

# **Capítulo 1**

## **Introducción**

Como es sabido, la fractura es la separación o fragmentación de un cuerpo en dos o más partes bajo la acción de esfuerzos, mediante la creación de dos nuevas superficies: las superficies de fractura.

En la actualidad, la fractura es un fenómeno que ha recibido atención constante debido a que muchas fallas ocurren una vez en toda una vida, una sola falla puede significar una gran catástrofe, como en el caso de los accidentes aeronáuticos, las explosiones en grandes ductos de gas o las fallas de reactores nucleares. Por lo tanto, la fractura es acompañada de considerables pérdidas materiales, económicas y humanas. Como ejemplo, en los Estados Unidos (según un estudio del departamento de Comercio que data de 1983) las fallas de materiales le cuestan a la sociedad aproximadamente el 4% del producto interno bruto.

Griffith [1], en 1920, fue el primero en intentar analizar matemáticamente el fenómeno de fractura, él propuso el siguiente criterio el cual afirma "que una grieta se propagará cuando la energía elástica es al menos igual a la energía requerida para crear una nueva superficie de grieta". Griffith estableció una ecuación, la cual provee una relación entre el esfuerzo de fractura y el tamaño de grieta. Una aportación importante con la cual sentó las bases de la mecánica de fractura moderna fue al deducir que la fractura resulta de un proceso de conversión de energía que no depende solamente del esfuerzo, sino también del tamaño de grieta.

Irwin [2], en 1957 realizó el segundo logro más importante en los fundamentos de la mecánica de fractura moderna, cuando introdujo el concepto del factor de

intensidad de esfuerzos, el cual es un parámetro que define la magnitud de los esfuerzos en la punta de la grieta. Cuando se alcanza un valor crítico este parámetro es conocido como tenacidad a la fractura. Esta constituye una propiedad del material, la cual representa la resistencia a la falla en presencia de un defecto o grieta.

Los modelos de Griffith e Irwin son completamente Euclidianos, sin embargo las trayectorias que pueden ser intergranulares, transgranulares, clivaje, etc., son "rugosas" y poseen una geometría caprichosa que no tiene relación alguna con estos modelos.

En 1975, Mandelbrot [3] introdujo el término "fractales" (del latín *fractus*, que significa irregular). El interés de Mandelbrot en los fractales nació de su certeza de que la naturaleza no podía ser representada por la geometría Euclidiana, debido a que al observar las nubes, se dio cuenta que no eran esferas, ni que las montañas eran conos, las costas no eran círculos, así como la corteza de un árbol no es plana, ni un rayo viaja en línea recta. Con esto, sentó las bases para la geometría fractal, la cual permite describir objetos creados por la naturaleza. Se abrió así una nueva posibilidad para la caracterización de las superficies de fractura.

Más tarde, los fractales se clasificaron en autosimilares y autoafines. En el caso en que un objeto tiene la misma forma al cambiar de escala (un objeto isotrópico), es decir, que es similar a la forma que lo genera, y cuando se cambia la escala un número infinito de veces se sigue obteniendo una figura similar a las anteriores, se dice que el objeto es autosimilar. Estos son caracterizados por su dimensión fractal.

Sin embargo, hay muchos objetos en la naturaleza que presentan escalamiento desigual en distintas direcciones (objetos anisotrópicos), a los cuales se les

llama fractales autoafines. Estos, a diferencia de los autosimilares, son fractales estadísticamente invariantes en forma y se caracterizan por el exponente de rugosidad y la longitud de correlación.

Ahora bien, la propagación de las grietas genera las superficies de fractura, por lo que el estudio de las superficies de fractura ha sido clave para la comprensión actual del fenómeno de propagación.

En base a los resultados derivados de una infinidad de investigaciones como las de Balankin, Susarrey y Bravo [4-9], Mandelbrot [10], Bouchaud [11,12], Maloy [13], Milman [14,15], Daguer [16], Hinojosa [17], E. Reyes [18,19], J. Aldaco [20,21], X. Guerrero [22], Kertész, Horváth y Weber [23], Provas, Alava y Nissila [24], actualmente se reconoce que las superficies de fractura son objetos fractales naturales que manifiestan escalamiento anisotrópico, estas investigaciones se discuten en el punto 3.4, p.37.

