

NOCIONES SOBRE FRACTOMECAÁNICA

UNIV. TEC. NAC.-FAC. REG. Bs. As.

Ing. Eduardo R. Berton

2005

Durante mucho tiempo se consideró que las roturas de materiales cristalográficos, en especial los aceros, se producen exclusivamente a consecuencia de una superación de la atracción atómica en el seno de sus cristales.

**En esta línea de pensamiento se
encontró el sustento para el
cálculo de estructuras, piezas
mecánicas etc.**

**Las cosas funcionaban y aún
funcionan satisfactoriamente debido a
la útil manipulación de datos
experimentales acumulados a través
de la experiencia, y también a la
utilización de coeficientes de
seguridad mas o menos generosos.**

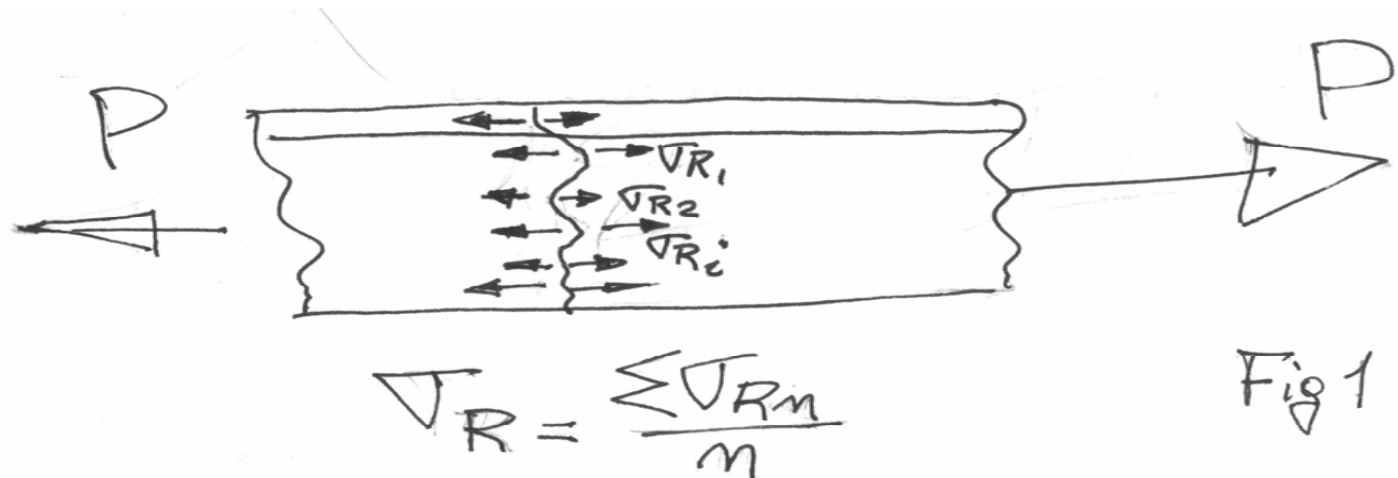
**Todo ello pone a los cálculos al
resguardo de las fallas.**

No obstante nadie que maneja estos temas ignora las imperfecciones de los materiales que usa, en cuanto a las siguientes causas, a saber:

**imperfecciones en el seno de los
cristales, tensiones residuales
derivadas de tratamientos térmicos o
también de laminación o de moldeo
con su consiguiente anárquica forma
de enfriamiento, por nombrar solo
algunas causas.**

No obstante, al estar todo ello involucrado dentro de los términos estadísticos, reditúa una razonable regularidad de los resultados.

Un ejemplo simple permite aclarar esta idea. En una pieza sometida a tracción, ocurrirá que en el seno de la sección en que ocurra la rotura habrá tensiones de fractura mas o menos dispares, pero el promedio de las mismas alcanzará una marcada regularidad Fig 1



**A través de lo indicado
precedentemente, es de recordar que
contrasta que utilicemos en los
cálculos leyes y teorías en las cuales
se supone que los materiales a
involucrar son totalmente isótropos.**

Si es verdad que detrás del advenimiento de nuevas fallas mecánicas se pone en movimiento el estudio de su naturaleza o al menos el manejo de la neutralización de sus causas, ello debe haber ocurrido cuando se desarrolló la tecnología de la soldadura eléctrica.

