

FRACTURA DE LOS MATERIALES

Por Carlos Rivas

profesor de ingeniería mecánica, depto. de mecánica estructural

1.Introducción

Este artículo presenta una descripción muy simplificada del mecanismo de fractura de los materiales. Para la gran mayoría de aplicaciones de ingeniería, la fractura de una pieza o de una parte estructural es indeseable, y puede llevar consigo consecuencias desastrosas. Para evitar estos efectos negativos, surge la necesidad de predecir las condiciones que pueden causar la fractura de un material. Para esto se han desarrollado diversas teorías y modelos de falla. En los metales, la predicción de la fractura tradicionalmente se limita a la determinación del esfuerzo de fractura a través de una prueba en tensión. Este método se basa en la afirmación que mientras el esfuerzo aplicado sobre el material no exceda el valor del esfuerzo de fractura, el material no debe fallar. De esta teoría se deriva el hecho que un metal dúctil debería exhibir deformación plástica antes de fracturarse, ya que en la curva esfuerzo-deformación, se debe pasar por la zona plástica antes de llegar al punto de fractura. Sin embargo, en la vida real se han encontrado muchos ejemplos de fracturas en metales dúctiles que se desarrollan de manera súbita y sin deformación plástica visible. El ejemplo típico que aparece en los libros de texto es el de la fractura de un tanque de melaza ocurrido en Boston durante 1919 [1]. Eventos catastróficos de esta naturaleza plantean la necesidad de analizar y

profundizar en el fenómeno de la fractura de los materiales. Este artículo no busca describir de manera exhaustiva el mecanismo de falla de los materiales, el cual debe decirse que es sumamente complejo. Tampoco se busca plantear un método de análisis para predecir la fractura. Estos métodos se desarrollan en una disciplina relativamente nueva llamada *Mecánica de Fractura*. El objetivo principal de este artículo es describir y comprender el mecanismo que origina la fractura de un material.

2.Mecanismo de fractura.

Para ilustrar cómo se da la fractura, el punto de partida será un material cristalino hipotético. Los materiales pueden clasificarse en tres categorías dependiendo de cómo están ubicados sus átomos. Los materiales cristalinos son aquellos en donde los átomos se encuentran ordenados siguiendo un patrón definido llamado *estructura cristalina*. Los materiales amorfos son aquellos en donde los átomos están colocados de manera aleatoria, y no es posible encontrar ningún patrón de orden entre ellos. Los materiales semicristalinos son aquellos que poseen una combinación de zonas amorfas y zonas cristalinas. Supongamos que es posible observar los átomos del material cristalino hipotético con una cámara fotográfica. Al tomarle una fotografía a estos átomos, se observaría el ordenamiento que se muestra en la figura 1.

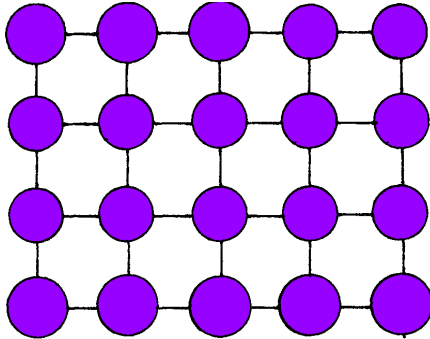


Figura 1. Átomos ordenados en un material cristalino

Cuando se aplica una fuerza sobre este material, pueden suceder tres fenómenos, dependiendo de la magnitud de la fuerza aplicada:

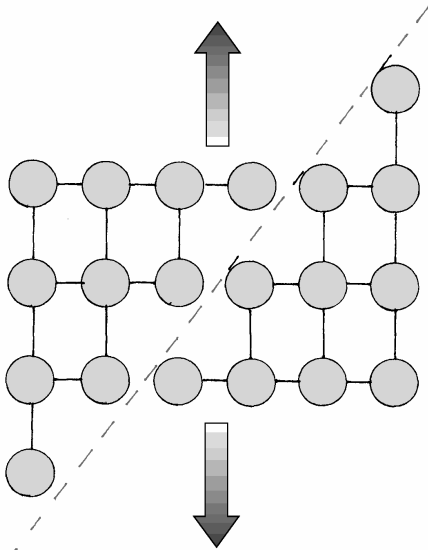


Figura 3. Cuando la fuerza aumenta, los átomos comienzan a deslizarse entre sí causando deformación permanente.

