágil de otras geometrías y estructuras fisuradas del mismo material.

K_{IC} = resistencia a la fractura frágil del material.

Mientras que la vida de un componente puede determinarse cuando el factor de intensidad de tensiones aplicado alcanza un valor crítico (K_{IC}), la vida útil del mismo depende la velocidad de crecimiento de fallas, desde un tamaño subcrítico hasta el tamaño crítico (cuando K llegue a K_{IC}). Para ello, debemos caracterizar la resistencia del material al crecimiento de fisura en términos de K , bajo condiciones de carga cíclica (fatiga) y/o estática (corrosión bajo tensión, etc).

Para el caso de fatiga, la velocidad de crecimiento de fisura puede expresarse como da/dN (cambio del tamaño de la fisura, a , en relación al número de ciclos de carga, N), y depende principalmente del rango cíclico del factor de intensidad de tensiones aplicado, ΔK . Paris propuso que la velocidad de propagación de una fisura por fatiga es función de los factores de intensidad de tensión involucrados: $da/dN = f(\Delta K)$.



Limitaciones de la LEFM:

La LEFM se aplica para analizar y predecir todos los aspectos del comportamiento del crecimiento de fisura subcrítico (fatiga, fatiga asistida por el medio, corrosión bajo tensión, etc.). Excepto en los casos en que la fractura ocurre a niveles de tensiones muy bajos, o en materiales muy frágiles, siempre hay una importante cantidad de deformación plástica en la punta de la fisura. Pero algunas veces, debido al importante tamaño de la estructura, la deformación plástica es pequeña en relación a las dimensiones características de la misma, siendo válido el análisis lineal elástico.

El criterio K_{IC} no puede ser usado en materiales con comportamiento marcadamente no lineal (tales como aceros dúctiles con gran deformación plástica en la punta de la grieta, o fundiciones grises).

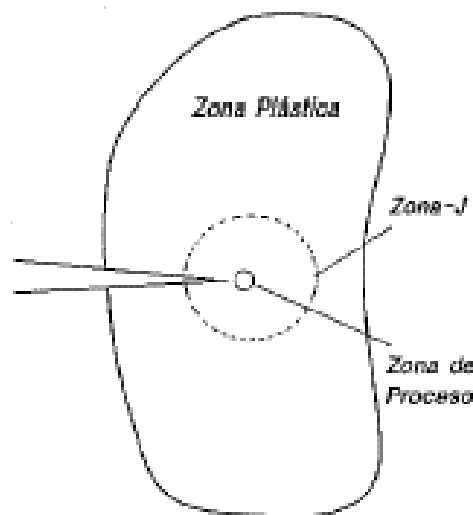
MECÁNICA DE FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA (EPFM)

Mecánica de Fractura Elasto-Plástica (EPFM, Elasto-Plastic Fracture Mechanics)

Si bien es muy similar a la LEFM, la EPFM utiliza un parámetro diferente para caracterizar la intensidad de tensión-deformación en el extremo de la fisura. En este caso, el parámetro se denomina J .

J es simplemente un parámetro que define la intensidad de la tensión y deformación plástica en la región que rodea el extremo de la fisura. J es una función de la tensión, deformación, tamaño de fisura, y geometría de la fisura y cuerpo. Es análogo a K utilizado en LEFM. La mayor diferencia es que J representa la intensidad del campo elasto-plástico que rodea al extremo de fisura, mientras que K es la intensidad del campo elástico circundante.

Este método se usa cuando la cantidad de plasticidad (fluencia) en el extremo de la fisura que precede a la fractura, o se halla asociada al evento de fractura, es considerable. En otras palabras, no se pueden despreciar los efectos de la plasticidad.



La EPFM se aplica a un intervalo de temperaturas más amplio que la LEFM, donde la fractura es del tipo dúctil; en materiales más tenaces, y en secciones delgadas.

