# Fractura

## Índice


1. **¿Qué es el fenómeno de fractura?** ..... 2
2. **Tipos de fractura** ..... 4
3. **Morfología macroscópica de la fractura** ..... 5
4. **Fractura dúctil** ..... 6
5. **Mecanismos responsables de la fractura dúctil** ..... 8
6. **Tenacidad a la fractura** ..... 11
7. **Fractura frágil** ..... 15
8. **Fractura por fatiga** ..... 26
9. **Fractura por Corrosión (Stress Corrosion Cracking)** ..... 30

**Referencias** ..... 35

## 1. ¿Qué es el fenómeno de fractura?

El fenómeno de fractura consiste básicamente en la separación o fragmentación de un material sólido en una o más partes debido a los esfuerzos que puede generar la aplicación de ciertas solicitaciones dado el lugar que ocupe dentro de un conjunto estructural o mecánico. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de fractura.

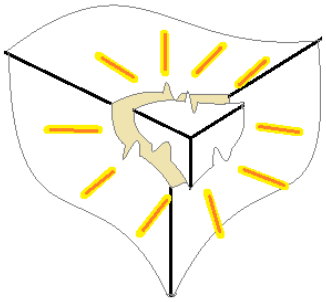


Figura 1. Ejemplo de fractura de un material.

Este fenómeno comienza de forma general con la aparición de pequeñas separaciones en la continuidad del material que posteriormente se unen, provocando el crecimiento y propagación hasta llegar a la fragmentación del material. Cuando este fenómeno se presenta en diversas estructuras y/o elementos, puede llevar a fallas catastróficas.

En la mayoría de las fallas estructurales, la fractura final suele propagarse de manera abrupta que inicia en defectos propios del material o por diseños mecánicos deficientes que contribuyen al proceso de crecimiento de grietas que hacen que estas alcancen un tamaño crítico, provocando la fractura del material. [1]

Es importante mencionar y diferenciar que una grieta, no es una fractura.

### Fuerzas de cohesión en el material

A nivel atómico existen fuerzas que mantienen al material sólido unido. Estas se denominan fuerzas de cohesión y aparecen entre los átomos y le dotan al material de ciertas características como son sus constantes elásticas, su punto de fusión y su coeficiente de expansión térmica.

Cuando un material no está sometido a ninguna solicitación los átomos del material se encuentran en estado de equilibrio de fuerzas, debido a los pares de fuerza de atracción y repulsión con sus átomos vecinos como se muestra en la Figura 2.

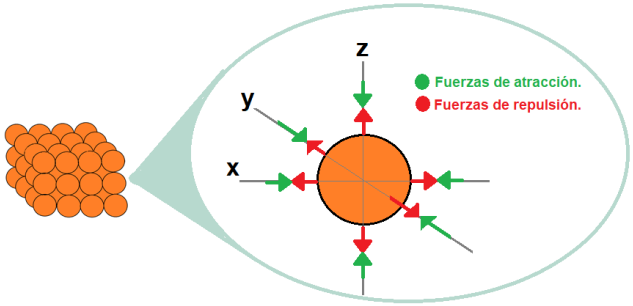



Figura 2. Átomo en equilibrio.

Cuando el material es sometido a una solicitación que produce deformaciones sobre el material, las distancias interatómicas se van modificando en el rango elástico del material.

La fuerza de repulsión disminuye con mayor rapidez y con una mayor separación que la fuerza de atracción, generando un desequilibrio sobre las fuerzas que actúan sobre los átomos, provocando que la carga de tracción se compense únicamente por la fuerza de atracción de los átomos. Después de que se continúa con la carga de tensión y mientras aumenta la separación, se llega a un punto en el que la fuerza de atracción comienza a disminuir. Esto sucede cuando la carga que provoca tensión es igual a la cohesión entre átomos del material. [4,12]

La evolución de este proceso, para un material frágil, concluye con la separación de los átomos, produciendo así una fragmentación del material como se observa en la Figura 3 extrapolada a todo el plano cristalino. [12] En cambio, en un material dúctil se activará un mecanismo de deformación plástica que posteriormente culmina con la rotura del material.

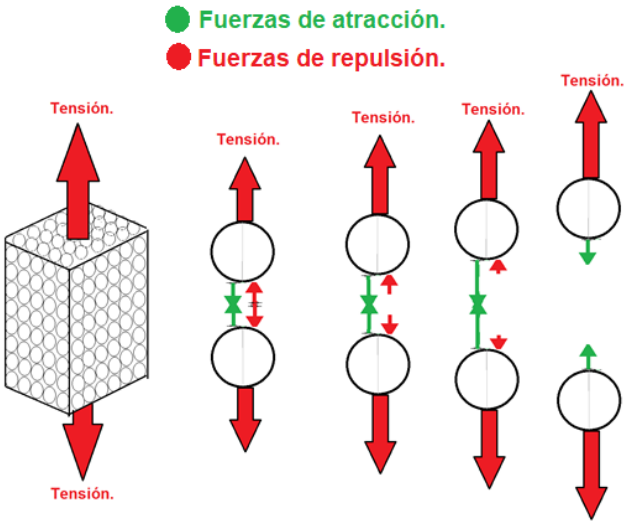



Figura 3. Evolución de las fuerzas de atracción y repulsión durante la separación de átomos del material.

## 2. Tipos de fractura

Dependiendo de la capacidad del material para sufrir deformación plástica antes de la fractura, se pueden tener dos tipos de fractura: dúctil o frágil. Pero es necesario especificar si estos términos son a nivel macroscópico o microscópico, ya que una fractura puede denominarse frágil desde una perspectiva macroscópica, mientras que el mecanismo metalúrgico, es decir a nivel microscópico, podría denominarse dúctil o frágil. [7]

Una fractura dúctil se presenta en materiales dúctiles, cuya deformación plástica es extensa debido a la alta tasa de absorción de energía antes de experimentar fractura, esto significa que tienen alta tenacidad. [2]

Por otra parte, la fractura frágil se presenta en materiales frágiles, sin embargo, no es únicamente propia de estos, pues también puede presentarse en materiales dúctiles bajo ciertas condiciones. Los materiales frágiles se caracterizan por experimentar poca deformación plástica y su baja absorción de energía antes de la fractura, lo que significa que tienen baja tenacidad. [2]

La tenacidad en ambos materiales se ejemplifica en la figura 4, en donde se aprecia que el área bajo la curva es mayor para materiales dúctiles que para materiales frágiles.

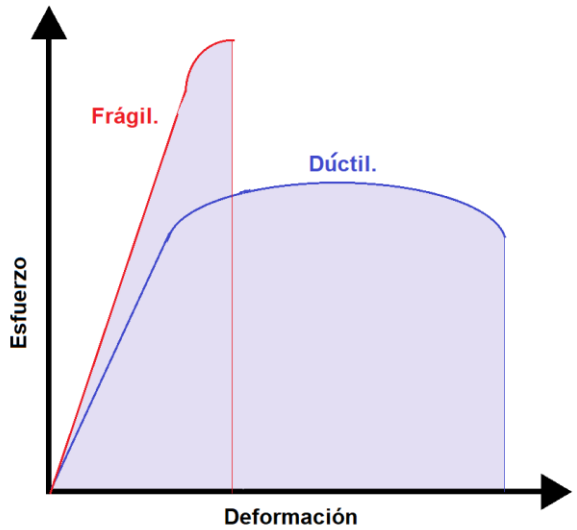



Figura 4. Tenacidad para materiales frágiles y dúctiles.

## 3. Morfología macroscópica de la fractura

Muchas características macroscópicamente visibles de la superficie de la fractura sirven para identificar el origen de la fractura y la dirección de propagación de la grieta. Las características macroscópicas comunes en los metales y plásticos son las zonas fibrosas, la zona radial, la zona de bordes dúctiles y las marcas Chevron. Las marcas radiales son líneas en una superficie de fractura que van del origen hacia afuera y están formadas por la intersección de fracturas frágiles que se propagan a diferentes niveles, las cuales forman las marcas Chevrón que son marcas radiales con forma de "V" que apuntan hacia el origen. [11]

En un ensayo de tracción, ya sea en muestras de sección rectangular o circular, la zona central será fibrosa con forma elíptica, mientras que la zona radial variará según la geometría de la pieza. Por ejemplo, en una probeta de sección rectangular con espesor considerable mostrará una superficie de fractura con una zona radial considerable como se muestra en la Figura 5. En cambio, en una probeta de menor espesor, la zona radial corresponde a marcas "Chevron" y es muy pequeña pues los bordes dúctiles ocupan una fracción apreciable de la superficie [4], como se aprecia en las Figuras 6 y 7.

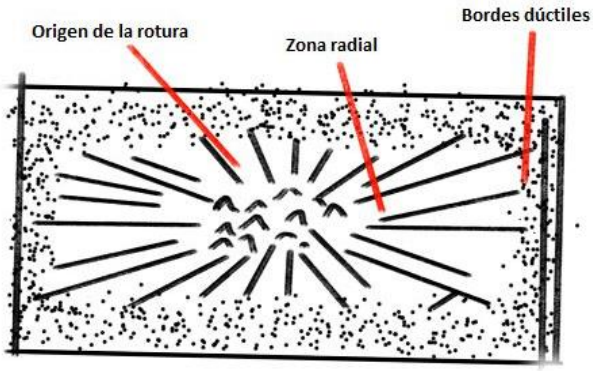



Figura 5. Probeta de espesor considerable. El origen de la fractura es la zona central; después se tiene la zona radial y los bordes dúctiles a 45 grados (Imagen adaptada de [4], pág. 13).