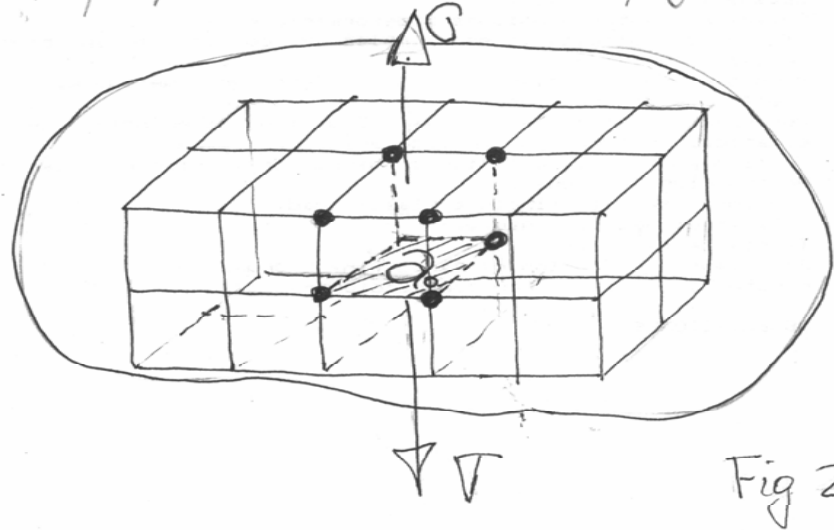
Si bien esta ultima aportó grandes virtudes técnicas, entre las que puede incluirse, disminución de peso, rapidez y simplificación del montaje de estructuras, entre otras. Pero conlleva la producción de tensiones residuales, rigideces estructurales, fenómenos metalográficos etc.

Lo primero fue manejándose mediante tratamientos térmicos posteriores cuando son necesarios, y también estableciendo un orden de optimización en la ejecución de las soldaduras en estructuras complejas.

Lo ultimo se fió a los ensayos no destructivos END, los cuales pueden ser por corrientes inducidas o bien por ultrasonido. Estos métodos tienen la virtud de ser cada vez mas perfectos y eficaces.

**Todas estas evoluciones tecnológicas
motivaron a importantes
investigadores a estudiar el fenómeno
de fractura o la Fractomecánica.**

- **Partiendo de las condiciones ideales en las que un monocristal tenga una estructura regular. Supongamos que sea acero, el cual está representado simplemente en la figura 2**



Siendo a_0 la distancia interatómica, denominada parámetro de red.

“ σ la tensión aplicada

“ x la deformación molecular

“ ε la deformación específica molecular

y E el módulo de elasticidad

$$\varepsilon = \frac{x}{a_0}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = E \frac{x}{a_0}$$

