

Fuente: Epsilon Tech. Fracture Mechanics Clip-On-Gage. Model 3541

## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

Juan José del Campo Gorostidi

Ph.D. Materials Science & Engineering Metallurgy

# L4. MECANICA DE LA FRACTURA



e-Learning

## TEMARIO

- Fractura frágil
- Variables y Criterios en Mecánica de la Fractura
- Efectos de las grietas en los materiales
- Teoría de Griffith
- Aportación de Irwin y Orowan a la fractura de materiales dúctiles
- El Factor de Intensidad de la Tensión
- Relación entre  $G$  y  $K$
- Efecto del espesor en la tenacidad
- Relación entre la tensión de rotura y la tenacidad

## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

### Fractura frágil

- ✓ La fractura frágil se caracteriza por producirse sin deformación plástica previa
- ✓ La fractura frágil es catastrófica
- ✓ La fractura frágil puede producirse a niveles tensionales inferiores al límite elástico
- ✓ La absorción de energía previa a la rotura es muy baja en los materiales frágiles

Por estas razones, debemos conocer los Fundamentos de la Teoría de la MECANICA DE LA FRACTURA

El caso de los cargueros tipo Liberty en la segunda guerra mundial fue paradigmático: 1.031 accidentes, con 200 barcos hundidos o irreparablemente dañados, de un total de 2.708 construídos.



DWT 11000. Liberty Ships. Rotura frágil por falta de tenacidad en la soldadura

## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

### **Variables a considerar**

En el análisis de la Mecánica de la Fractura son tres las variables a considerar:

- **La tensión aplicada**
- **El tamaño de las grietas presentes en el material**
- **La tenacidad del material**

### **Criterios**

Para abordar el estudio de la Mecánica de la Fractura hay dos enfoques:

- **El Criterio de Energía**
- **El Criterio del Factor de Intensidad de la Tensión**

En esta lección del curso, abordaremos los fundamentos de ambos métodos.