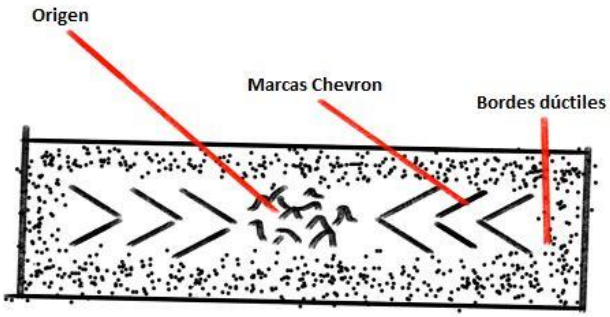



Figura 6. Probeta de menor espesor respecto a la primera. La zona radial se caracteriza por presentar marcas Chevron que señalan el origen de la fractura (Adaptado de [4], pág. 13).

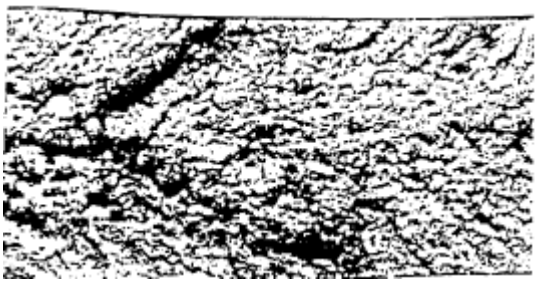


Figura 7. Marcas Chevron en “V” (Adaptado de [3]).

En probetas aún más delgadas, la zona radial no aparece como se puede observar en la Figura 8, observándose solamente la zona fibrosa y los bordes dúctiles. [4]

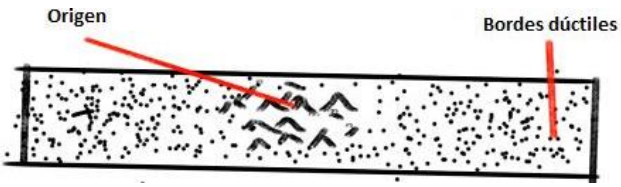



Figura 8. Probeta de menor espesor. La zona radial no aparecerá en probetas muy delgadas (Adaptado de [4], pág. 13).

## 4. Fractura dúctil

La fractura dúctil se caracteriza por presentar gran deformación plástica alrededor del desgarro del material. Para inducir la fractura dúctil se requiere una gran deformación plástica con alta absorción de energía de deformación ya que los materiales dúctiles son generalmente más tenaces. [7,8]

Se presenta tanto en metales como en polímeros. En la Figura 9 se muestra la curva esfuerzo-deformación de un polímero dúctil.

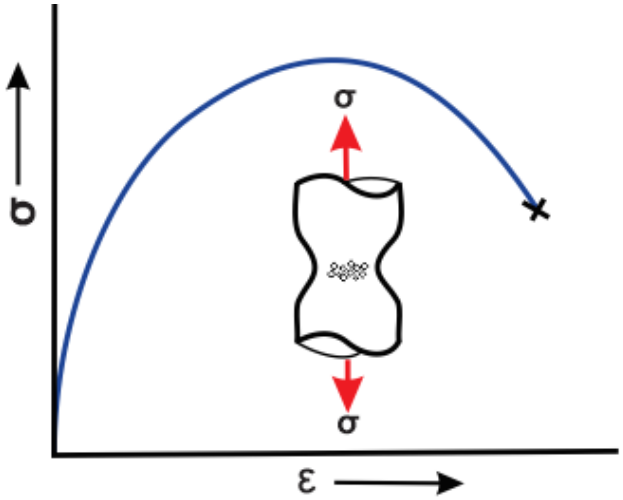



Figura 9. Curva esfuerzo-deformación de un polímero dúctil. Antes de la fractura existe una gran deformación plástica y no homogénea (Imagen adaptada de [7]).

El proceso de fractura dúctil por tracción normalmente ocurre en varias etapas [8]:

1. Se inicia con la formación de un cuello.
2. Formación de microcavidades al interior de la sección.
3. Las microcavidades crecen y se juntan hasta formar una grieta elíptica. Esta tiene su eje mayor perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada.
4. La grieta se propaga en dirección paralela a su eje mayor.
5. Se produce la fractura por deformación cortante.

Lo anterior se muestra con mayor claridad en la Figura 10. En la práctica, las fracturas dúctiles son el resultado de una sobrecarga o un diseño insuficiente.

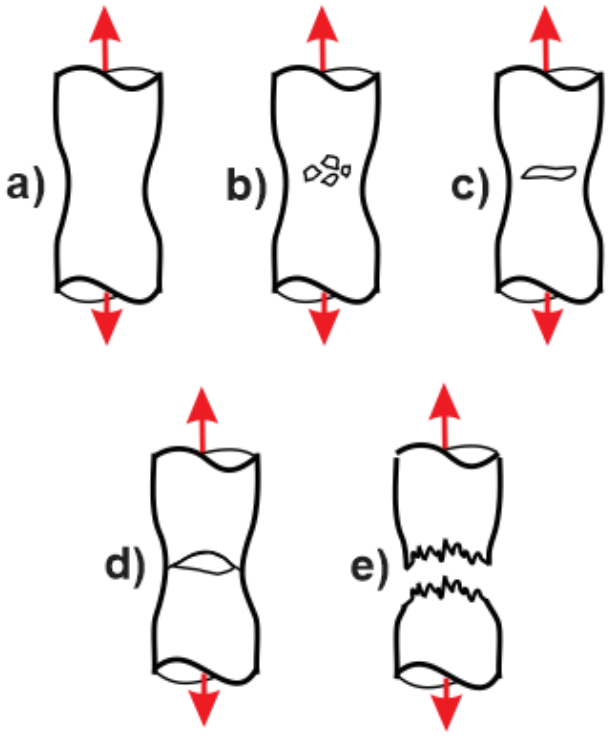



Figura 10. Proceso de fractura dúctil por tracción. a) Cuello, b) Microcavidades, c) Coalescencia de las microcavidades en una grieta elíptica, d) Propagación de la grieta, e) Fractura por cortante a 45° respecto a la dirección de tensión (Imagen adaptada de [8]).

**Morfología**

A nivel macroscópico, la fractura dúctil en metales tendrá un aspecto fibroso e irregular, consistente con la coalescencia de microcavidades. que se mostrarán como un conjunto de medias burbujas (dimples).

En los plásticos la superficie de la fractura se caracteriza por el estiramiento del material hasta un punto de unión.

## 5. Mecanismos responsables de la fractura dúctil

Como ya se mencionó, la fractura dúctil conlleva una gran deformación plástica, la cual está basada en el deslizamiento de dislocaciones sobre planos cristalográficos definidos. Dicha deformación plástica resultará en diferentes características en la superficie de fractura. Los mecanismos responsables de la fractura dúctil son: La formación y coalescencia de microcavidades, separación en los planos de deslizamiento y, la formación de cavidades elipsoidales. [4]

**Formación y coalescencia de microcavidades:** Este mecanismo es el inicio de una fractura dúctil por sobrecarga. La superficie de fractura es opaca y se compone de la coalescencia de microcavidades. Las microcavidades se inician por la fluencia del material alrededor de inclusiones, partículas de otra fase o cualquier discontinuidad que produzca una concentración de esfuerzos. Conforme aumenta la deformación, las microcavidades crecerán hasta situarse muy próximas unas de otras y unirse formando una grieta la cual se propagará. En la superficie de fractura se observarán dichas cavidades (dimples). Cuando la fractura se produce por tracción pura, las cavidades son equiaxiales, como se muestra en la Figura 11 a). Cuando la fractura es debido a esfuerzos cortantes, mostrarán un borde dúctil a 45 °, o en el caso de fractura por torsión las cavidades son parabólicas con sentidos opuestos en las dos superficies (Figura 11, b). Y en el caso de desgarramiento por tracción, las cavidades serán alargadas con el mismo sentido en ambas superficies [4] (Figura 11, c).

Una aleación con gran número de inclusiones presentará un mayor número de cavidades que un metal puro sin aleantes. Ya que este último permite en menor medida la nucleación de microcavidades, lo que resulta en menos dimples pero de mayor tamaño. [4]

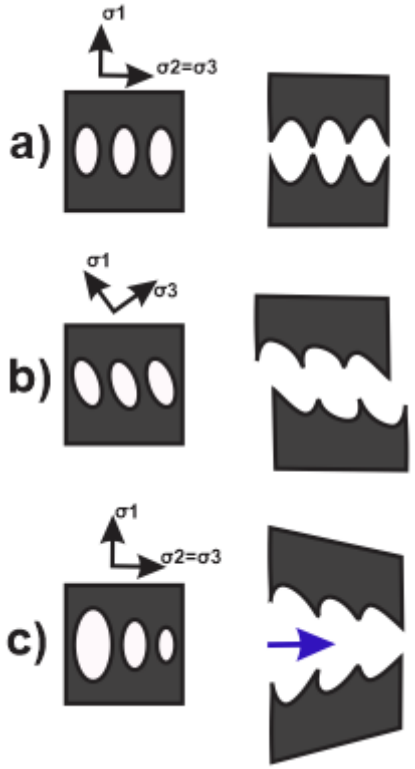



Figura 11. Mecanismo de fractura dúctil: formación y coalescencia de cavidades. Donde a) Fractura normal, cavidades equiaxiales. b) Fractura producida por tensiones de corte. Con cavidades alargadas y en sentidos opuestos en las dos superficies de fractura. c) Desgarramiento por tracción. Cavidades alargadas, con el mismo sentido en ambas superficies y apuntan hacia el origen de la fractura (Adaptado de [4]).