En el caso particular de investigaciones de propagación de grietas realizadas en papel, los trabajos publicados no han involucrado aún la microestructura de éste, y por lo tanto no han intentado relacionar ésta con los parámetros autoafines. En la presente investigación se pretende estudiar las trayectorias seguidas por grietas en caso bidimensional, analizando hojas de papel, con el fin de aportar conocimiento para la mejor comprensión del fenómeno y propagación de grietas en el medio bidimensional.

Los resultados obtenidos (parámetros autoafines) servirán para probar y mejorar los modelos de propagación existentes y en desarrollo, así como para establecer relaciones entre propiedades estadísticas y autoafines con la microestructura y eventualmente con las propiedades físicas y/o mecánicas. Este escenario se discute con más detalle en el capítulo 3.

## Capítulo 2

# Mecánica de la fractura y fractografía

### 2.1 Introducción

El presente capítulo tratará sobre temas relacionados al fenómeno de la fractura, que se define de la siguiente forma: *es la separación o fragmentación de un sólido bajo la acción de una carga externa, a través de un proceso de creación de nuevas superficies: las superficies de fractura* [25,26]. Se dará énfasis a la mecánica de fractura, que es la disciplina que estudia el comportamiento de estructuras que contienen grietas u otros pequeños defectos y son sometidas a cargas. Dentro de la mecánica de la fractura, se explicará la concentración de esfuerzos, el factor de concentración de esfuerzos, el criterio de Griffith, el factor de intensidad de esfuerzos y algo sobre la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (MFLE), ya que ésta permite obtener una medida cuantitativa de la resistencia del material a la propagación de grietas y es de gran importancia en fracturas frágiles.

Por otro lado se discute también la fractografía, que proporciona la interpretación de características observadas en superficies de fractura en un análisis cualitativo de las condiciones bajo las cuales se generan y propagan las grietas. Este tema se enfocará a los mecanismos básicos de crecimiento de grieta y a los tipos de fractura presentes en un material.

## **2.2 Mecánica de la fractura**

### **2.2.1 Antecedentes históricos**

El fenómeno de la fractura ha llamado la atención desde la época neolítica cuando el hombre inventó y diseñó las primeras herramientas sencillas de piedra, como cuchillos, lanzas, etc. Varios incidentes relacionados con la fractura que ocurrieron en los siglos XII y XIII en Europa están documentados en la literatura [27].

Las pruebas o ensayos llevaron a los científicos a aproximarse a los problemas de resistencia y fractura, siendo la punta de lanza pioneros tales como Leonardo da Vinci (1452-1519) y Galileo Galilei (1564–1642). Leonardo da Vinci [28] fue el primero en realizar experimentos para determinar la capacidad de carga de alambres de acero, Galileo Galilei [29] fue el primero en formular que la carga de fractura de una barra en tensión es directamente proporcional al área de su sección transversal e independiente de su longitud.

La Revolución Industrial del Siglo XIX trajo consigo un incremento en la demanda de metales. Esta grande y feroz expansión del mundo de la ingeniería fue acompañada por una frecuencia mayor de falla.

Posteriormente, en 1900 con la aparición del automóvil, seguido por los aeroplanos, se incrementó la provisión de factores de seguridad adecuados y la necesidad de entender de manera mas clara el fenómeno de ruptura. Sin embargo, la respuesta fué dirigida principalmente a la mejora de materiales, perfeccionando los procesos de fabricación y de inspección.

Con estas herramientas, la práctica del control de fractura se basó principalmente en la experiencia de fallas, factores de seguridad y de ensayos, durante el periodo de 1900-1950, sin embargo, fueron desarrolladas distintas investigaciones sobre fractura, las cuales ayudaron a la introducción de la mecánica de fractura [27].

### 2.2.2 Definición

La mecánica de la fractura relaciona el tamaño y forma de una grieta y las fuerzas o cargas que conducen a la fractura de un componente de forma y dimensiones definidas. Para esto, se apoya en el cálculo de la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos alrededor de una grieta y en el establecimiento de los balances de energía que tienen lugar durante la extensión de una grieta.

Existen varias metodologías de análisis de componentes agrietados, dependiendo de la extensión de la deformación plástica que precede a la fractura [25]. De acuerdo con la extensión de la deformación plástica, las categorías de la fractura son:

*Fractura lineal elástica:* cuando la extensión de la zona plástica esta confinada a una pequeña región frente a la punta de la grieta y la deformación del resto del cuerpo es elástica.