# L4. MECANICA DE LA FRACTURA

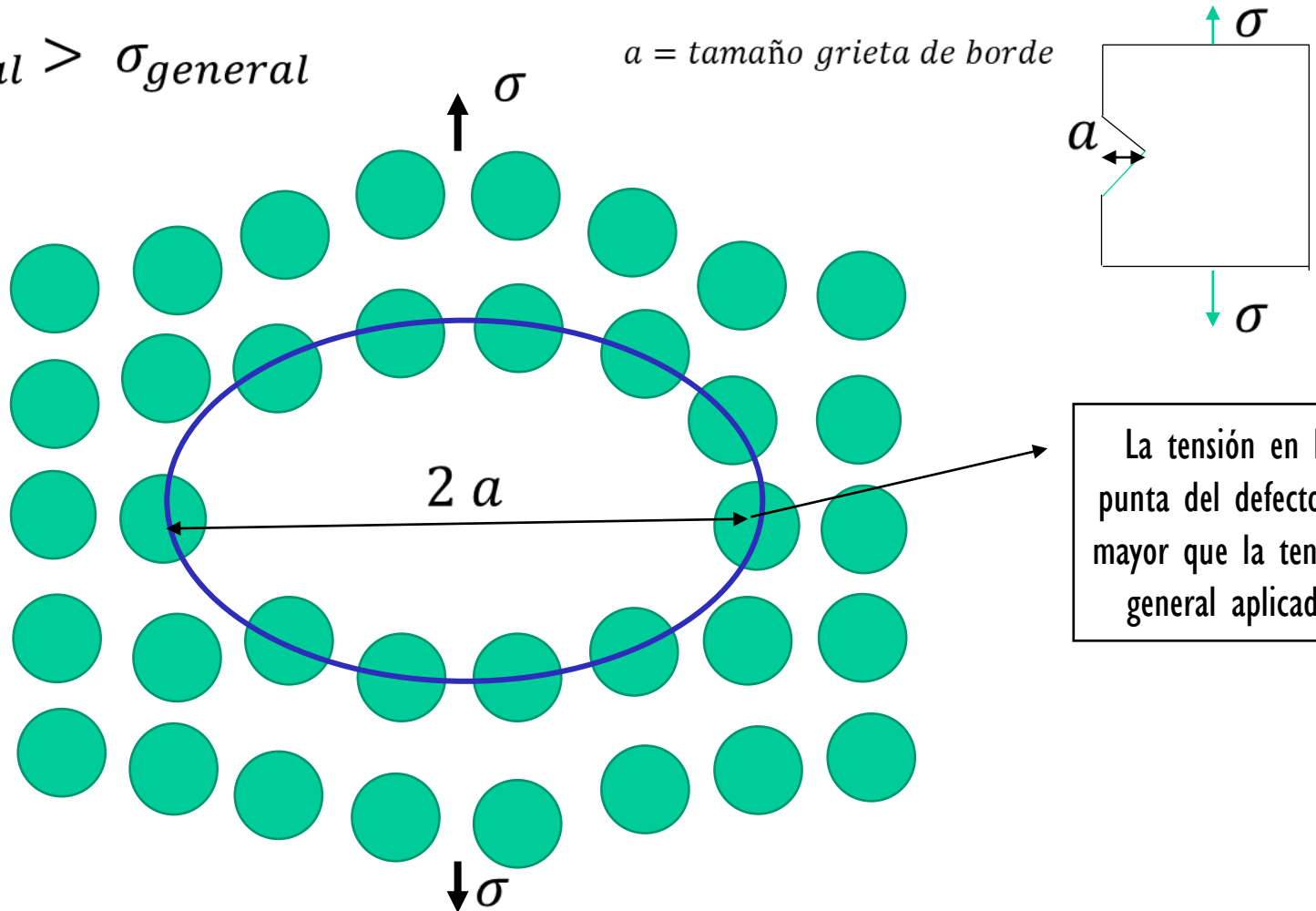


## Efectos de las grietas en los materiales

Los materiales presentan defectos. Los defectos provocan concentración de tensiones.

$$\sigma_{local} > \sigma_{general}$$

$a =$  tamaño grieta de borde

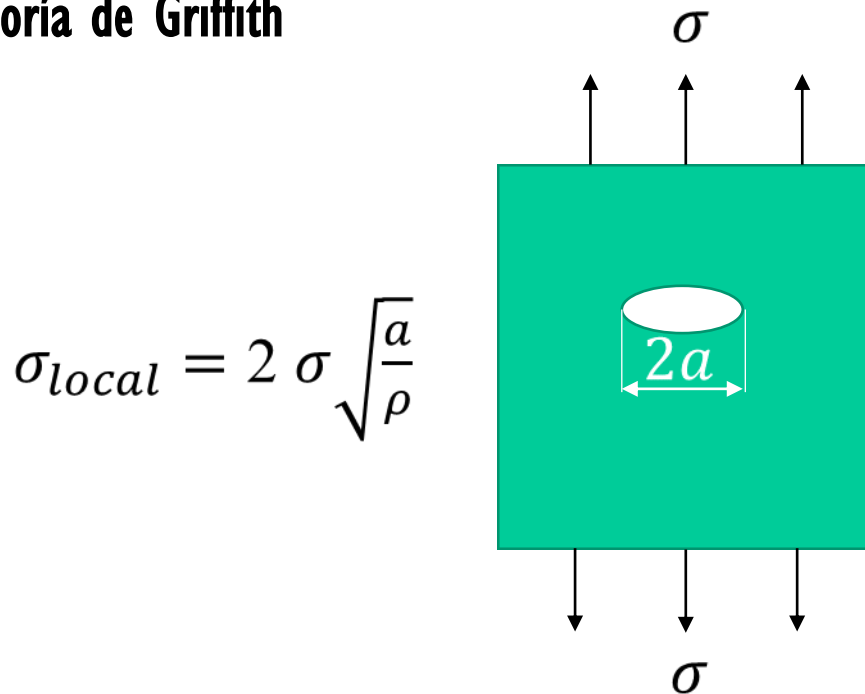


La tensión en la punta del defecto es mayor que la tensión general aplicada

# L3. PROPIEDADES MECANICAS



## Teoría de Griffith



$\rho$   $\rho = \text{radio de curvatura}$

*Mayor radio de curvatura  
= menor tensión local*

➤ ¿Qué fuerza soporta la tensión? = Las fuerzas de los enlaces interatómicos del material

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\gamma E}{r_0}}$$

$\sigma_R = \text{tensión de rotura del material}$   
 $\gamma = \text{energía superficial del material}$   
 $E = \text{módulo elástico del material}$   
 $r_0 = \text{distancia interatómica}$

# L4. MECANICA DE LA FRACTURA



## Teoría de Griffith

La rotura se producirá cuando la tensión local sea igual a la tensión de rotura del

Material:  $\sigma_{local} = \sigma_R$

$$2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma E}{r_0}}$$



$$\sigma_{critica} = \sqrt{\frac{\gamma E \rho}{4 a r_0}}$$

La tensión máxima aplicable aumenta cuanto mayor sea la tenacidad del material y menor el tamaño de la grieta. El aumento del radio de la grieta —mayor curvatura— también tiene un efecto favorable.