**Separación en los planos de deslizamiento:** La deformación plástica de un metal conlleva el deslizamiento de las dislocaciones a lo largo de ciertos planos cristalográficos, denominados planos de deslizamiento. La continuación de dicho proceso resulta en la rotura del cristal según esos mismos planos. La separación en los planos de deslizamiento es el mecanismo atómico responsable de la fractura dúctil en metales y aleaciones. [4]

Si el deslizamiento se da sobre pocos planos de una familia cristalográfica, la superficie de fractura será plana con algunos pequeños escalones (Figura 12, a). En un material policristalino el deslizamiento se dará en distintas familias de planos, de manera un tanto irregular, resultando en una superficie de fractura con ondulaciones (ripples) como se observa en la Figura 12 b), que en el caso de aumentar aún más la deformación, pueden evolucionar hacia una superficie lisa, sin rasgos aparentemente definidos, que se denomina zona de estiramiento (stretch zone) [4], como se observa en la Figura 12 c).

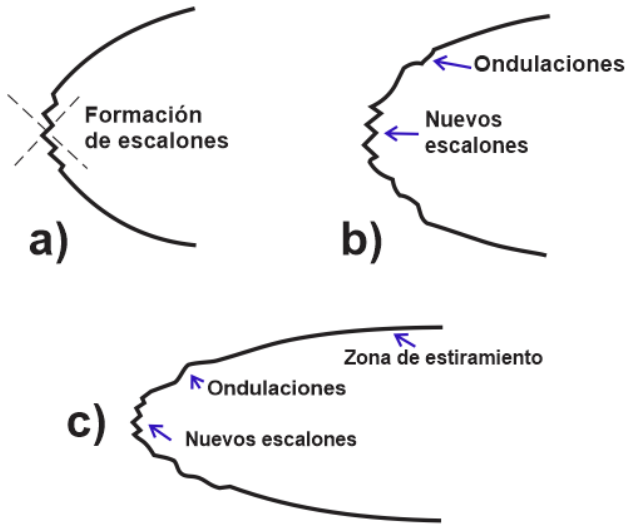



Figura 12. Formación de ondulaciones y zonas de estiramiento. a) Formación de escalones en orientación a de los planos de máxima tensión de corte por el deslizamiento de dislocaciones en una familia de planos. b) Formación de nuevos escalones y origen de ondulaciones por el deslizamiento en otras familias de planos. c) Formación de zonas de estiramiento por el aumento de la deformación (Adaptado de [4]).

Es decir, a nivel microscópico, la morfología de la superficie de la fractura dependerá de la deformación.

- Zonas de deformación baja → Escalones rectos o curvilíneos (curvas de deslizamiento).
- Zonas con mayor deformación → Ondulaciones (ripples).
- Zonas altamente deformadas → Zonas de estiramiento (stretch zone).

**Formación de cavidades elipsoidales:** El último mecanismo corresponde a las cavidades alargadas o elipsoidales, que son la intersección de cavidades más profundas con la superficie de fractura, por lo que son de mayor tamaño que las cavidades equiaxiales. [4]

## 6. Tenacidad a la fractura

En fractomecánica, conocemos dos parámetros: el parámetro Kc y el parámetro K, estos parámetros se conocen como el factor de intensidad de tracciones y dependen de la geometría de un componente, el esfuerzo del material y la longitud de una grieta.

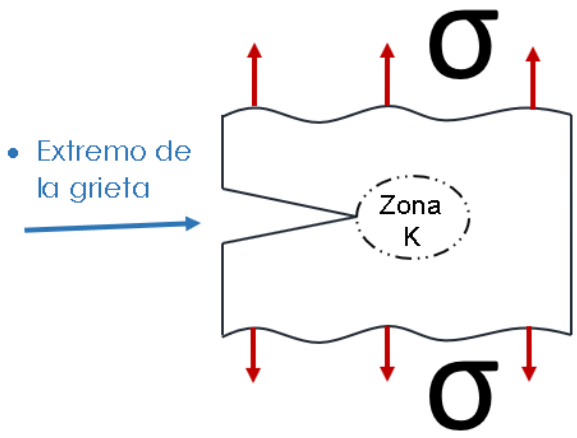



Figura 13. Zona K en donde se presenta mayor intensidad al someter a tracción.

El subíndice c, indica que el valor de K es un valor crítico para la fractura.

$$\mathbf{Kc} = (\mathbf{2} \cdot \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{s}})^{\mathbf{1/2}} \qquad 1$$

Kc = Tenacidad a la fractura

E= Módulo de elasticidad

$\gamma$s= Tensión superficial

A su vez tenemos que "Kc" representa la "tenacidad a la fractura" lo cual indica que es el valor crítico del factor de intensidad de tracciones que provoca una inestabilidad en la microgrieta.

Por medio de diversos parámetros podemos caracterizar las condiciones del extremo de la fisura en donde se presenta fractura, existen tres categorías en donde podemos clasificar el fenómeno de fractura.

**a)** Mecánica de fractura elástica lineal (LEFM). Representado en la Figura 13.1.

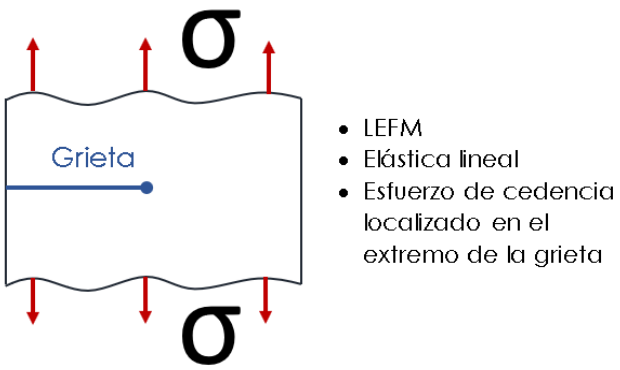



Figura 13.1 Ilustración de un fenómeno de mecánica de fractura elástica lineal.

**b)** Mecánica de fractura elasto - plástica (EPFM).

**c)** Mecánica de fractura dependiente del tiempo, a la temperatura (HTTDFM). Representado en la Figura 13.2.

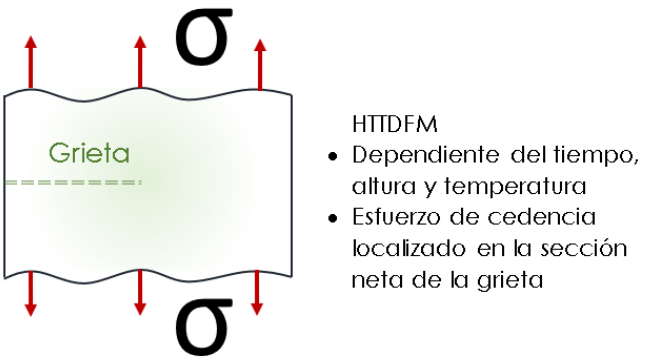



Figura 13.2 Ilustración de un fenómeno de fractura mecánica de fractura dependiente del tiempo a la temperatura.

Dicho lo anterior, pueden existir tres tipos de movimientos básicos dentro del material que definiremos como modos de propagación de grieta, los cuales nos permitirán describir de manera sencilla cómo se comportará el material cuando se presente una falla y poder entender mucho mejor esta situación. Estos se ilustran en la Figura 14.

**Modo I:** Movimiento de apertura, en donde el cuerpo fisurado actúa en la dirección en que se presenta una tracción normal.

**Modo II:** Movimiento de deslizamiento o cizalla. Se presenta un cortante perpendicular a la línea de la grieta

**Modo III:** Movimiento de desgarramiento. Se presenta un cortante paralelo a la línea de la grieta (torsión).

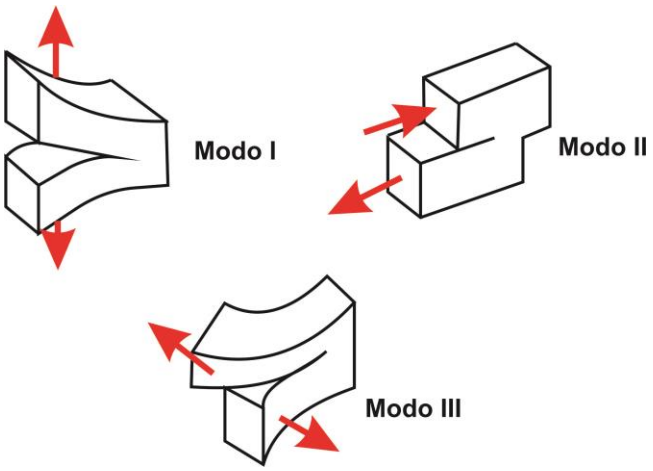



Figura 14. Modos de propagación de grieta. Modo I: Apertura. Modo II: Deslizamiento. Modo III: Desgarramiento.

Dicho lo anterior, tendremos un coeficiente importante que es la variable K, haciendo referencia a la "tenacidad a la fractura". Cuando se presenta el Modo I de carga, con presencia de una grieta en una dirección perpendicular al plano, tendremos el siguiente planteamiento.

$$\boldsymbol{\sigma_{yy}} = \mathbf{K}/(\mathbf{2\pi r})^{1/2} \qquad 2$$

En donde:

$\pi - 3.14$ [1]

$r -$ Radio de la punta de la grieta

Lo anterior se ilustra en la Figura 15.