- La sección no es lo suficientemente gruesa como para satisfacer los requerimientos de tamaño de la LEFM
- El rango de temperaturas es lo suficientemente alto, como para dar lugar a niveles de tenacidad mucho más altos que aquellos a más bajas temperaturas.
- El modo de fractura de los aceros estructurales cambia del tipo frágil al tipo dúctil con el incremento de la temperatura.
- Los aceros inoxidable austeníticos son muy tenaces como para poder aplicarles la LEFM.

Busca una relación entre la tensión aplicada, tamaño de grieta y tenacidad del material, que sea independiente de la geometría del componente, en casos en que la fractura ocurre después de una deformación plástica significativa.

El proceso de fractura dúctil ocurre por la iniciación y crecimiento estable de una grieta:

- 1) La fisura aguda va adquiriendo una forma roma con las primeras cargas.
- 2) De la punta roma de la grieta se desarrolla una nueva fisura aguda.
- 3) Esta fisura crece en forma estable.

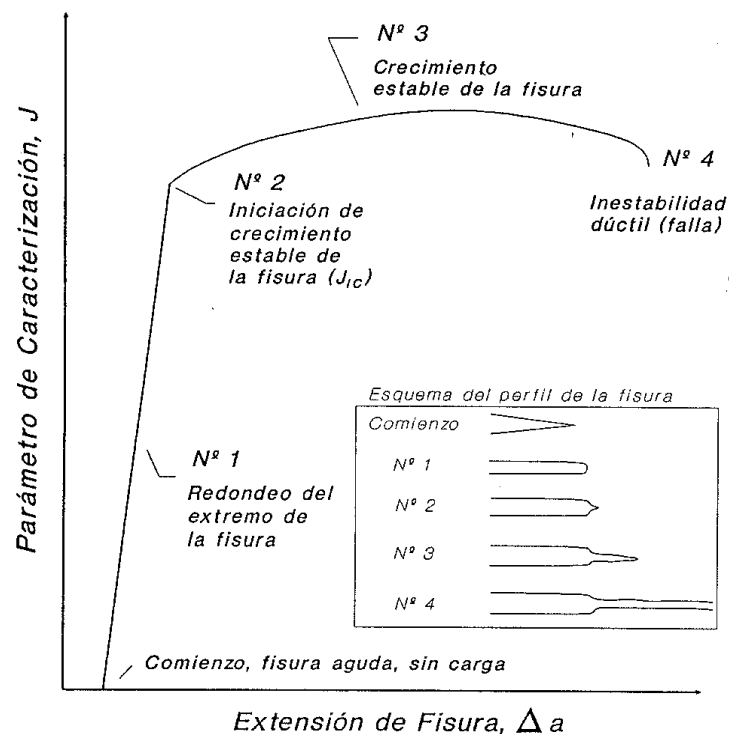
4) La grieta crece en forma inestable.

En materiales dúctiles, particularmente bajo condiciones de tensiones planas, el inicio de la extensión de la fisura, bajo condiciones de carga crecientes ocurre a niveles de carga por debajo de la carga máxima. Hay un rango de cargas dentro del cual una fisura se propaga de manera estable, es decir, la resistencia a la propagación de la fisura inestable se incrementa con la extensión de la fisura en el rango estable de crecimiento. Aún bajo condiciones de deformación plana de carga, hay un pequeño incremento de crecimiento estable de fisura antes que ocurra el crecimiento inestable. Este incremento en la resistencia está relacionado con el incremento de la zona plástica en la punta de la fisura, y también con el redondeo del extremo de la fisura a medida que avanza. Este tipo de comportamiento depende del espesor de la probeta, la temperatura y la tasa de deformación. Esto puede ser representado por una curva de resistencia al crecimiento de fisura, curva R, que grafica tenacidad vs. crecimiento dúctil de grieta.

La curva R es independiente de la longitud inicial de fisura a_0 y de la configuración de la probeta en la cuál se desarrolla. Para un dado material, espesor de probeta y temperatura de ensayo, la curva R es función solo de la extensión de la fisura Δa .