# L4. MECANICA DE LA FRACTURA

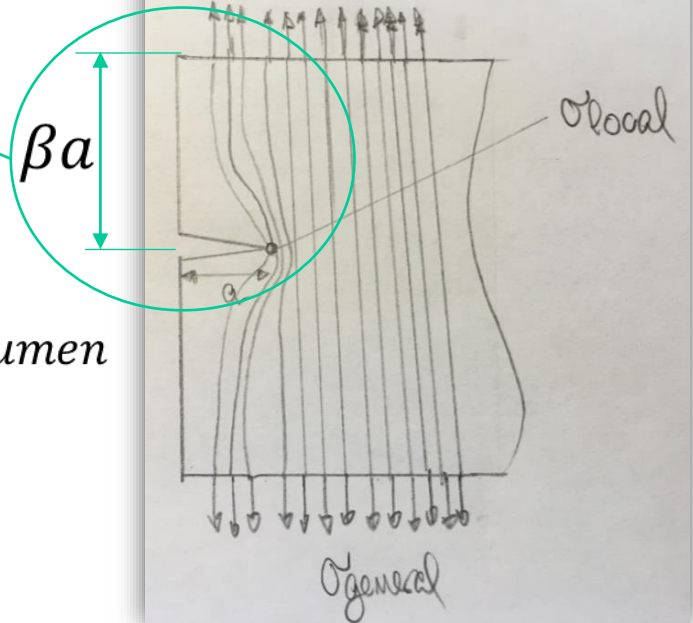
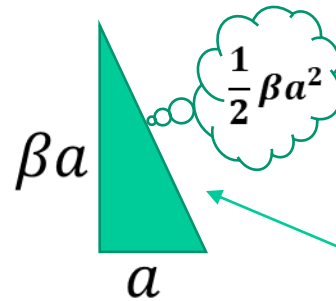
## Teoría de Griffith

Griffith consideró en su cálculo que el crecimiento de la grieta hasta el tamaño  $a$ , produce la liberación del estado tensional en los bordes de grieta, la cual evaluó por medio de un sencillo cálculo geométrico considerando comportamiento elástico:

$$U = \frac{1}{V} \int f dx = \int \frac{f dx}{A l}$$

$$U = \int \sigma d\varepsilon = \frac{E \varepsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E}$$

$$\sigma = E \varepsilon$$



$$U_{liberada} = U_{unidad\ de\ volumen} \times Volumen$$

$$U_{liberada} = - \frac{\sigma^2}{2E} \pi a^2$$

Siendo para el caso de tensión plana:  $\beta = \pi$

Fuente: elaboración propia



## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

### Teoría de Griffith

La energía liberada en el crecimiento de la grieta ha sido calculada por unidad de espesor. El crecimiento de la grieta, requiere romper los enlaces entre átomos, generándose así dos superficies fracturadas, siendo su valor calculado mediante la expresión:

$$U_{superficie} = 2 \gamma a$$

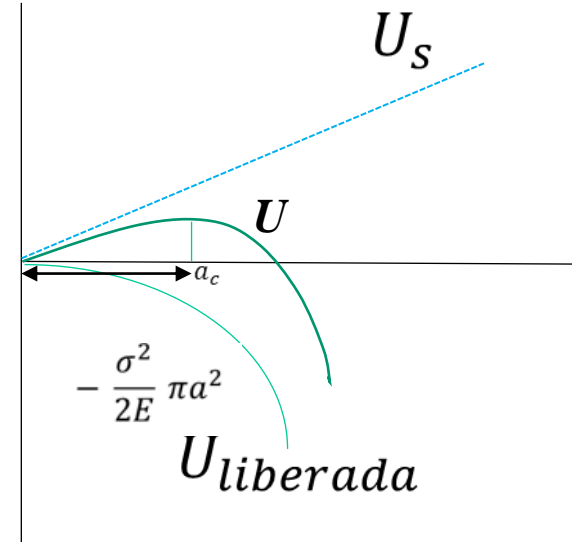
$\gamma$  la energía de superficie  $\frac{J}{m^2}$  Energía