obsérvese que $\sigma_{\perp} \dagger$

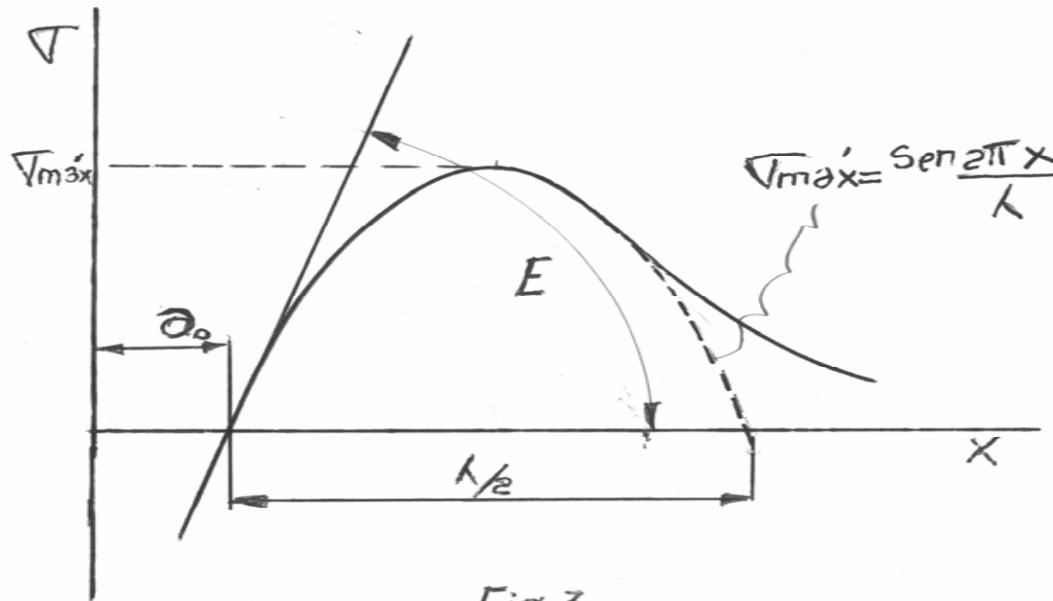


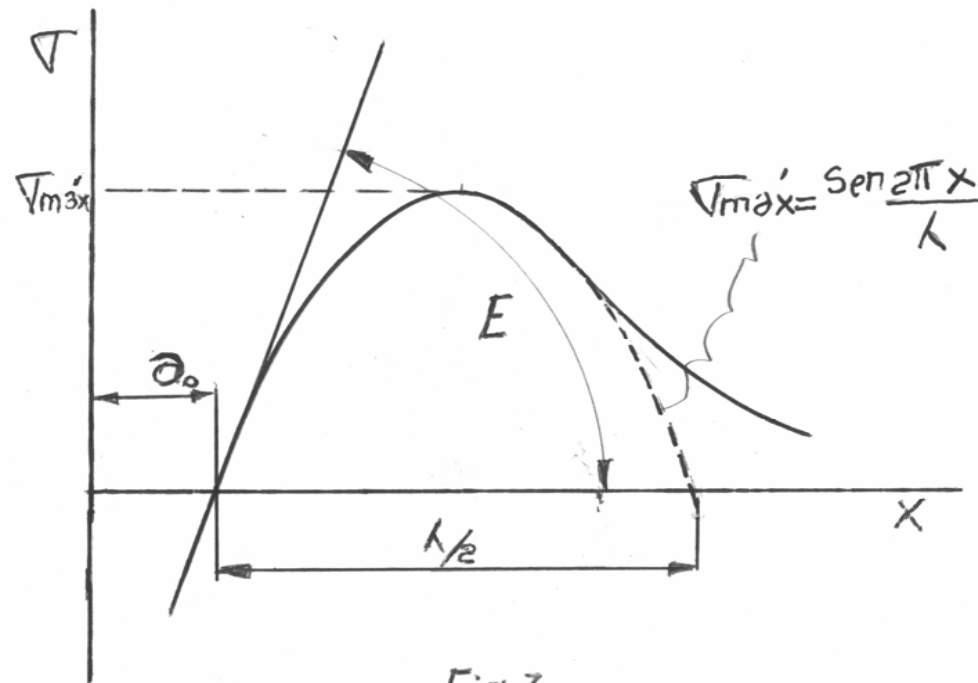
Fig 3

$\sigma_{\text{Máx}}$ Corresponde a la resistencia teórica del material, ya que al ser alcanzada alcanza la inestabilidad y se produce la rotura.

Para valores pequeños de deformación:

$$\sigma = \sigma_{M\acute{a}x} \operatorname{sen} \frac{2\pi x}{\lambda}$$

y para valores de $x = \frac{\lambda}{4}$ se alcanza la resistencia teórica.



El trabajo total que se realiza por unidad de área para lograr la separación de las partes es:

$$U = \int_0^{\frac{\lambda}{2}} \sigma_{m\acute{a}x} \operatorname{sen} \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} dx$$

$$[1] \quad U = \sigma_{m\acute{a}x} \frac{\lambda}{\pi}$$

Por otra parte:

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\sigma_{m\acute{a}x} \operatorname{sen} \frac{2\pi \cdot x}{\lambda} \right)$$

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{2\pi}{\lambda} \operatorname{cos} \frac{2\pi x}{\lambda} \sigma_{m\acute{a}x}$$