En un ensayo de tenacidad elastoplástica, se carga una probeta hasta que ocurre crecimiento estable de fisura. Se miden dos parámetros: carga y algún desplazamiento; y se determinan la tenacidad (J) y el crecimiento de fisura (Δa).

Según sea la tenacidad del material, la fractura inestable puede ocurrir en cualquier punto de la curva, pudiendo superar ampliamente la carga máxima con un mecanismo de crecimiento dúctil.



Si la fractura ocurre en el punto 1, se puede aplicar el criterio de mecánica de fractura lineal elástica (vale K_{IC}). Si ocurre en el punto 2, ya no es aplicable el criterio de K_{IC} pues hay deformación plástica, aunque aún no haya un crecimiento estable de la fisura. A partir del punto 3 podemos considerar crecimiento estable antes de la fractura. Más allá del punto 4 la fisura se inestabiliza por desgarramiento dúctil.

Consideraremos diferentes diseños para evaluar la tenacidad de materiales con comportamiento elastoplástico.

- Valores críticos, J_C : corresponde a fractura frágil después una deformación plástica suficiente como para invalidar K_{IC} . No tiene en cuenta si hubo o no crecimiento estable de la fisura antes de la fractura.

- b) Valores de iniciación, J_{IC} : corresponde a la iniciación del crecimiento estable. Es independiente de la geometría y características del material, aunque es muy conservativo, pues las estructuras reales admiten un cierto crecimiento estable de fisura.
- c) En particular: $K_{IC} = \sqrt{J_{IC} E}$

A saber, J_{IC} define el nivel de J aplicado para el comienzo de la extensión estable de una fisura dúctil durante una carga monotónica sobre una probeta prefisurada, a una temperatura dentro del régimen de comportamiento dúctil. Es una propiedad básica del material que representa una medida del límite inferior de la tenacidad de fractura dúctil en presencia de una fisura inicial aguda.

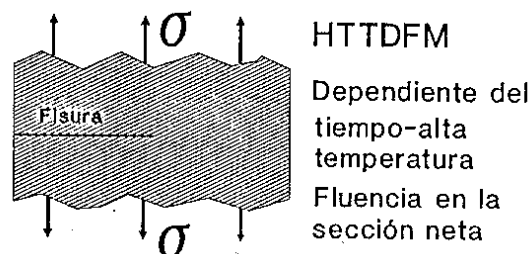
Los metales con estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (aceros ferríticos), exhiben una transición dúctil – frágil muy marcada (fractura por clivaje a bajas temperaturas y desgarramiento dúctil a temperaturas más altas). Esto se debe a la elevación de la tensión de fluencia al disminuir la temperatura, de tal modo que en las inmediaciones de la punta de la fisura se alcanzan tensiones de tracción suficientes como para iniciar un proceso de fractura frágil.

En la zona superior será necesario un mayor endurecimiento por deformación, o sea, mayor deformación plástica (acompañada o no por crecimiento estable de fisura), J_{IC} .

En el sector inferior, se utiliza K_{IC} , que caracteriza a la tenacidad debajo de la temperatura de transición y en el comienzo de la región de transición.

Mecánica de Fractura Dependiente de Tiempo, a Altas Temperaturas (HTTDFM, High Temperature, Time-Dependent Fracture Mechanics)