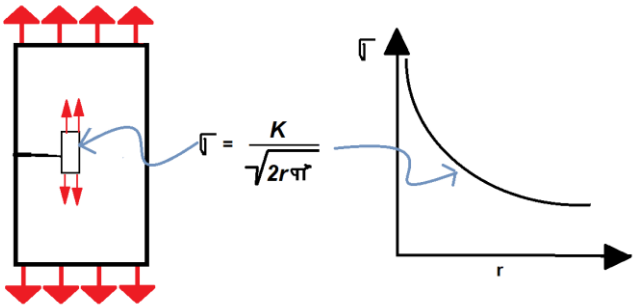



Figura 15. Relación del esfuerzo con la tenacidad a la fractura (Modo I de falla).

Cuando se presenta esto, la tracción en el extremo de la grieta se caracteriza para un valor único de K. La magnitud de la intensidad de las tracciones en la región al extremo de la grieta para la tenacidad a la fractura K, depende de tres factores: La carga normal a la superficie aplicada “σ”, la longitud de la grieta “a”, la geometría de la griega y el método de aplicación de carga “$\mathfrak{J}$”.

$$\mathbf{K} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}\sqrt{\mathbf{a}}\,\mathfrak{J}) \qquad 3$$

El inicio de la fractura se propagará si se presenta una tenacidad a la fractura mayor a la tenacidad a la fractura crítica.

$$\mathbf{K} > \mathbf{K_{IC}} \qquad 4$$

Este parámetro de tenacidad crítica es una medida de la resistencia del material a la fractura frágil. Pueden ser estudiados materiales de ambas características, sin embargo, su uso es más común en materiales frágiles.
Este parámetro K, nos resulta útil debido a que en él se encuentran los términos requeridos para aplicar relaciones entre una tracción aplicada nominal, tamaño de grieta y condiciones de geometría de la grieta.

Para poder determinar de una manera correcta el parámetro KIC, es necesario tomar algunas consideraciones en cuenta (de manera particular en deformación plana), para poder caracterizar el comienzo de la propagación de la grieta que existe en un cuerpo. La iniciación de la propagación no coincide de manera forzosa en el comienzo de una propagación inestable (por ende, generando un evento catastrófico) que va a tener como consecuencia, de manera evidente, un colapso de la estructura o el cuerpo en donde se encuentre. Podemos argumentar que esto es debido porque bajo cargas estáticas o aplicadas de forma gradual y lenta, una grieta presenta dos comportamientos: por un lado, propagación rápida e inestable o por otra parte, en una extensión lenta estable. En los materiales con capacidad de deformarse plásticamente, si la propagación rápida al llegar a darse, como acción secundaria presenta una extensión mucho más lenta de la grieta. La extensión estable puede ser considerable, debido a que en muchos casos resulta igual o mayor que la longitud inicial de la grieta. Dicho lo anterior, es de vital importancia poder determinar además de las condiciones iniciales, aquellas condiciones en las cuales se produce una propagación inestable del agrietamiento.

La principal función de la LEFM (mecánica de fractura elástica lineal), permite relacionar el valor de K suministrado (la fuerza que impulsa a la grieta) al crecimiento de la grieta, y las características de resistencia a la fractura para un material dado, puede expresarse en términos de un valor crítico Kc.
Si tomamos en cuenta un material con fractura frágil bajo condiciones de deformación plana o carga elástica lineal, un material puede tolerar un valor determinado de tenacidad aplicado (la cantidad de tracción aplicada) antes de que fracture.

Para un material determinado, la fractura ocurrirá cuando el valor de K aplicado sea igual al valor de KIC, sin importar la geometría, el tamaño de la grieta.

## 7. Fractura frágil

La fractura frágil se define como una fractura que toma lugar a tensiones por debajo del rendimiento de la sección neta de un elemento con muy poca deformación plástica observable y absorción mínima de energía; los esfuerzos localizados continuarán acumulándose hasta que finalmente se forme una grieta en uno o más puntos de concentración de esfuerzos y ésta se propagará rápidamente, hasta fracturarse como se observa en la Figura 16. Este tipo de fractura puede presentarse en todo tipo de materiales. [7]

La fractura frágil generalmente ocurre en aleaciones de alta resistencia, aleaciones de aluminio de alta resistencia, estructuras soldadas o estructuras obtenidas mediante un proceso de fundición como lo es hierro gris. [7]

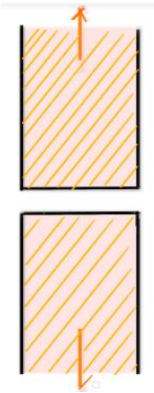


Figura 16. Fractura frágil (Imagen adaptada de [2]).

**Causas**

Dentro de las razones causantes de la fractura frágil se pueden encontrar: la elección inadecuada de materiales, defectos de fabricación, diseño defectuoso y falta de comprensión de los efectos de la carga que se aplican a los elementos, así como las condiciones ambientales en las que trabajará el material [7].

Es posible distinguir defectos que el elemento sometido a fractura frágil puede presentar [1].

- Porosidad.
- Existencia de microgrietas y su posterior propagación.
- Daño por corrosión.
- Fragilización debido al hidrógeno.

Aunque los elementos que sufren este tipo de fractura se caracterizan por no experimentar deformación plástica significativa antes de la fractura, esta deformación se encuentra involucrada en el fenómeno. Se distinguen tres etapas:

1. La deformación plástica concentra las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento.
2. Las microgrietas se nuclean debido a esfuerzos cortantes donde se bloquearán las dislocaciones.
3. La grieta se propaga hasta la fractura.

La dirección de movimiento de la grieta será perpendicular a la dirección de la carga aplicada al elemento de estudio; por ejemplo, si se imagina que la Figura 17 es una probeta de longitud finita sometida a tracción, y que además contiene una grieta de tamaño 2a, se distinguen sus esfuerzos con las flechas distribuidas a lo largo de esa probeta. El mecanismo de rápida propagación de la grieta dará lugar a fractura frágil. [6]

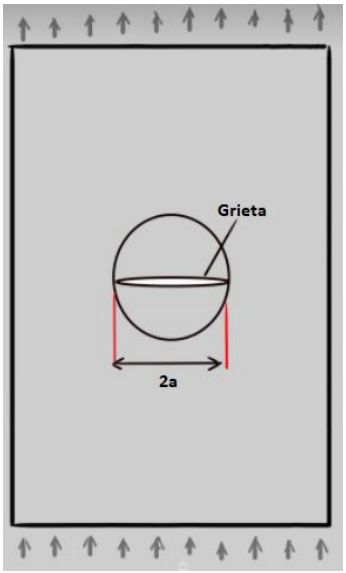



Figura 17. Probeta de dimensión finita con una grieta de tamaño 2a. (Imagen adaptada de [5]).

A nivel microestructural, la fractura frágil en las aleaciones de ingeniería puede ser de forma transgranular (a través de los granos) o intergranular (a lo largo de los límites del grano).

**Fractura transgranular**: El agrietamiento a menudo se propaga debido a la ruptura de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos específicos (planos de clivaje) En la Figura 18 se presenta un esquema sencillo de este tipo de fractura [1].

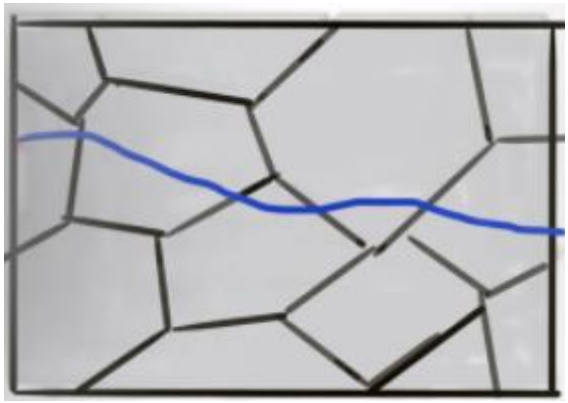


Figura 18. Fractura transgranular (Imagen adaptada de [2]).

La fractura transgranular también llamada “clivaje transgranular”, se presenta cuando las grietas de la fractura se propagan a través de los granos del material. Retomando el hecho de que la fractura frágil en materiales cristalinos se presenta a partir del inicio de una grieta y su propagación, dicha propagación se dará a partir de la ruptura de enlaces atómicos que tendrá como consecuencia la separación de enlaces cristalinos, misma que se trata de representar a partir de la Figura 19 ([1, 5]).

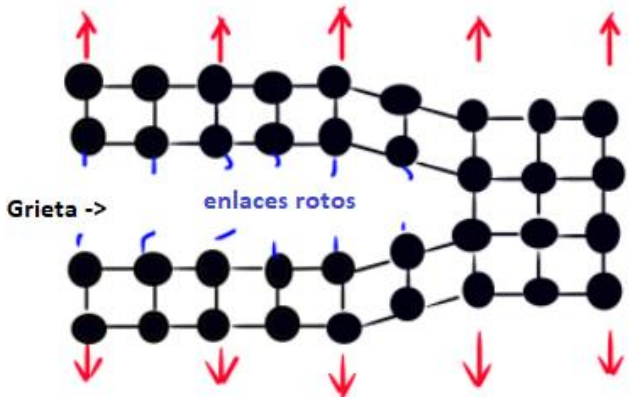



Figura 19. Adaptación de la propagación de grieta y ruptura de enlaces en un material frágil (Imagen adaptada de [5]).