Para valores de x pequeños $\cos \frac{2\pi}{\lambda} x \cong 1$

$$[2] \quad \frac{d\sigma}{dx} = \frac{2\pi}{\lambda} \sigma_{m\acute{a}x}$$

Para deformaciones pequeñas $\rightarrow \sigma = E \frac{x}{a_0}$

Entonces $[3] \quad \frac{d\sigma}{dx} = \frac{E}{a_0}$

Combinando [2] y [3] $\frac{2\pi}{\lambda} \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{E}{a_0}$

$$\gamma = \frac{\lambda}{\pi} = \frac{2a_0 \cdot \sigma_{m\acute{a}x}}{E}$$

Que representado en la [1]
$$U = \frac{2\sigma_{m\acute{a}x}^2 \cdot a_0}{E}$$

Aquí está representada toda la energía interatómica para la separación de un cristal. Ahora hay creadas dos nuevas superficies con un correspondiente nivel de energía de superficie de fractura, que es íntegramente igual a la separación de las partes.

$$[4] \quad \frac{2\sigma_{m\acute{a}x}^2 \cdot a_0}{E} = 2\gamma_s$$

Siendo γ_s la tensión superficial del material.

Entonces la [4]
$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{\gamma_s E}{a_0}}$$

Sabiendo que:

$$a_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

y
$$\gamma_s = 0,0012 \frac{\text{Kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2}$$

resulta
$$270.000 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Resistencia unas 100 veces superior a la del acero₂₂ en la realidad.

Esta discrepancia de valores condujo al autor Griffith a postular que las pequeñas fisuras presentes en la masa del cuerpo tensionado actúan como concentradores de tensiones en los extremos de las mismas, las cuales alcanzan el valor teórico calculado aunque la tensión media o “remota” se encuentre en valores inferiores.

**Sobre la base de esas ideas el autor
Orowen, empleó la solución de Inglis
para obtener el valor en el extremo de
la fisura pasante.**

**Considerando que las fisuras son elípticas,
de diámetro mayor $2a$ y diámetro menor $2b$, el
factor de concentración de tensiones es:**

$$[5] \quad k = 1 + \frac{2a}{b}$$

y el radio de curvatura de la elipse en

sus vértices es $\rho = \frac{b^2}{a} \rightarrow b = \sqrt{\rho \cdot a}$

$$b^2 = \rho \cdot a$$

$$\mathbf{y} \quad \frac{a}{b} = \frac{b}{\rho}$$

reemplazando por lo tanto $\rightarrow \frac{a}{b} = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{\rho}}$

Utilizando la [5] y recordando que σ_n es la

tensión remota: $\sigma_{máx} = \sigma_n \cdot K$

por consiguiente $\sigma_{máx} = \sigma_n \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$

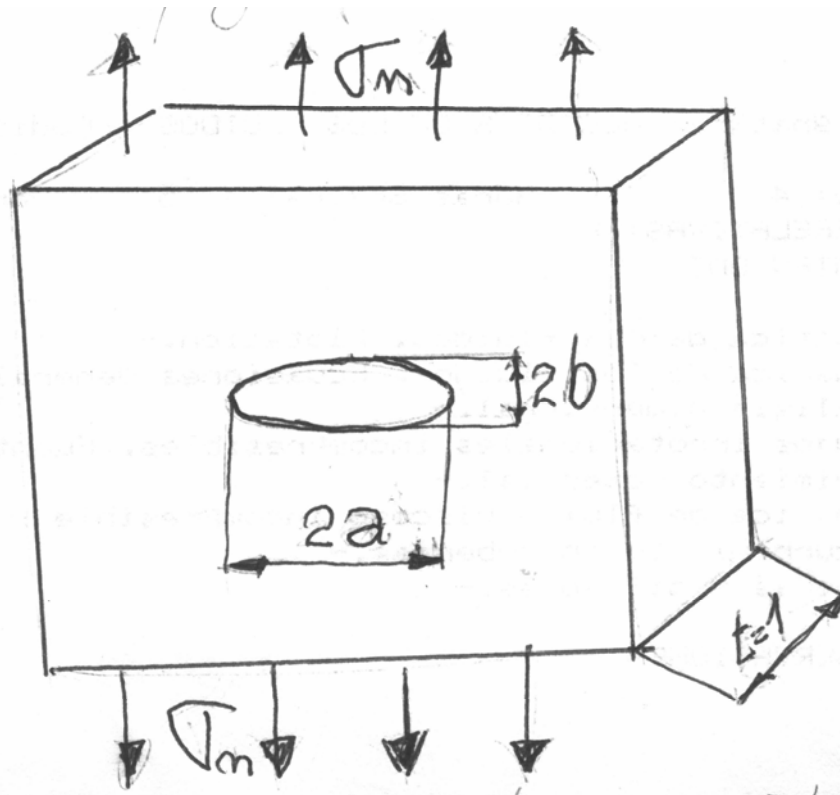
$\sigma_{máx} = \left(\sigma_n + \sigma_n 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$ y si $a \gg \rho$ ~~σ_n~~