Como se muestra la figura, la energía total será:

$$U = U_s + U_{liberada}$$

La grieta se inestabilizará, esto es, crecerá hasta que se produzca la rotura del material, cuando se de la condición:  $a = a_c$

Siendo  $a_c$  el tamaño de grieta crítico



### Teoría de Griffith

El tamaño de la grieta crítica se obtiene igualando a cero el valor de la derivada de la función energía total:

$$\frac{\partial(U_s + U_{liberada})}{\partial a} = 2\gamma - \frac{\sigma_{fractura}^2}{E} \pi a = 0$$

$$\sigma_{fractura} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad [1]$$

La ecuación [1] aplica al caso de materiales frágiles. En materiales dúctiles, como es el caso de los metales, -principales materiales estructurales- parte de la energía se libera en la plastificación del frente de fractura, previamente a la rotura, esto es, previamente al avance de la rotura.

## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

### Aportación de Irwin y Orowan a la fractura de materiales dúctiles

La aportación de Irwin y Orowan fue introducir en el balance de energía realizado por Griffith la consideración de un parámetro denominado  $G_C$ , característico de cada material, que expresaría la cantidad total de energía absorbida antes de la rotura.

La reformulación de la ecuación [1] da lugar a la siguiente expresión:

$$\sigma_{fractura} = \sqrt{\frac{EG_C}{\pi a}} \quad [2]$$

La ecuación [2] pone en relación:

- Las propiedades del material:  $E$  y  $G_C$
- El nivel tensional
- El tamaño de la grieta

$G_C$  se presupone  
que es independiente del  
tamaño y geometría de la pieza

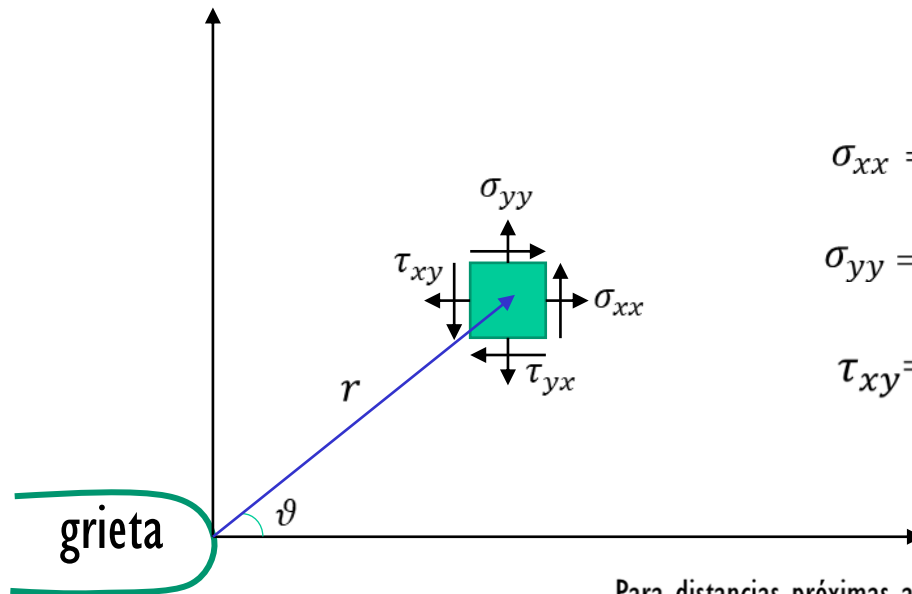
# L4. MECANICA DE LA FRACTURA



e-Learning

## El Factor de Intensidad de la Tensión

El análisis del balance de energías nos ha permitido comprender conceptualmente la Mecánica de la Fractura, lo que nos permite abordar un planteamiento pragmático de la problemática asociada a la presencia de grietas en los materiales dúctiles y su crecimiento.



$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\vartheta}{2} \left( 1 - \operatorname{sen} \frac{\vartheta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\vartheta}{2} \right) + \dots \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\vartheta}{2} \left( 1 - \operatorname{sen} \frac{\vartheta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\vartheta}{2} \right) + \dots \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{3\vartheta}{2} \operatorname{sen} \frac{\vartheta}{2} \dots\end{aligned}$$

Para distancias próximas al frente de la grieta  $r \leq 0,1a$ , el segundo y posteriores términos de las ecuaciones pueden despreciarse, resultando que:

$$\sigma_{fractura} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{2\pi r}}, \text{ siendo } K_{Ic} \text{ el Factor de Intensidad de la Tensión Crítico.}$$

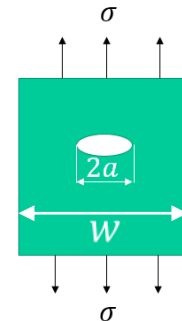
## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

### Factor de Intensidad de la Tensión

La tensión  $\sigma_y$  para  $\vartheta = 0$  toma valor infinito en la punta de la grieta, disminuyendo a medida que nos alejamos del frente de la grieta.