Entonces, el clivaje se puede definir como un mecanismo de fractura rápida, de baja energía, que se produce por la separación de planos cristalográficos bien definidos, característicos de la estructura. Debido a que la división ocurre a lo largo de planos cristalográficos, la fractura cambiará de dirección cuando cruce los límites de grano o subgrano. [7]

Los planos preferentes de clivaje son aquellos que tienen la menor densidad de empaquetamiento por dos razones: el número de enlaces a separar es menor y la distancia interplanar es mayor. [6]

En la Figura 20 se ejemplifica la separación de los enlaces atómicos debido al avance de la grieta señalado con una flecha roja.

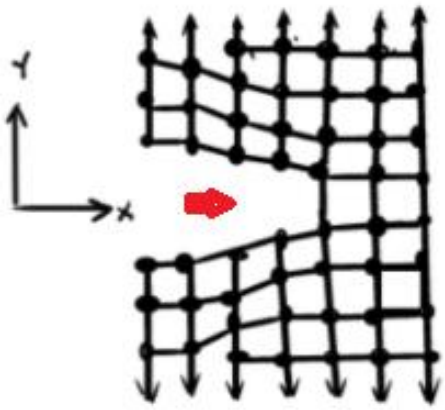



Figura 20. Separación de enlaces atómicos en una red cristalina. (Imagen adaptada de [5]).

En cuanto al acabado superficial de la fractura, esta será rugosa debido a la diferente orientación de los planos de clivaje de los granos.

Desde el punto de vista cristalográfico, se debería esperar una superficie totalmente plana como resultado de una fractura por clivaje, de facetas perfectamente planas, dado que la

separación se produce según planos cristalográficos. Pero las partículas de segunda fase, inclusiones, precipitados, límites de grano, influyen sobre la propagación de una fisura de clivaje y alteran la regularidad de las facetas.

La dirección de propagación de la grieta posee tendencia a cambiar de plano cuando pasa de un grano al contiguo, ya que la grieta sigue el plano de clivaje de orientación más favorable en cada grano y los granos vecinos tienen orientaciones ligeramente diferentes. [6]

En la ruptura por clivaje la grieta puede crecer en un grano simultáneamente en dos planos cristalográficos paralelos correspondientes una misma familia cristalográfica.

Las dos grietas paralelas crecen a lo largo de una línea, tanto como consecuencia de un clivaje secundario, como por cortadura, formando un escalón característico. [6]

La formación de distintos escalones debido al fenómeno descrito anteriormente se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Generación de distintos escalones debido al clivaje. (Imagen adaptada de [4]).

Un cierto número de estos escalones de clivaje se pueden juntar formando lo que se denomina líneas de río, nombre debido a su forma característica que se forma tal y como se muestra en la fractografía de la Figura 22.

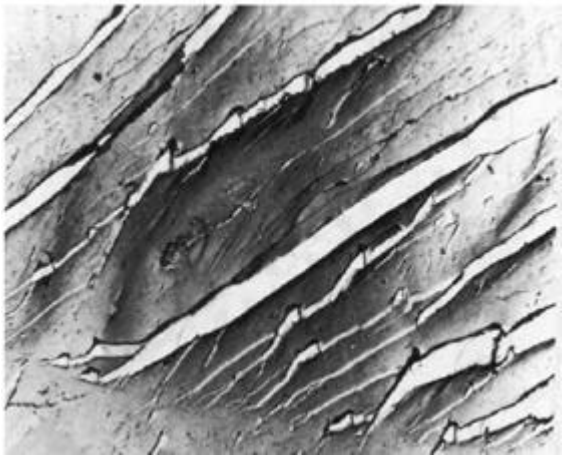


Figura 22. Líneas de río. (Imagen adaptada de [5]).

Al atravesar un límite de grano, un escalón puede a su vez dar origen a varios escalones que se irán uniendo con el avance de la fisura, formando nuevos ríos. [4]

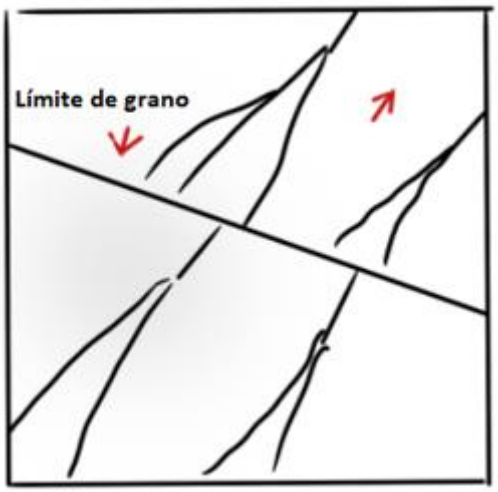



Figura 23. Adaptación gráfica de la formación de más líneas de río. (Imagen adaptada de [4]).

El mecanismo de fractura por clivaje no indica necesariamente fragilidad del material. La fractura frágil de un componente dado puede ocurrir por mecanismos distintos del clivaje, así como ciertos materiales dúctiles pueden presentar superficies de clivaje en ensayos de tracción.

Las condiciones necesarias para que ocurra el clivaje dependen del material particular y del tipo de carga a la que está sometido. En general el clivaje puede ocurrir bajo las condiciones siguientes:

- Altas velocidades de deformación.
- Bajas temperaturas.

**Fractura intergranular**: Se presenta cuando las grietas de la fractura se propagan a lo largo de los límites de los granos mismo que se debilitan o fragilizan por la segregación de impurezas. En la Figura 24 se presenta un esquema sencillo de este tipo de fractura. [1]

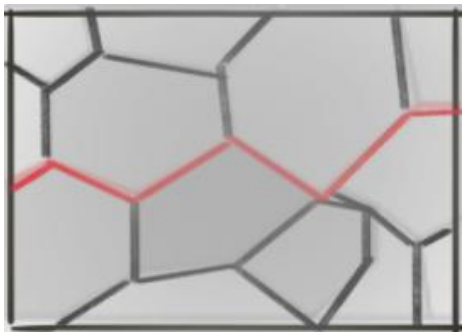
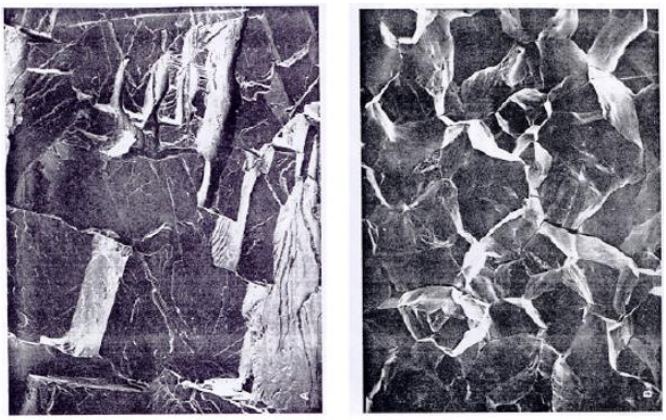


Figura 24. Fractura intergranular (Imagen adaptada de [2]).

**Morfología**

A través de la observación de fractografías obtenidas mediante un microscopio electrónico de barrido, es posible comparar y determinar las superficies de fracturas de tipo transgranular e intergranular, como se muestran en la Figura 25.



a) Transgranular b) Intergranular

Figura 25. Superficies de fracturas transgranular e intergranular. (Imagen tomada de [3]).

En la Figura 26 es posible observar la superficie de una probeta que se sometió a falla por fractura frágil.

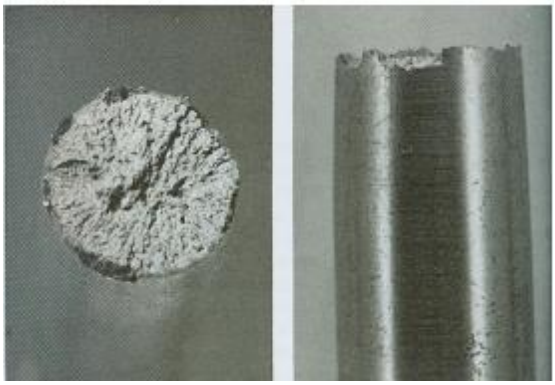


Figura 26. Probeta con fractura frágil transgranular (Imagen tomada de [1]).

En la Figura 26.1 se observa la superficie de una probeta de acero con bajo contenido de carbono sometida a falla por fractura frágil.

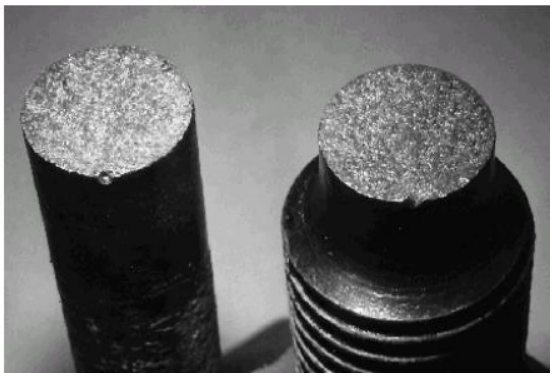


Figura 26.1. Fractura frágil intergranular en un acero de bajo carbono (Imagen tomada de [1]).