$$\sigma_{máx} = \left(2 \sigma_n \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$$

e igualando con la [4] $\sigma_n = \sqrt{\frac{\gamma_s \cdot E \cdot \rho}{4 \cdot a \cdot a_0}}$ [6]

Ahora se va a estudiar la energía desarrollada en una fisura según el criterio de Griffith.

CRITERIO DE GEIFFITH



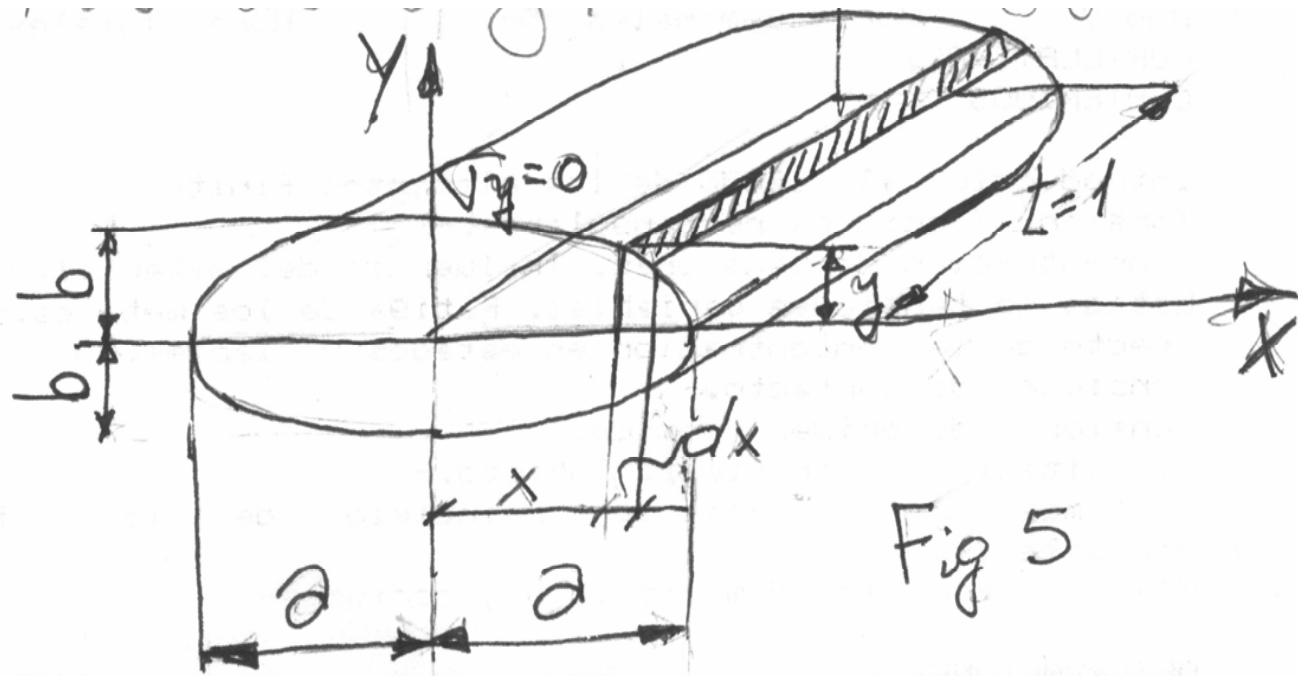
La figura 4 representa una placa supuesta de superficie “infinita”, de espesor unitario, conteniendo una fisura elíptica pasante, sometida a tensión remota uniforme σ_n .