Desde la **ciencia**

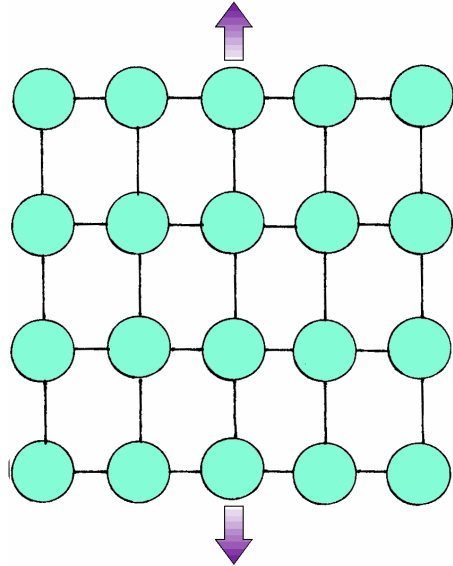


Figura 2. Cuando se aplica una fuerza, los enlaces se estiran causando deformación elástica.

1. Los enlaces químicos entre los átomos se estiran. Al retirar la fuerza, los enlaces regresan a su tamaño original y, por tanto, los átomos también regresan a su posición inicial. Esta es la base de la deformación elástica de los materiales (figura 2).
2. Si la fuerza aumenta produciendo esfuerzos mayores que el esfuerzo de fluencia del material, los átomos comienzan a deslizarse entre ellos sobre ciertos planos imaginarios dentro de la estructura cristalina. Esta es la base de la deformación plástica de los materiales (figura 3).
3. Si la fuerza aumenta aún más, los enlaces químicos entre los átomos se rompen. Esta es la base de la fractura de los materiales (figura 4).

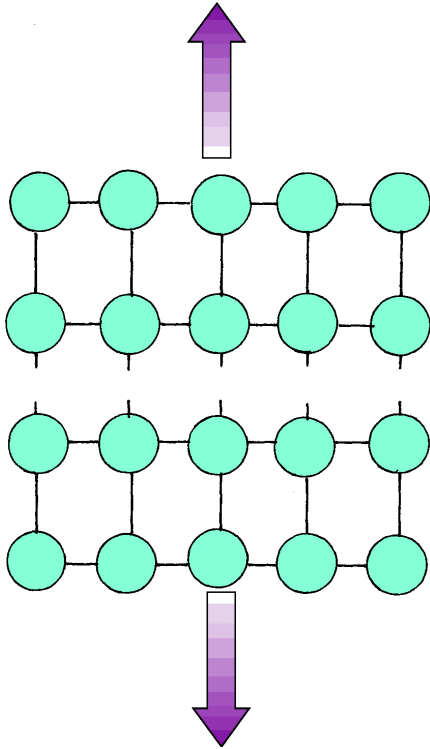


Figura 4. El material se fractura cuando la fuerza es suficiente para romper los enlaces.

Partiendo del hecho que la fractura consiste en la ruptura de los enlaces entre los átomos, es posible calcular el esfuerzo teórico que debe aplicarse al material para fracturarlo. Una deducción detallada de este cálculo se encuentra en la referencia [2]. El esfuerzo de fractura teórico de un material cualquiera responde a la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E\gamma}{a_o}}$$

para esta ecuación:

σ_c = esfuerzo de cohesión entre los átomos.
 E = módulo de elasticidad del material.

γ = tensión superficial del material; es la energía por unidad de área requerida para crear la superficie del material.

a_o = distancia de separación de equilibrio entre los átomos.

Curiosamente, al aplicar esta ecuación se obtienen esfuerzos de fractura teóricos mucho mayores que los valores medidos experimentalmente. Por alguna razón, los materiales en la vida real son más débiles de lo que deberían ser en la teoría. Hertzberg [3] explica esta diferencia de la siguiente manera:

1. La mayoría de materiales se deforma plásticamente cuando los esfuerzos aplicados son mucho menores que el esfuerzo de falla. Esta deformación plástica produce un daño irreversible en el material que eventualmente provoca su fractura.
2. Los materiales poseen defectos microscópicos, los cuales generalmente son producidos durante su proceso de manufactura. Estos defectos debilitan al material provocando su fractura a esfuerzos menores que el valor teórico.

El segundo punto de la explicación de Hertzberg es muy importante: la falla de los materiales se origina en algún defecto o discontinuidad en el material. Estos defectos generalmente son microscópicos y están presentes en todos los materiales. En la figura 5 se ilustra un defecto a nivel atómico dentro de un material. Debido a que la fuerza externa se concentra en aquellos enlaces químicos que se encuentren completos, éstos están sometidos a esfuerzos muy elevados,

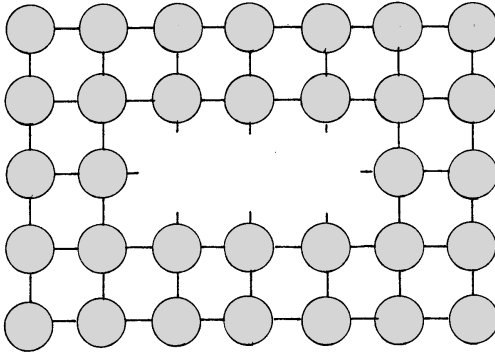


Figura 5. Se ilustra una grieta o discontinuidad dentro del material. Al aplicarse una fuerza externa, ésta se distribuye en un número menor de enlaces, facilitando la ruptura de éstos

siendo posible romperlos con facilidad aún cuando la fuerza externa no sea muy grande.