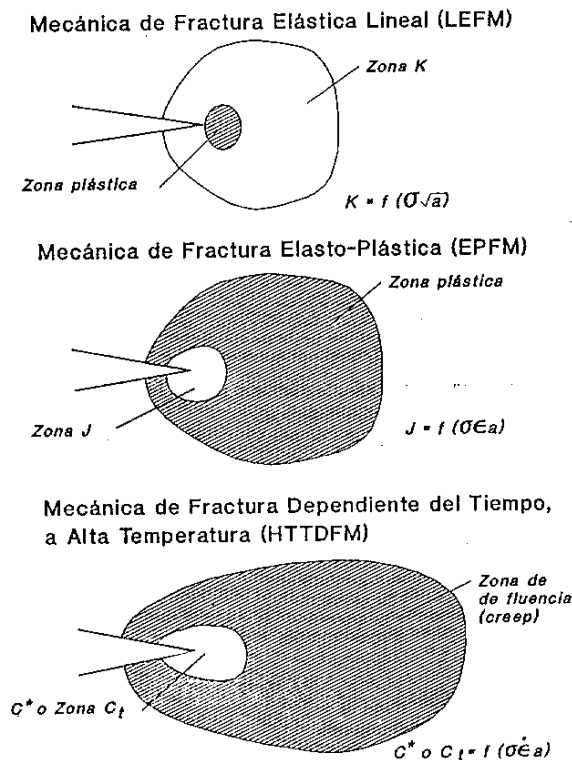
Esta categoría se aplica a situaciones con régimen de comportamiento bajo creep, donde la sección transversal completa del componente, previo a y durante los eventos de crecimiento de fisura y fractura, se halla bajo condiciones totalmente plásticas.



Una derivada de J respecto al tiempo, llamada C^* puede usarse para caracterizar la velocidad de crecimiento de fisura bajo condiciones de creep en estado estacionario. C^* puede ser considerada como la fuerza impulsora de fisura para fisuras en cuerpos que experimentan creep en estado estacionario. El parámetro C^* controla las tensiones próximas al extremo de la fisura una vez que el cuerpo alcanza creep en estado estacionario.

Se observa que las fisuras crecen de una manera estable en sólidos bajo creep debido a la deformación por creep dependiente del tiempo. Bajo condiciones de creep en estado estacionario, la velocidad de crecimiento de fisura se espera que sea controlada por el parámetro C^* , que controla las tensiones cercanas al extremo de la fisura en un sólido bajo creep.

Resumiendo



Evaluación de riesgo a la falla por fractura.

La finalidad del diseño de estructuras (en nuestro caso, aviones) es optimizar su rendimiento relativo a dos parámetros fundamentales: seguridad y costo. El propósito del diseño es producir estructuras que cumplirán sus funciones con eficiencia, seguridad y economía. Aunque el número de fracturas es relativamente pequeño comparado con el número de estructuras en operación, la ocurrencia de fracturas es en general de gran importancia: la falla de un avión es una catástrofe de gran importancia, la pérdida en vidas y las pérdidas financieras son considerables.

Los criterios clásicos son inadecuados para prevenir la fractura estructural, para ello es necesario recurrir a la mecánica de fractura. Aplicada adecuadamente, provee los medios para alcanzar estructuras libres de fractura, y los medios para la vigilancia y análisis de estructuras que se encuentran en funcionamiento y cuya fractura se desea prevenir.

Los métodos para prevenir la fractura se pueden dividir en dos grandes grupos: control de iniciación de la fractura, y control de la propagación. Una pieza debe tener una vida libre de rotura que debe extenderse a toda la vida útil de la estructura en la cual está montada. Una estructura no puede fabricarse sin que tenga defectos, pero la fisura de mayor tamaño que exista no debe llegar al tamaño crítico durante la vida útil.

El conocimiento de las leyes de propagación de fisuras y el comportamiento a la fractura del material nos permitirá calcular el tamaño crítico, y de allí extraer cual debe ser el tamaño máximo que podemos permitir. Una inspección por medio de ensayos no destructivos nos permitirá la determinación del tamaño de las fallas existentes, y conducirá a la reparación, si se puede, de los defectos con tamaños mayores que los límites preestablecidos. En estructuras de importancia, es necesaria la inspección por fisuras durante toda la vida útil.