*Fractura elasto-plástica:* la zona plástica se extiende en el total remanente del ancho de la pieza, pero permaneciendo como una región relativamente estrecha alrededor del plano de la grieta.

*Colapso Plástico:* la fractura es precedida de deformación plástica generalizada.

La mecánica de la fractura considera que el proceso de fractura inicia con una grieta que se propaga hasta la separación final o fragmentación de la pieza. Si durante la propagación de la grieta, ésta puede detenerse al disminuir o desaparecer los esfuerzos, se dice que la propagación es *estable* y si la grieta se propaga de manera rápida, autoacelerada y es prácticamente imposible de detener, entonces la propagación es *inestable*.

Como en la mayoría de los componentes estructurales y mecánicos son diseñados y operados en condiciones que no producen esfuerzos más allá del límite elástico del material, la aproximación más común es la de Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE).

### **2.2.3 Concentración de esfuerzos**

Un requisito fundamental para la propagación de la grieta es que la fuerza en la punta de la grieta debe de exceder la resistencia cohesiva teórica del material. Es en efecto el criterio fundamental, pero no es muy útil porque es casi imposible de medir el esfuerzo en la punta de grieta. Un criterio equivalente llamado el criterio de Griffith, es más útil y predice la fuerza que debe de ser aplicada a un cuerpo que contiene una grieta, para la propagación.

La falla de un material se asocia por la presencia de altos esfuerzos y deformaciones locales en la vecindad de los defectos. De esta manera, es importante saber la magnitud y la distribución de estos esfuerzos y deformaciones alrededor de los defectos.

Podríamos imaginar la fuerza externa aplicada que ha sido transmitida de una orilla a la otra de la placa (figura 2.1) por medio de líneas de fuerza (similar a las bien conocidas líneas magnéticas de fuerza). En los extremos de la placa, que han sido uniformemente estirados, el espacio entre las líneas es uniforme. Las líneas de fuerza en regiones centrales de la placa son severamente distorsionadas por la presencia de la grieta (el campo de esfuerzos es perturbado). Las líneas de fuerza actúan como cuerdas elásticas, tiende a minimizar sus longitudes y estas se agrupan cerca de los extremos de la grieta elíptica. Este agrupamiento de líneas causa un decremento de espacios entre líneas y consecuentemente un incremento en la fuerza local (concentración de esfuerzos), y hay entonces más líneas de fuerza en la misma área.

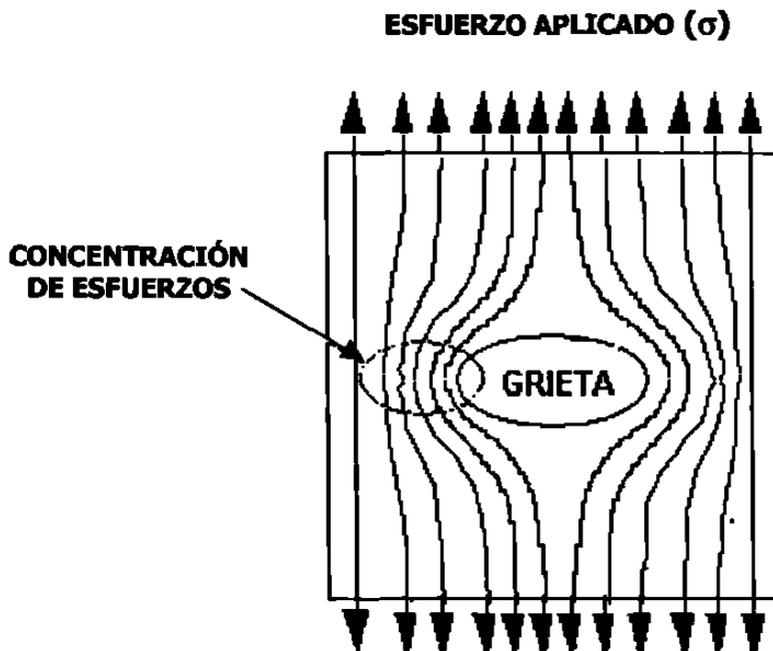


Figura 2.1 Una placa bidimensional que contiene una grieta, sujeta a una fuerza uniforme tensil alejada de la grieta.