Es posible generalizar que la fractura de un material siempre se inicia en una grieta o una discontinuidad. Bajo ciertas condiciones, cualquier grieta puede crecer de manera espontánea, propagándose sobre el material y originando su fractura catastrófica. Todas las fracturas tienen un origen en algún defecto del material, y todos los materiales de ingeniería tienen defectos. Cuando estos defectos son relativamente pequeños, los átomos que se encuentran alrededor pueden tomar sin dificultad el esfuerzo aplicado, y el material es capaz de resistir el efecto de la fuerza externa. Entre más grandes son los defectos del material, mayor será la intensidad del esfuerzo sobre los átomos que le rodean, y menor será la resistencia a la fractura del material.

Griffith planteó una teoría para explicar el fenómeno de propagación de las grietas durante la fractura del material [4]. Esta teoría se puede describir de la siguiente

manera: cuando una grieta crece y se propaga dentro del material para generar la superficie de fractura, necesita consumir energía para crear una nueva superficie dentro del material. Para comprender esto, considere el bosquejo de la figura 6.

De esta figura, se observa que todos los átomos ubicados en la superficie externa del material tienen un enlace químico incompleto. Obviamente este enlace no puede completarse porque los átomos de la superficie no tienen ningún átomo cercano sobre ellos. El enlace químico incompleto hace que los átomos de la superficie tengan más energía que los átomos dentro del material. Se sabe de la física que, para separar a un electrón de un átomo y alejarlo de éste, se necesita darle energía al sistema. El trabajo necesario

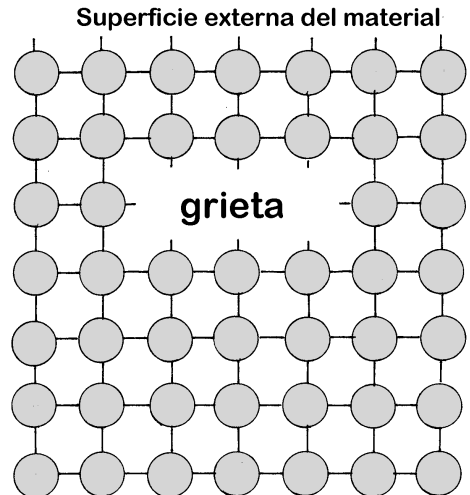


Figura 6. Modelo de un material cristalino mostrando la superficie externa y una grieta al interior del material.

para alejar al electrón del átomo queda almacenado en el átomo en forma de energía, incrementando por tanto su nivel energético. Por esta razón, los átomos dentro del material que poseen todos sus enlaces químicos completos, tienen menos energía que los átomos de la superficie. Como en la naturaleza todo tiende al estado con la menor energía posible, los átomos de la superficie buscarán la forma de eliminar esa energía en exceso. En los metales, una manera de lograr esto es reaccionando con el oxígeno del aire, completando el enlace químico y disminuyendo su energía. Por esta razón, los metales son propensos a oxidarse con facilidad. Volviendo al tema de la fractura, debido a que los átomos en la superficie tienen más energía que el resto, es necesario darle energía a estos átomos para que puedan crear dicha superficie. Esta energía por unidad de área necesaria para crear la superficie del material se asocia a la tensión superficial, y se simboliza generalmente por la letra griega γ . La tensión superficial generalmente se interpreta como la energía necesaria para crear la unidad de área de superficie. En la grieta o discontinuidad dentro del material también existe una superficie. Si se desea que la grieta se propague y se produzca la fractura, entonces es necesario darle energía al material. Sin este aporte de energía, la grieta no puede propagarse, y por tanto el material no podría fracturarse. ¿De dónde obtiene el material la energía suficiente para crear la superficie de fractura?: la obtiene de la energía elástica almacenada en la deformación de los enlaces químicos. A medida que la grieta se propaga, debe existir ruptura de enlaces químicos. Estos enlaces estaban

deformados por la fuerza externa aplicada y, al romperse, liberan la energía almacenada. Tanto el fenómeno de creación de superficie como de ruptura de los enlaces se desarrollan de manera simultánea dentro del material.