El Factor de Intensidad de la Tensión adopta la expresión general:  $K = \sigma Y \sqrt{\pi a}$

Siendo  $Y = 1$  si la relación  $\frac{a}{W}$  tiende a cero  
y se trata de una placa con grieta centrada



Si la placa presenta una grieta lateral de longitud  $a$  :  $Y = 1,12$

Otras tipologías pueden ser consultadas en la publicación: *Stress Intensity Factors Handbook*, de Murakami, Y. Pergamon Press, 1987

Condición de fractura:  $K = K_{IC}$  ; Factor de Intensidad de la Tensión = Tenacidad del material

## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

### Relación entre G y K

Para el modo I de ensayo:  $G = \frac{K_I^2}{E_a}$

$E_a = E$ , en caso de tensión plana

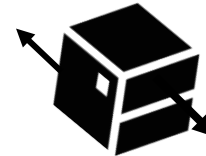
$E_a = \frac{E}{1-\nu^2}$ , en caso de deformación plana

Para el modo II de ensayo:  $G = \frac{K_{II}^2}{E_a}$

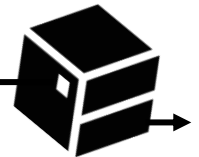
Para el modo III de ensayo:  $G = \frac{K_{III}^2}{2\mu}$

$$\mu = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{F/A}{\Delta x/l} = \frac{Fl}{A \Delta x}$$

Para una combinación de todos los modos de carga:  $G = \frac{K_I^2}{E_a} + \frac{K_{II}^2}{E_a} + \frac{K_{III}^2}{2\mu}$



siendo  $\mu$  el Módulo Cortante



## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

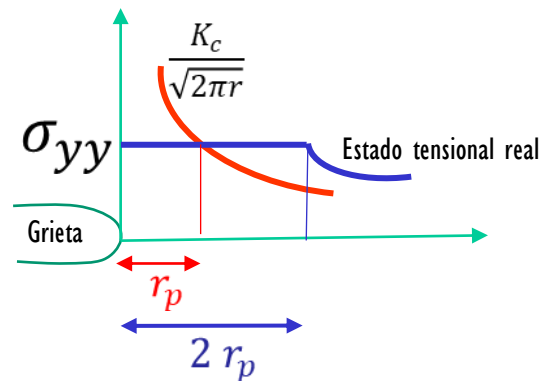


### Valores de $G_c$ y $K_{Ic}$

MATERIAL	$G_c$ ( $\frac{kJ}{m^2}$ )	$K_{Ic}$ ( $MNm^{-\frac{3}{2}}$ )
Aceros alta resistencia	150	170
Acero al C	12 – 120	50 – 150
Aleaciones Ti-Ti6Al4V	25 -110	50 -110
Polímeros Reforzados GFRPs	10-100	20-50
Polietileno (LD)	6	1
Nylon	3	3
Poliester	0,1	0,5

Consultar: *Materials Data Book. Cambridge University Engineering Department*

### Influencia del espesor en la Tenacidad



En tensión plana:

$$r_p = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \left( \frac{K_c}{\sigma_{yy}} \right)^2$$

En deformación plana:

$$r_p = \left( \frac{1}{6\pi} \right) \left( \frac{K_c}{\sigma_{yy}} \right)^2$$

Aplicando la teoría de la elasticidad, hemos visto que se llega a determinar que la tensión en la punta del defecto tiende a infinito (curva de color rojo).

Esta no es la situación real en un material dúctil. En éstos, el nivel tensional se relaja y sitúa por debajo del Límite elástico  $\sigma_{yy}$  -según indica la curva azul-

La zona plástica se extiende hasta una distancia que alcanza dos veces el valor de  $r_p$ . Como se observa, en **Tensión Plana** la zona plástica es 3 veces superior a la existente en **Deformación Plana**.



## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

### Influencia del espesor en la Tenacidad

La variable que rige si la pieza se encuentra en estado de tensión plana o deformación plana es el **Espesor**.