### 2.2.4 Factor de concentración de esfuerzos

El esfuerzo de fractura teórico de un sólido es del orden de  $E/10$ , donde  $E$  es el módulo de Young, pero la resistencia de los sólidos en la práctica es un orden de magnitud menor a este valor. El primer intento de dar una explicación razonable de esta discrepancia se debe a A. A. Griffith [1]. Su modelo analítico fue basado en la solución elástica de una cavidad en forma de elipse, ver figura 2.2.

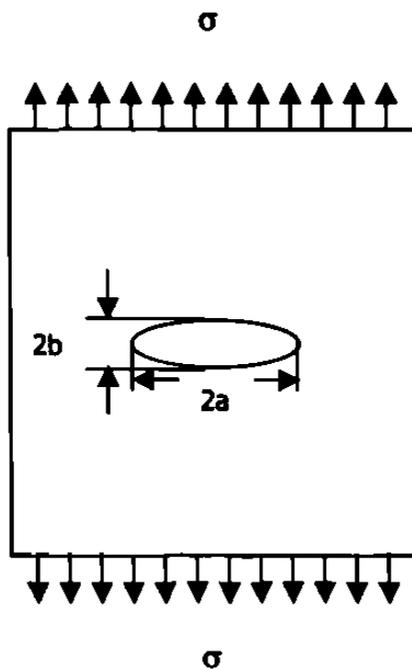


Figura 2.2 Muestra una cavidad elíptica en un medio bidimensional bajo un esfuerzo uniforme ( $\sigma$ ) alejado de la cavidad.

El esfuerzo máximo ( $\sigma_{\max}$ ) ocurre en los extremos del eje mayor de esta cavidad elíptica y es dado por la ecuación debida a Inglis [30] :

$$\sigma_{\max} = \sigma \left( 1 + 2 \frac{a}{b} \right) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde  $2a$  y  $2b$  son las longitudes de los ejes mayor y menor de la elipse respectivamente. El valor del esfuerzo del extremo principal de la cavidad ( $\sigma_{\max}$ ), llega a ser extremadamente alto a medida que la elipse se alarga.

En el caso de una elipse extremadamente plana o una grieta muy angosta de longitud  $2a$  teniendo un radio de curvatura  $\rho = b^2/a$ , la ec. 2.1 puede ser escrita como:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left( 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \approx 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad \text{para } \rho \ll a \quad \text{(Ec. 2.2)}$$

Notamos que a medida que  $\rho$  se hace más pequeña,  $\sigma_{\max}$  llega a ser más grande y en el límite de  $\rho \rightarrow 0, \sigma_{\max} \rightarrow \infty$ . Definimos el término  $2\sqrt{a/\rho}$  como el factor de concentración de esfuerzos,  $K_t$ , donde  $K_t = \sigma_{\max}/\sigma$ .

$K_t$  simplemente describe el efecto geométrico de la grieta en el esfuerzo local (en la punta de la grieta). Nótese que el factor de concentración de esfuerzos  $K_t$  depende más de la forma de la cavidad que del tamaño.

### 2.2.5 El criterio de Griffith

El primer intento significativo para analizar matemáticamente el fenómeno de fractura fue llevado a cabo por Griffith, quien derivó una expresión para determinar el esfuerzo de fractura de materiales muy frágiles como el vidrio. Griffith partió del hecho de que un cuerpo deformado elásticamente almacena una energía potencial y propuso que esta energía elástica almacenada es la fuerza impulsora del crecimiento de grietas, siempre y cuando la demanda de energía para la extensión de grieta sea satisfecha por la conversión de la energía elástica almacenada.

El criterio de Griffith [25,26,31] para la propagación de una grieta es el siguiente:

*"Una grieta se propagará cuando el decremento de energía de deformación elástica sea al menos igual a la energía requerida para crear la nueva superficie de la grieta."*

Griffith estimó el cambio en la energía que resulta cuando una grieta elíptica es introducida en una placa infinita. Griffith calculó el decremento en la energía debido a la presencia de una grieta en una placa conforme a la ecuación de Inglis y descubrió que es equivalente a  $\pi\sigma^2 a^2/E$  por unidad del espesor de la placa para la condición de esfuerzo plano. El incremento en la energía debido a la presencia de dos nuevas superficies equivalen  $2a(2\gamma)$ , donde  $\gamma$  es la energía superficial, por unidad del espesor de la placa. De esta manera, el cambio en la energía potencial de la placa cuando una grieta ha sido introducida podría ser escrito como:

$$U - U_o = 4a\gamma_s - \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde  $U$  es la energía potencial por cada unidad del espesor de la placa en la presencia de la grieta,  $U_o$  la energía potencial por cada unidad del espesor de la placa en la ausencia de la grieta,  $\sigma$  el esfuerzo aplicado, "a" la mitad de la longitud de la grieta y  $\gamma_s$  es la energía superficial específica.