La siguiente secuencia de eventos generalmente se asocia con fractura frágil:

**1-** Un pequeño defecto se forma durante la fabricación del elemento, por ejemplo, al unirse mediante soldadura a otro elemento que, en conjunto, cumplirán una determinada función, o durante el funcionamiento de dicho elemento en el sistema o aplicación para el que fue fabricado, por ejemplo, al presentarse fenómeno de fatiga o corrosión.

**2-** El defecto luego se propaga de manera estable debido a la presencia de cargas repetitivas, el estar en ambientes corrosivos o incluso ambos. La tasa de crecimiento inicial del defecto es baja e indetectable inclusive para las técnicas de medición más sofisticadas. La tasa de crecimiento de la grieta se acelera con el tiempo.

**3-** Se produce una fractura repentina cuando la grieta alcanza un tamaño crítico respecto a las condiciones de carga a las que el elemento está sometido. [7]

**Determinación de la fractura frágil**

Un material cristalino puede separarse debido a la combinación de dos micromecanismos: el fenómeno de flujo plástico y la separación de planos atómicos. [7]

Los micromecanismos de fractura que ocurren principalmente debido a la separación de planos atómicos se describen como un fenómeno frágil. Las fracturas frágiles se pueden describir mediante tres modos diferentes:

**Modo I:** las fracturas frágiles de este modo se originan debido a defectos presentes en la estructura y ocurren a esfuerzos de bajo nivel. La propagación de la grieta final desencadena una fractura por clivaje o fractura intergranular con plasticidad limitada en la punta de la grieta. [7]

El elemento sometido a este modo de fractura presentaría una curva esfuerzo-deformación como se muestra en la Figura 27.

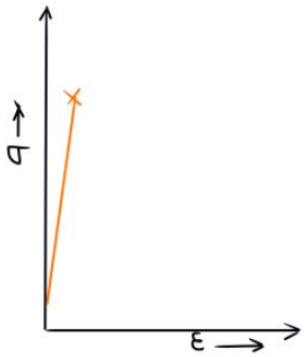



Figura 27. Curva esfuerzo-deformación característica de la fractura por Modo I. (Imagen adaptada de [7]).

**Modo II:** La nucleación de la fractura se da debido a la cedencia a nivel microscópico en el valor del límite de cedencia. La propagación de la grieta final se da por clivaje o fractura intergranular con plasticidad limitada en la punta de la grieta [7].

El elemento sometido a este modo de fractura presentaría una curva esfuerzo-deformación como se muestra en la Figura 28.

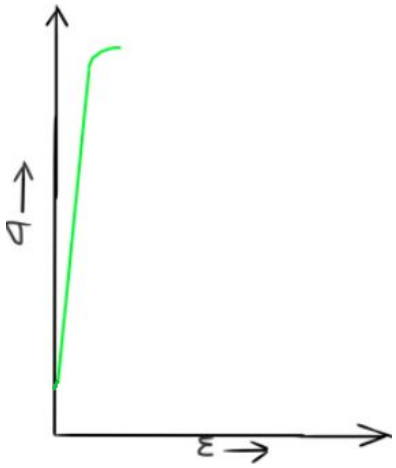



Figura 28. Curva esfuerzo-deformación característica de la fractura por Modo II. (Imagen adaptada de [7]).

**Modo III:** La propagación de la grieta final desencadena una fractura por clivaje o fractura intergranular entre microgrietas, además de que la punta de la grieta tendrá una plasticidad mayor. [7]

El elemento sometido a este modo de fractura presentaría una curva esfuerzo-deformación como se muestra en la Figura 29.

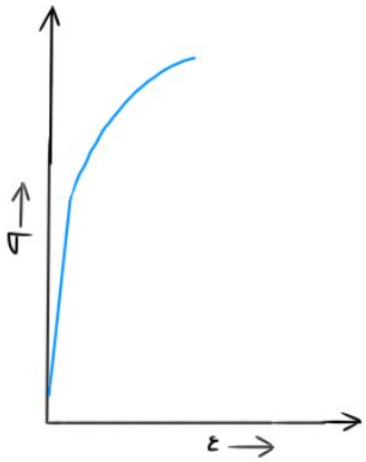



Figura 29. Curva esfuerzo-deformación característica de la fractura por Modo III. (Imagen adaptada de [7])

Estos dos últimos modos ocurren en materiales cuyos defectos o inclusiones son menores que la unidad microestructural principal, usualmente el tamaño de grano.

La observación de la superficie de fractura puede proporcionar información valiosa acerca del estado de tensiones a las que el componente estuvo sometido previo presentar fractura. En las Figuras 30, 31 y 32 se muestran las distribuciones de tensiones para los casos de una probeta de material frágil sometida a torsión, tracción y compresión, respectivamente.

En la Figura 30 se muestra una probeta de material frágil sometido a torsión pura fractura según planos orientados a 45 ° respecto del eje de la torsión y la superficie de fractura resulta más bien alabeada, esto es, rotura perpendicular a esta tensión. La fractura siempre se inicia en la superficie.

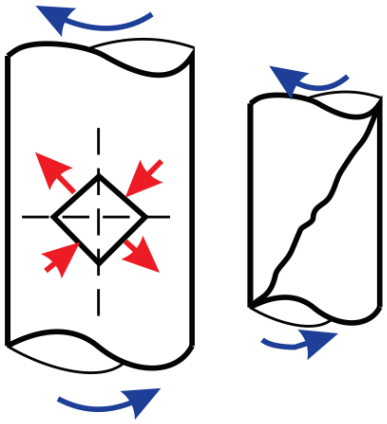


Figura 30. Fractura del Grupo I en un material frágil sometido a torsión pura (Imagen adaptada de [4]).

Un material frágil sometido a tracción tendrá como resultado una rotura perpendicular a esta tensión, como se muestra en la Figura 31.

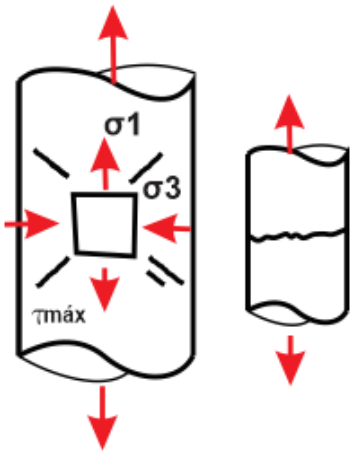



Figura 31. Fractura del Grupo I en un material frágil sometido a tracción (Imagen adaptada de [4]).

Finalmente, el tercer caso que se muestra en la Figura 32 es cuando el material frágil sometido a compresión fractura según los planos longitudinales, pues estas son perpendiculares a las tensiones máximas de tracción. Además, como la distribución de tensiones es uniforme, la fractura puede originarse en cualquier punto de estos planos.

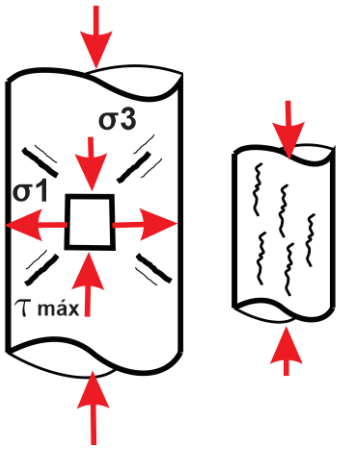



Figura 32. Fractura del Grupo I en un material frágil sometido a compresión (Imagen adaptada de [4]).

## 8. Fractura por fatiga

La fractura por fatiga es la manera más común y la más esperada de las fracturas, esta ocurre cuando una pieza se encuentra sometida bajo cargas cíclicas, las cuales tienen una magnitud inferior a la resistencia máxima del material. Al estar sometido a estas cargas, se producen deformaciones plásticas repetidas, lo cual ocasiona que el número de dislocaciones en el material aumente y como consecuencia el material endurece hasta llegar al punto de propagar una grieta. Cuando el proceso se repite en un determinado número de ciclos, la grieta se propaga y se extiende por el volumen del material, produciendo una fractura. Dicho proceso se puede ver en la Figura 33 [9].

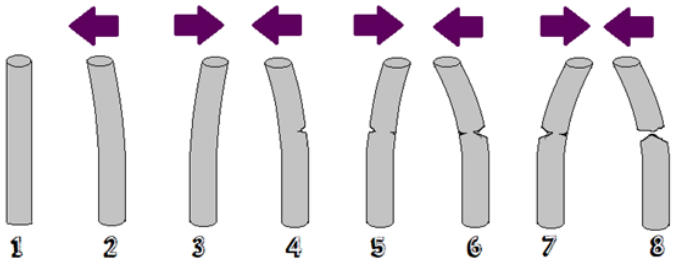



Figura 33. Mecanismo de fractura por fatiga.

En el instante 1 se muestra la pieza en estado original. En el instante 2 y 3 se aplican cargas sobre la pieza. Para el instante 4 se observa la propagación de una grieta. Del instante 5 al 7 se observa como la grieta se propaga por la sección transversal de la pieza. En el instante 8 se observa la pieza fracturada.

La vida de fatiga de un componente es igual a la suma de la fase de iniciación de la grieta y la fase de propagación de la grieta por el volumen del material. [9]

Las grietas se generan a partir de una discontinuidad en la geometría del componente, en esa zona se concentran los esfuerzos y la grieta se comienza a propagar al volumen del componente. [9]

La presencia de una grieta en un componente modifica la concentración de esfuerzos en dicho elemento, pero si no existe una grieta en el material o bien, si no es considerablemente grande para que los esfuerzos se concentren en ella, los esfuerzos y las deformaciones aplicadas en ese componente determinarán la zona donde se iniciara la propagación de la grieta. [9]

**Morfología.**

La morfología de la fractura contiene los elementos mostrados en la Figura 34.