Es evidente que la presencia de la fisura contribuye a disminuir la energía potencial elástica que tendría la placa si no existiera la fisura.

.....

Griffith propuso que para que la fisura se torne inestable y comience a propagarse, la disminución de energía elástica por relajación de tensiones durante el avance de la fisura, debe ser mayor o igual que el aumento de la energía superficial, representada por la creación de nuevas superficies de fractura.

Para formular matemáticamente este criterio, analicemos la energía elástica relajada por la presencia de una fisura elíptica de longitud $2a$
Fig 5.

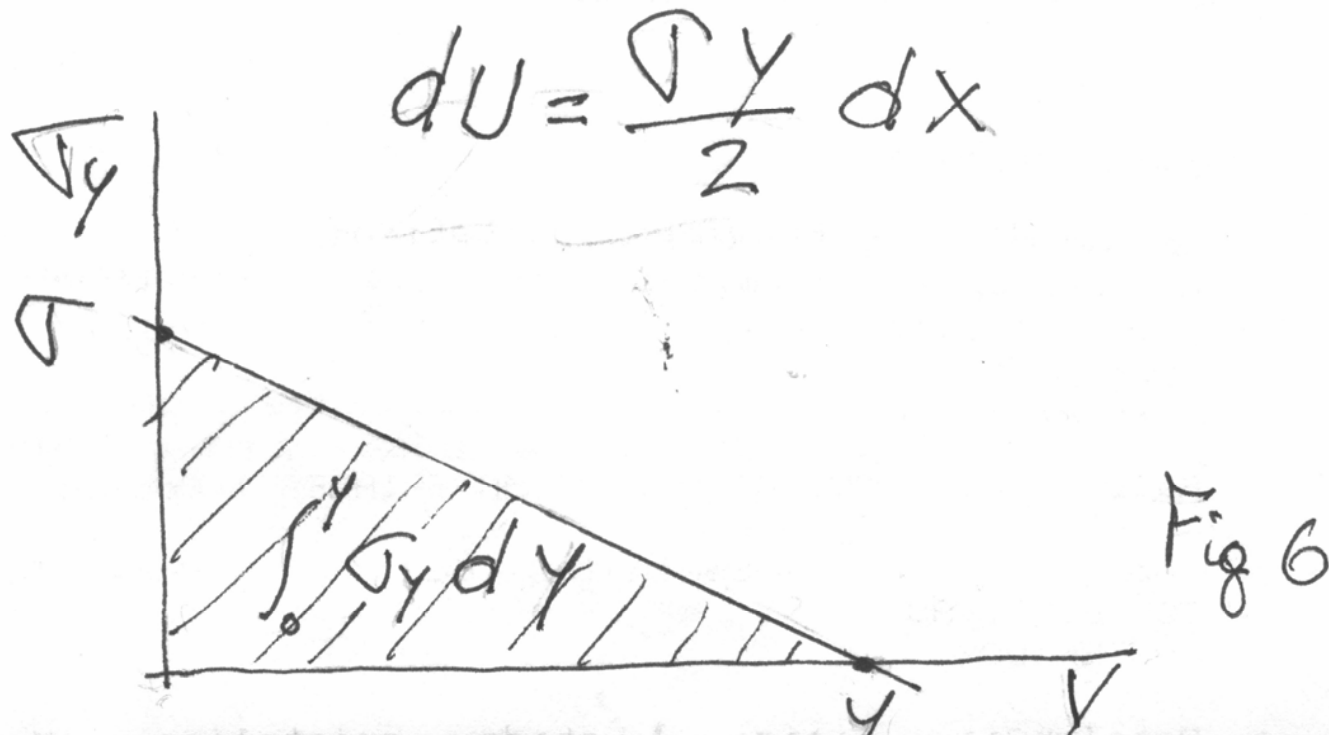


Considerando por el momento solo la semielipse superior, la disminución de energía provocada por la presencia en la placa de un elemento de longitud de fisura dx será.

$$dU = \int_0^Y \sigma_Y dx \cdot dy = dx \int_0^Y \sigma_Y dy$$

Ahora bien dado que previamente a la formación de la fisura la tensión será $\sigma_y = \sigma$ para $y=0$ y que una vez formada la fisura el valor de la tensión en $Y=y$ será (por tratarse ahora de una superficie libre) $\sigma_Y = 0$.