A medida que la grieta crece, la energía de deformación se libera pero se crean superficies adicionales. La grieta es estable cuando estas componentes de energía se encuentran en balance. Si no están en balance se tiene una grieta inestable (la grieta crecerá). Podríamos obtener la condición del equilibrio igualando a cero la primer derivada de la energía potencial  $U$  respecto a la longitud de la grieta. De este modo, recordando que  $\delta U_o/\delta a = 0$ , como  $U_o$  es la energía potencial en la ausencia de la grieta y no cambia la longitud de la grieta "a", obtenemos:

$$\frac{\delta U}{\delta a} = 4\gamma_s - \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} = 0 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$2\gamma_s = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Una segunda derivada negativa podría implicar que la ecuación 2.4 representa un equilibrio inestable y esa grieta crecerá. Reacomodando la ecuación 2.4 podríamos obtener el esfuerzo de propagación de la grieta ( $\sigma_c$ ) bajo condiciones de esfuerzo plano y deformación plana como:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad \text{esfuerzo plano} \quad (\text{Ec. 2.6a})$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a(1-\nu^2)}} \quad \text{deformación plana} \quad (\text{Ec. 2.6b})$$

Donde  $\nu$  es la razón de Poisson. Conforme al análisis termodinámico de Griffith, una condición necesaria para la propagación de la grieta es:

$$-\frac{\delta U_e}{\delta a} \geq \frac{\delta U_\gamma}{\delta a} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde  $U_e$  es la energía elástica del sistema y  $U_\gamma$  es igual a  $2\gamma_s$  en el caso más simple. Esta es una condición necesaria para una fractura debido a una propagación rápida de una grieta. Pero no podría siempre ser suficiente. Si el esfuerzo local en la punta de la grieta no es suficientemente grande para romper los enlaces atómicos, el criterio de la energía de Griffith sería inadecuado.

El gran valor de la teoría de Griffith es que, en lugar de los parámetro locales y difíciles de medir ( $\sigma_{\max}$ ) y  $\sqrt{\rho}$ , permite el uso del esfuerzo aplicado y la longitud de la grieta, que son fáciles de medir. La cantidad  $\sigma_c \sqrt{a}$  es denotada por  $K_c$  y es llamada la tenacidad a la fractura del material.

Orowan [32] sugirió que la ecuación de Griffith sería más compatible con la fractura dúctil en metales por medio de la inclusión de un término  $\gamma_p$  expresando el trabajo plástico requerido para extender la pared de la grieta obteniendo:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E}{\pi a}(\gamma_s + \gamma_p)} \quad \text{esfuerzo plano} \quad (\text{Ec. 2.8a})$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E}{\pi a(1-\nu^2)}(\gamma_s + \gamma_p)} \quad \text{deformación plana} \quad (\text{Ec. 2.8b})$$

### 2.2.6 El factor de intensidad de esfuerzos

El factor de intensidad de esfuerzos K mide la intensificación del campo de esfuerzos alrededor de la punta de la grieta y no debe ser confundido con el factor de concentración de esfuerzos  $K_t$ . El factor de intensidad de esfuerzos K incluye la influencia del esfuerzo  $\sigma$  y las dimensiones apropiadas de la grieta. De este modo K caracterizará las condiciones externas (el esfuerzo normal aplicado ( $\sigma$ ) y la mitad de la longitud de la grieta "a") que corresponden a fracturar cuando los esfuerzos y las deformaciones en la punta de la grieta alcanzan un valor crítico.

Este valor de K es caracterizado como crítico y es designado como  $K_c$ . En el caso de una muestra delgada (condiciones de esfuerzo plano),  $K_c$  depende del espesor de la muestra, mientras en el caso de una muestra de espesor grueso (condiciones de deformación plana), es independiente del espesor del espécimen y es denominado  $K_{Ic}$ .