Un buen ejemplo de los métodos de control de la propagación de las fisuras lo dan las estructuras de aviones. Debido a la alta resistencia de los materiales utilizados por exigencias de peso, es imposible impedir que el fenómeno de fractura frágil ocurra. Se establece mediante cálculos el periodo de propagación de las fisuras, desde el tamaño inicial que resulta de la inspección por ultrasonido hasta el tamaño crítico. En base a estos cálculos se establecen periodos de inspección que se seleccionan de manera que exista la seguridad de que las fisuras serán verificadas antes de

que puedan alcanzar el tamaño crítico. Cuando alguna fisura supera un cierto valor admisible, se toman medidas de corrección, ya sea mediante reparación o reemplazo de la parte fisurada. La otra filosofía básica es utilizar materiales los cuales, debido a la tenacidad, la propagación de la fisura hasta el tamaño crítico se de una probabilidad muy pequeña. Esta filosofía requiere fundamentalmente la selección de materiales que tengan una alta tenacidad; por lo tanto otras propiedades, tales como elevado límite de fluencia, son sacrificadas frente a la obtención del grado de tenacidad deseado. Esto implica trabajar con tensiones menores y con espesores mayores, por lo tanto peso de estructuras mayores. Esta elección muchas veces no es posible, tal es el caso de las estructuras aéreas. La filosofía es pues, aceptar que la rotura frágil es posible y tratar de controlarla para que las fisuras no puedan llegar al tamaño crítico.

Tamaño crítico de fisura: cuanto más grande es una fisura, mayor es la probabilidad de detectarla. Cuanto mayor es el tamaño de la fisura crítica, se requiere mucho mayor tiempo para que sea alcanzado ese tamaño. Por consiguiente, los materiales que pueden tolerar tamaños críticos de fisuras grandes, son los más elegidos.

El factor que controla el tamaño de la fisura es la relación de la tenacidad a la tensión de fluencia. Cuanto mayor sea esta relación, más favorables serán las condiciones del material desde el punto de vista del tamaño crítico de fisura. También importante para juzgar el comportamiento del material a la fractura es la geometría, fundamentalmente el espesor.

De acuerdo al régimen de trabajo se adoptará un criterio adecuado para estudiar la posibilidad de fractura:

- a) Lineal elástico: K_{IC} , K_{IC}
- b) Elasto plástico: J_c , J_{IC}

Existen diversas filosofías de diseño que son ya clásicas en el campo de la mecánica de fractura. Hay dos tipos básicos: “safe life” y “fail safe”.

- a) “Safe Life”: se aplica a estructuras sujetas a fatiga. Se establece o se estima mediante métodos experimentales y analíticos una vida de servicio útil, y se diseña el componente o estructural de manera tal que su vida útil sea igual o ligeramente mayor que la vida requerida. En el caso de estructuras de aviación o componentes de motores de aviones, inspecciones periódicas determinan si se han producido fisuras prematuramente. Para que esta filosofía de diseño sea confiable, es necesario conocer con gran precisión el espectro de cargas al cual el componente va a estar sometido durante su vida en servicio, como también, conocer la respuesta del material a esas cargas.
- b) “Fail Safe”: se basa en el concepto de redundancia que se utiliza en sistemas complejos. En sistemas integrados por muchos componentes, aunque la probabilidad individual de falla de cada componente no sea muy pequeña, la probabilidad de falla compuesta puede ser alta. Para esto se utiliza la idea de redundancia, introduciendo varios componentes que cumplan la misma función, de manera tal que, si un componente falla, otro toma su función. O sea, la falla de una porción de la estructura no implica necesariamente el colapso total de la misma. Otra idea es la de introducir elementos para detener el avance de las fisuras. Este concepto es usado profundamente en la industria aeronáutica, donde se usan elementos para la detención de fisuras en diversas partes de la estructura de un avión.

Bibliografía:

- “Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention”
Arthur J. McEvily – John Wiley & Son, Inc - 2002
- “The Practical Use of Fracture Mechanics”
David Broek – Kluwer Academic Publishers – 1994
- Apuntes del curso: “Análisis de Falla”
CITEFA - 2003