Suponiendo que todo el proceso de crecimiento de la fisura se desarrolla dentro del campo elástico, la tensión σ_y variará linealmente entre dichos extremos. Por lo tanto el valor de la integral será:



La energía liberada por la formación de una semifisura, será:

$$U = \int_{-a}^a dU = \int_{-a}^a \frac{\sigma \cdot y}{2} dx = \frac{\sigma}{2} \int_{-a}^a y \cdot dx$$

pero $\int_{-a}^a y \cdot dx =$ área de la semielipse $= \pi \cdot a \cdot b / 2$

por consiguiente
$$U = \frac{\sigma}{2} \cdot \frac{\pi \cdot a \cdot b}{2}$$

y la disminución de la energía provocada por la formación de la fisura completa será

$$2U = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot a \cdot b}{2} \quad [7]$$

Ahora bien Inglis demostró que en el campo elástico se cumple que,

$$b = \frac{2 \cdot \sigma \cdot a}{E}$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material.

Reemplazando este valor en la ecuación [7]

resulta:

$$2U = \frac{\sigma^2 \pi \cdot a^2}{E} \quad [8]$$

Llamando γ a la tensión superficial (o energía superficial) del material, la condición de propagación de la fisura según el criterio de Griffith, estará dada por la expresión

$$\frac{d}{da} \left(\frac{-\sigma^2 \pi \cdot a^2}{E} + 4 \cdot a \cdot \gamma \right)_{\sigma=\sigma_n} = 0$$

Siendo γ la energía potencial elástica unitaria al formarse las dos superficies , por consiguiente $4 \cdot a \cdot \gamma$ y σ_n representa el valor de la tensión remota para la cual la fisura de longitud $2a$ se torna inestable.

Efectuando la derivación indicada resulta,

$$\frac{2 \sigma_n^2 \pi .a}{E} = 4 \gamma$$

o bien
$$\sigma_n = \left(\frac{2.E.\gamma}{a \pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [9]$$

Igualando esta expresión con el criterio de Orowan, ecuación [6] queda:

$$\left(\frac{2.E.\gamma}{a \pi} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\gamma.E.\rho}{4 a.a_o} \right)^{\frac{1}{2}}$$

De modo que resulta: $\frac{\rho}{a_0} = \frac{8}{\pi} \cong 3$

La interpretación de esta relación es que el criterio de Griffith ecuación [8] , basado en consideraciones energéticas, tiene validades independientemente de la agudeza del vértice de la entalla, si el radio de esta no es superior a algunos espacios interatomicos. Al ser aplicada a materiales frágiles se obtienen resultados aceptablemente correctos.

Modificación del criterio de Griffith

Los materiales que se fracturan por crivaje muestran evidencia de una pequeña zona deformada plásticamente adyacente a la superficie de la fractura. Esto sugiere que el criterio de Griffith en su forma original no es estrictamente aplicable a la fractura de materiales de elevado rango plástico, en especial los aceros estructurales.

Orowan modificó la expresión de Griffith introduciendo el término γ_P que corresponde al trabajo de deformación plástica realizado por unidad de superficie durante la extensión de la fisura.

De este modo, el criterio de Griffith –Orowan resulta:

Recordando la [9]
$$\sigma_n = \sqrt{\frac{2E(\gamma + \gamma_P)}{a\pi}} \quad \text{[10]}$$

En general el término γ de energía superficial puede ser ignorado en comparación con el correspondiente a la energía plástica γ_p ya que este adopta valores típicos 10^5 a 10^6 ergios/cm²

Este término juega un papel preponderante en la resistencia a la fractura de metales y aleaciones, ya que varía ampliamente entre distintos materiales y puede ser fuertemente dependiente de la temperatura.