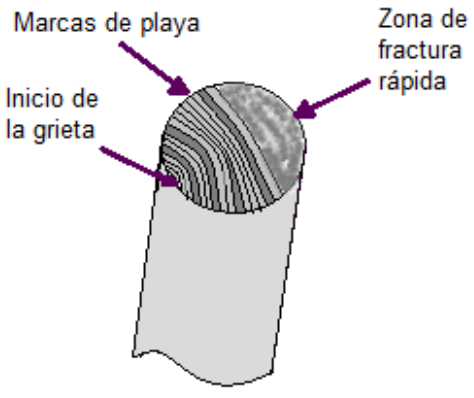



Figura 34. Morfología de la fractura por fatiga (Imagen adaptada de [6]).

Las huellas características de una fractura por fatiga son las marcas de playa y las estrías; las primeras son visibles con microscopía óptica, mientras que las segundas sólo se pueden apreciar a elevados aumentos en un microscopio electrónico. [7]

Las marcas de playa proporcionan información de la velocidad de propagación de la grieta a través del componente; si la separación es amplia, entonces la propagación fue rápida, pero si las líneas de separación son cortas, entonces la propagación fue lenta. Es importante mencionar que la ausencia de marcas de playa, no necesariamente indica que la fractura no

se presentó por fatiga, por ello es necesario observar la existencia de otros elementos que puedan indicar que la fractura ocurrió por fatiga. [7]

**Propagación de la grieta**

Existen relaciones que permiten modelar la propagación de una grieta por medio de una curva (Figura 35), la cual es obtenida con la siguiente relación:

$$\frac{\mathbf{da}}{\mathbf{dN}} = \mathbf{logC} + \mathbf{m\ log\Delta k} \qquad 5$$

donde:

$\frac{da}{dN}$:Incremento de la longitud de la grieta.

$\Delta k$Intervalo cíclico de intensidad de tensiones.

Cy m: constantes tes del material.

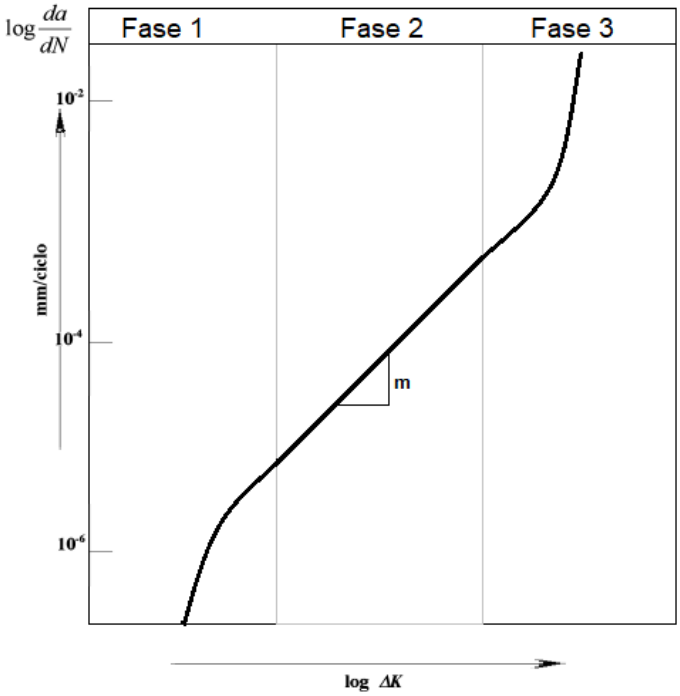



Figura 35. Curva característica la propagación de una grieta en un material dúctil (Imagen adaptada de [6]).

La curva de la Figura 35 se puede dividir en tres fases:

**Fase 1:** Cuando un componente se encuentra sometido bajo cargas cíclicas, los esfuerzos y las deformaciones se concentran en una zona del material. A simple vista no se observan grietas, pero a nivel microscópico se generan planos de deslizamiento que dan pie a la formación de nuevas grietas.[6].

**Fase 2:** En la curva se puede distinguir esta fase por que ocurre un cambio de pendiente en la curva, y sigue una trayectoria lineal, lo cual indica que velocidad de crecimiento de crecimiento de la grieta es constante.

En esta fase ocurre la formación estrías, las cuales están direccionadas de tal manera que apuntan hacia la zona donde se inició la propagación de la grieta inicial [6].

**Fase 3:** Se realiza una transición de la grieta subcrítica hasta la grieta crítica. En esta fase aumenta la rapidez de crecimiento de la grieta, cabe mencionar que el crecimiento de la grieta es inestable en esta fase [6].

Los esfuerzos residuales también están relacionados con la fatiga; los esfuerzos de tensión aceleran la fatiga y los de compresión la retrasan. Dichos esfuerzos pueden aparecer en tratamientos térmicos como el temple, o en procesos como laminado o granallado [9].

**Velocidad de crecimiento de la grieta**

La norma ASTM E-647 es utilizada para analizar la velocidad de crecimiento estable de la grieta. En ensayo consiste en manera general, en someter una probeta compacta (en modo I) a una serie de ciclos de fatiga hasta alcanzar la hasta alcanzar un tamaño de grieta de a que sea aproximadamente la mitad de la dimensión W. [6]

“El crecimiento de la grieta se mide mediante observación visual o con un microscopio entre 20 a 50 aumentos.” [6]

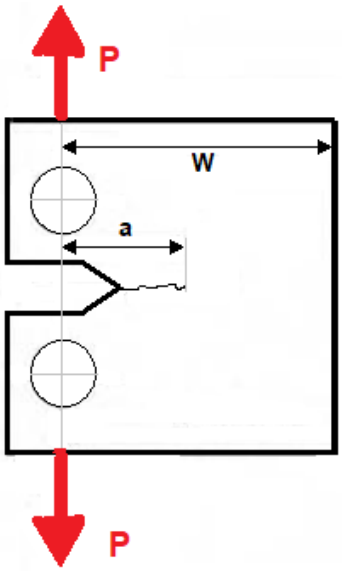



Figura 36. Esquema de la probeta compacta utilizada para el ensayo de crecimiento de la grieta E-647, a-longitud de la grieta. (Imagen adaptada de [6]).

## 9. Fractura por Corrosión (Stress Corrosion Cracking)

Este fenómeno se presenta en materiales susceptibles de corrosión (metales) y ocurre cuando se tiene un elemento que se encuentra inmerso en un ambiente que provoca corrosión, y que además está sometido a ciertas cargas; específicamente a cargas a tensión que podrían ser o no dinámicas. [6]

En este caso, defectos superficiales así como grietas ya formadas debido a la carga de tensión tienen una relevancia importante, pues indudablemente estos defectos en un medio corrosivo provocarán su crecimiento hasta culminar en una fractura debido a la reducción de la capacidad de carga del elemento que presente este problema.

Así las grietas suelen aparecer en la superficie del material de la misma forma que la corrosión, por lo que la corrosión por hendidura y en algunos casos por picaduras podrían propagar el inicio de una grieta.

Esto se debe a que en el material surgen grietas o puntos de corrosión localizada (corrosión por hendidura). Estas grietas y defectos surgen primero en la superficie del material siendo intergranulares y transgranulares provocando una variación en en el comportamiento mecánico del material ocasionando su fractura. [6]

Como se ha mencionado en los párrafos anteriores de esta sección, la causa de este tipo de fracturas se da por la propagación de una grieta en un material que está inmerso en un medio corrosivo.

La existencia de los defectos superficiales y de alguna pequeña grieta en algún punto del material inmerso está en contacto con el medio corrosivo. Así el interior de la grieta comienza el proceso de corrosión deteriorando la superficie del material como se observa en la Figura 37.

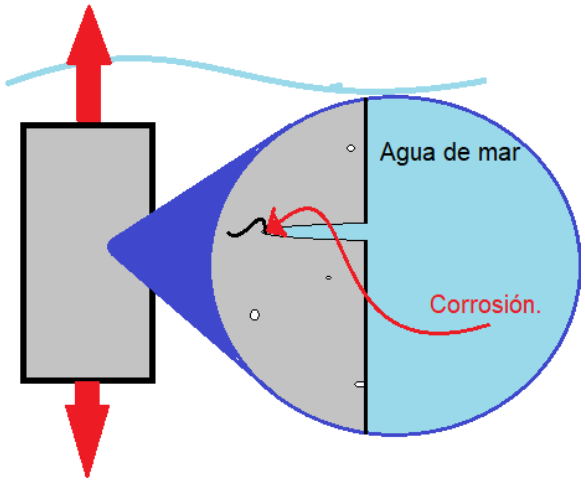



Figura 37. Elemento con defectos superficiales inmerso en medio corrosivo.

En el borde de la grieta y/o defectos, el proceso de corrosión se lleva a cabo con la naturaleza del fenómeno degradando parte del material y produciendo una capa de óxido.

Sin embargo y debido a que el material sigue bajo fuerzas de tensión y a medida que avanza el proceso de corrosión la capacidad de carga del elemento disminuye. En consecuencia, esta grieta crece destruyendo la capa de óxido generada permitiendo nuevamente el contacto del volumen del material con el medio corrosivo.

Esto permite que la grieta crezca e incluso se ramifique por el mismo proceso de corrosión por hendidura como se observa en la Figura 38.