A partir de las ideas planteadas, es posible explicar la fractura de los materiales. Si cuando la grieta intenta crecer la energía necesaria para crear la nueva superficie es mayor que la energía liberada por los enlaces que se rompen, entonces no es posible crear esa superficie. La grieta no puede propagarse y el material es capaz de soportar la fuerza externa aplicada sin fracturarse. Por el otro lado, si la energía necesaria para crear la superficie de fractura es menor que la energía liberada por los enlaces que se rompen, entonces la grieta se propaga de manera espontánea, produciendo la fractura súbita del material. El exceso de energía liberada al romperse los enlaces puede reflejarse en forma de calor y sonido durante la fractura. Griffith dedujo una ecuación que describe la condición de equilibrio, donde la energía que debe consumirse en la creación de superficie es igual a la energía elástica liberada. Esa ecuación se escribe a continuación:

$$2\gamma = \frac{\pi\sigma^2 a}{E}$$

donde:

γ = tensión superficial del material.

σ = esfuerzo aplicado sobre el material.

a = mitad de la longitud de la grieta o defecto interno del material.

E = módulo de elasticidad del material.

Esta ecuación fue deducida partiendo de una grieta con forma de elipse, y con una

longitud total de $2a$. Para más detalles sobre la deducción, ver referencia [4]

Griffith reescribió la ecuación anterior de la siguiente manera:

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

Cuando el esfuerzo aplicado sobre el material es mayor que el valor teórico calculado a partir de la ecuación de Griffith, se da la fractura del material. Es necesario recalcar que el presente artículo únicamente persigue dar una idea muy general de cómo se desarrolla la fractura de los materiales. La ecuación de Griffith debe usarse con cuidado, ya que fue deducida partiendo de un material elástico que posee una grieta muy fina de longitud $2a$, y únicamente describe de manera muy general el mecanismo de fractura. La disciplina *Mecánica de Fractura* retoma estos conceptos y elabora un análisis más complejo para diversos modos de fractura en los materiales. Sin embargo, a partir de esta ecuación pueden sacarse conclusiones muy interesantes respecto a la resistencia a la fractura de los materiales. En primer lugar, puede observarse que entre mayor sea el módulo de elasticidad y la tensión superficial de un material, mayor será su resistencia a la fractura. También se observa que cuanto mayor sea el tamaño de la grieta interna, menor será la resistencia a la fractura. Como modificar el módulo de elasticidad o la tensión superficial de un material no es práctico, entonces la resistencia a la fractura de los materiales se controla principalmente controlando el tamaño de sus defectos internos. Si un metal dúctil

posee una grieta interna de tamaño significativo, es posible que su esfuerzo de fractura sea incluso menor que su esfuerzo de fluencia. Esto significaría que el material se fractura antes de llegar a la zona plástica. Es por esta razón que en las estructuras de acero o en sistemas de tuberías a elevada presión es necesario el monitoreo constante de las grietas o defectos internos del material utilizando ultrasonido, rayos X o pruebas no destructivas. Cuando se detecta que una grieta ha crecido demasiado y el esfuerzo de fractura se acerca al esfuerzo de trabajo del material, entonces es necesario reemplazar la parte o tomar medidas que eviten la fractura. De alguna manera, el diseño de una pieza metálica únicamente a partir de datos obtenidos de una curva esfuerzo-deformación queda incompleto, ya que no se toma en cuenta la probabilidad que durante la fabricación de la parte se hayan generado defectos que pueden hacer fallar al material a valores de esfuerzo aplicado menores que los esperados. En los materiales dúctiles se cuenta con la ventaja que, a pesar de que pueda existir un defecto de tamaño significativo, la capacidad del material para deformarse plásticamente puede detener el crecimiento espontáneo de la grieta, evitando que el material falle. En los materiales cerámicos, no se cuenta con este mecanismo debido a la fragilidad natural del material, por lo que el diseño de piezas cerámicas debe tomar en cuenta la fractura del material. Debido a que el tamaño y distribución de los defectos dentro de una cerámica normalmente es aleatorio, entonces el diseño de este tipo de piezas descansa fuertemente en métodos probabilísticos de falla.

REFERENCIAS.

- [1] WULPI, DONALD J., *Understanding how components fail*, págs. 86-87, ASM International, 1985.

- [2] HERTZBERG RICHARD W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, págs. 239 - 240, John Wiley and Sons, 1989.

- [3] HERTZBERG RICHARD W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, págs. 241, John Wiley and Sons, 1989.

- [4] HERTZBERG RICHARD W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, págs. 271 - 277, John Wiley and Sons, 1989.