Denominamos **Espesor Límite** al valor  $B$  a partir del cual el estado tensional para a ser de **Deformación Plana**. Este valor se cuantifica de la forma siguiente:

$$B \geq 2,5 \left( \frac{K_c}{\sigma_{yy}} \right)^2$$

#### RECORDATORIO

La tenacidad a la fractura  $K_{Ic}$  se determina mediante el ensayo Modo I y sólo es constante en condiciones de Deformación Plana

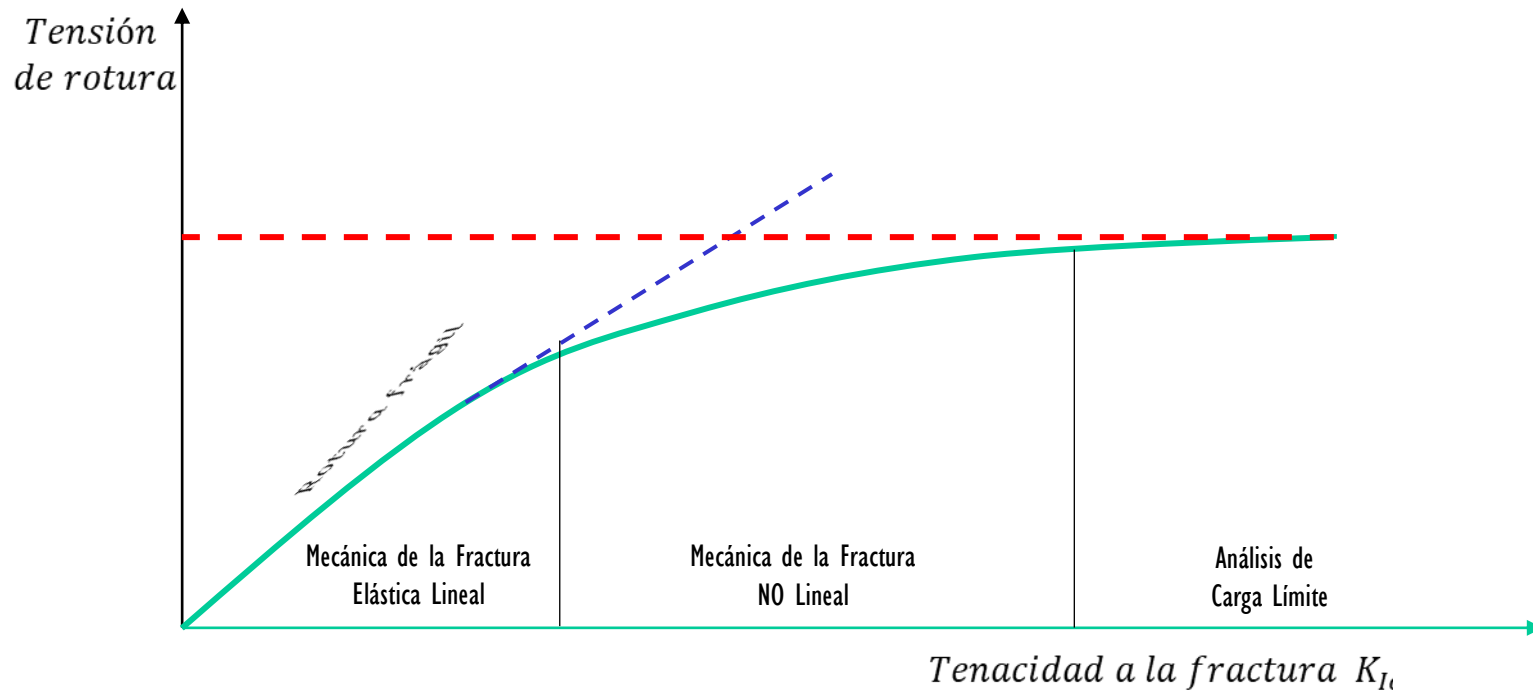
El estado de Deformación plana es habitual en chapas de alto límite elástico y baja Tenacidad.

Los materiales de elevada Tenacidad  $K_c$  presentan como estado normal el de Tensión Plana



## L4. MECANICA DE LA FRACTURA

### Relación entre la Tensión de rotura y la Tenacidad



El crecimiento de la grieta en cada ciclo de oscilación de carga sigue la ley:

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

Siendo, N el número de ciclos al cual se realiza el cálculo, C y m constantes características del material utilizado y  $\Delta K$  la variación que experimenta el Factor de Intensidad de la Tensión entre  $N=0$  y N.