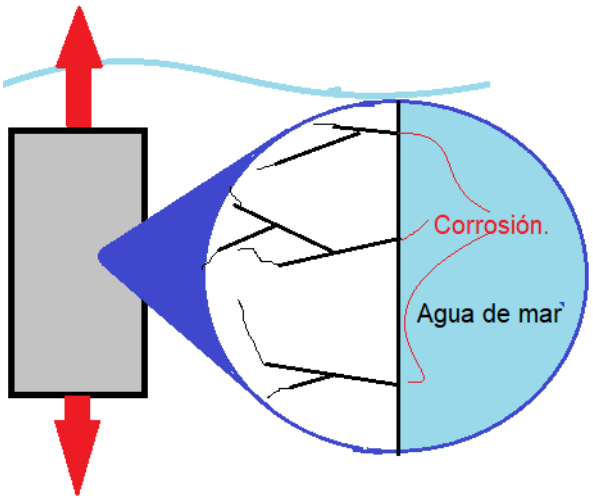



Figura 38. Propagación de grietas por efecto corrosivo.

Es importante mencionar que este tipo de falla aparece con mayor frecuencia en aleaciones que en metales puros, sin embargo, estos no están exentos.

Otro aspecto importante que se debe mencionar es que el inicio de la fractura ocurre de forma perpendicular a la aplicación de la carga, en donde resulta pertinente mencionar la similitud con la prueba de tracción compacta en el modo de esfuerzos I.

Sin embargo, este tipo de falla no solamente se da por la corrosión únicamente. A partir de cierta longitud de la grieta interviene otro fenómeno.

“La reacción de corrosión genera hidrógeno que se absorbe en la superficie del metal y se introduce por difusión hasta el frente de grieta y causa fragilización por hidrógeno.” [6]

Esta fragilización en el material conduce a que se tenga una fractura que se propaga de forma rápida y con un carácter de fractura frágil. [4]

La fragilización por hidrógeno se da debido a la disponibilidad de este elemento como resultado del proceso corrosivo. [6]

Sin embargo, este efecto del hidrógeno no solo se puede encontrar en un medio acuoso, sino que también se puede encontrar en un entorno cuya atmósfera contenga hidrógeno en estado gaseoso, pues resulta de las fallas más comunes en la industria del petróleo y gas. [9]

“El hidrógeno degrada metales y aleaciones, puede provocar el colapso de una estructura para niveles de carga que son bajos cuando se les compara con los que puede ser soportados para materiales libres de hidrógeno.” [9]

En consecuencia, y debido a que se puede tener el hidrógeno tanto en un medio acuoso como en un medio gaseoso, existen dos formas en las que el hidrógeno se absorbe dentro del volumen del material ocupando los espacios intersticiales de su estructura cristalina.

**Hidrógeno en medio acuoso**

En esta forma de disposición del hidrógeno y dado que ya se tiene una grieta inicial y/o defecto en el material y/o creado por efecto de SCC, el hidrógeno surge a partir de la reducción de la molécula de agua. Esto permite la liberación de hidrógeno atómico que se difunde en el material provocando una solución sólida de hidrógeno intersticial, provocando fragilización en el volumen del material. El proceso de esta absorción de hidrógeno se aprecia en la Figura 39.

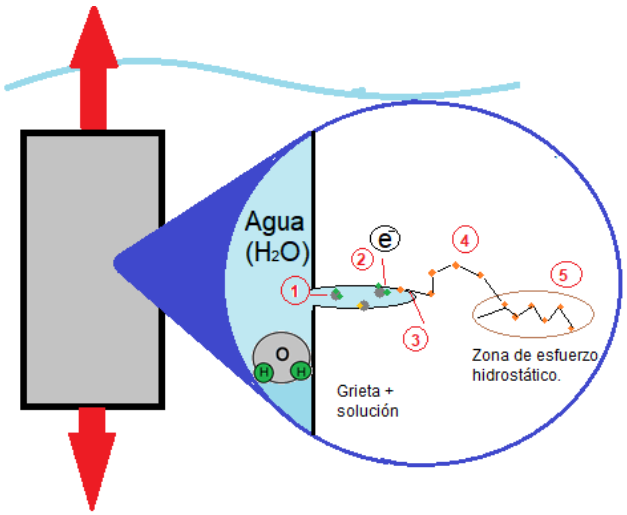



Figura 39. Fragilización por hidrógeno (medio acuoso). 1) Adsorción en grieta. 2)Reducción de molécula de agua. 3)Absorción de hidrógeno atómico. 4)Difusión de hidrógeno en estado sólido. 5) Fragilización. (Adaptado de [9] y [10]).

### Hidrógeno en medio gaseoso

Por otro lado, cuando se tienen moléculas diatómicas de hidrógeno, este penetra en los defectos del material debido a su estado gaseoso. Posteriormente se disocia en 2 átomos de hidrógeno que se absorben buscando su estabilidad estableciéndose como solución sólida dentro de los espacios intersticiales del material provocando su fragilización. El proceso de esta absorción de hidrógeno se aprecia en la Figura 40.

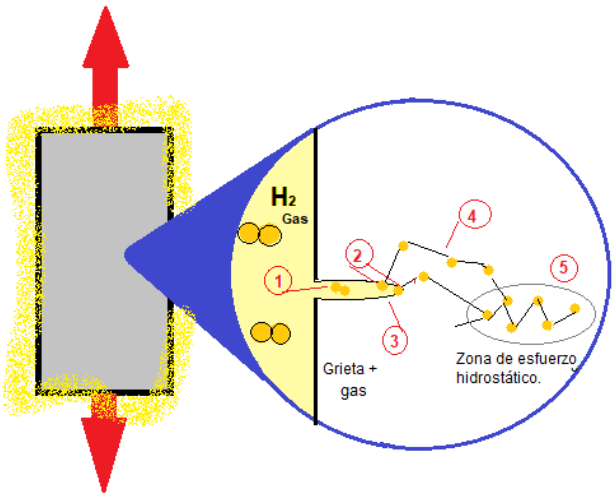



Figura 40. Fragilización por hidrógeno (medio gaseoso). 1) Adsorción en grieta. 2)Disociación de hidrógeno diatómico. 3)Absorción de hidrógeno atómico. 4)Difusión de hidrógeno en estado sólido. 5) Fragilización. (Adaptado de [9] y [10]).

Un ejemplo en donde se podría presentar la combinación de fractura por corrosión y la fragilización por hidrógeno podría ser en las cadenas que mantienen en su lugar las boyas

marinas mediante anclas; estas están sometidas a cargas de tracción debido al oleaje de un medio acuoso corrosivo como se aprecia en la Figura 41.

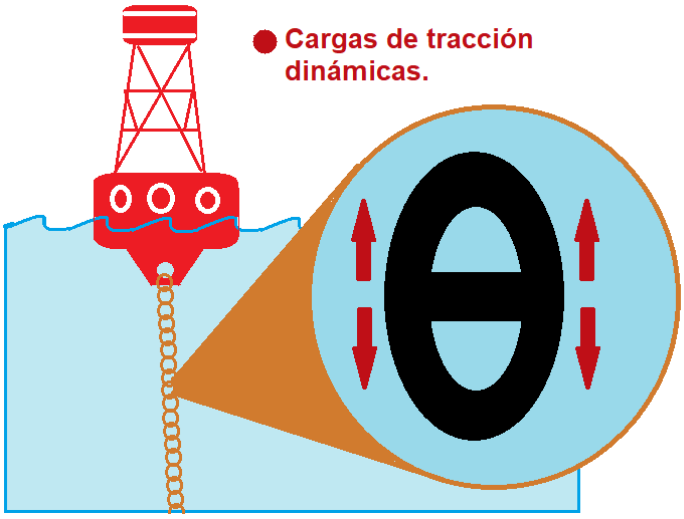



Figura 41. Eslabón de cadena de fijación de boya marina.

**Referencias**


1. Mechanical Properties of Metals II: Fracture and Failure.
2. Leonid Zhigilei. (2010). “Failure: How do Materials Break?”. University of Virginia.
3. Gomila, M. J. A. (2002). “Fractura de materiales”.
4. M., I., & J., A. R. (1988). “Fractografía. Aplicaciones al análisis de fallas”. Comisión Nacional de Energía Atómica.
5. Rodríguez Vázquez, C. A. (2013). “Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras”.
6. José, A., & González, J. (2008). “Mecánica de fractura”. Universidad de País Vasco.
7. ASM International Handbook Committee. (1996). “ASM Handbook. Volume 19: Fatigue and fracture.” ASM International.
8. Callister, W. D. (1997). “Materials science and engineering: An introduction”. John Wiley & Sons.
9. Uribe Pérez, Iván; Velosa Pacheco, Aldrin B., Zabala Capacho, Luis E. (2011). “Fundamentos del daño por hidrógeno en los aceros”. El Hombre y la Máquina, núm. 36. Universidad Autónoma de Occidente.
10. Bastien, P. y Azou, P. (1951). "Efecto del hidrógeno en la deformación y fractura del hierro y el acero en tensión simple". Actas del Primer Congreso Metalúrgico Mundial. ASM. pp. 535-552.
11. Parrington, Ronald. J. (2003). “Fractographic features in metals and plastics.” Advanced Materials & Processes. ASM International.
12. González, Leonardo. (2014). “Filosofía de la mecánica de fractura: primera parte, MFEL”. Universidad de Ciencia y Tecnología.