La condición de deformación plana representa el estado de esfuerzos más severos y los valores de  $K_c$  son menores que los del espécimen de esfuerzo plano.

Los valores de deformación plana del factor de intensidad de esfuerzo crítico,  $K_{IC}$ , son propiedades válidas del material independientes del espesor, para describir la tenacidad a la fractura de materiales.

El factor de intensidad de esfuerzos ( $K$ ), en su forma más general se expresa matemáticamente como:

$$K = \alpha\sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde  $\alpha$  es una constante que depende del modo de desplazamiento y geometría del espécimen, ver figura 2.3,  $\sigma$  es el esfuerzo aplicado y "a" es la mitad de la longitud de la grieta, cuando se alcanza un valor crítico de  $K$ , conocido como tenacidad a la fractura y denotado como  $K_{IC}$ , ocurre la fractura. La tenacidad a la fractura constituye una propiedad del material, y puede ser medible por medio de pruebas de laboratorio. El factor de intensidad de esfuerzos tiene las unidades  $(\text{N/m}^2)\sqrt{m}$ ,  $\text{Pa}\sqrt{m}$  ó  $\text{Nm}^{-3/2}$ .

### 2.2.7 Modos de desplazamiento de las superficies de una grieta

Los tres modos de desplazamiento de las superficies de fractura de una grieta son mostrados en la figura 2.3. El modo I es la abertura de la grieta en la dirección perpendicular al plano de fractura. El modo II se refiere al desplazamiento de las superficies en sentidos opuestos, pero en la dirección de avance de la grieta. El modo III es el desplazamiento fuera del plano en la dirección perpendicular a la dirección de avance.

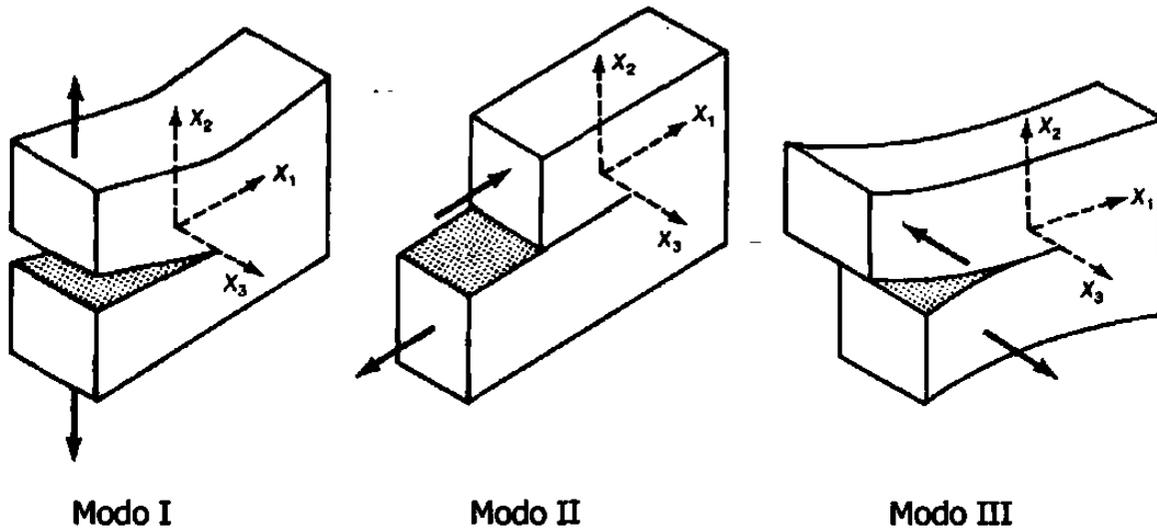


Figura 2.3 Modos de desplazamiento de las superficies de una grieta

La gran mayoría de los casos prácticos corresponden al modo I. Una combinación de especial interés es el modo I + II, el cual se presenta en grietas inclinadas, mientras que el modo III es importante en fracturas por torsión pura.

### 2.2.8 Mecánica de fractura lineal elástica

Cuando en un material la ductilidad es muy baja, es decir, su capacidad de deformación plástica es despreciable, ocurre que en éste la grieta entonces se propagará muy rápidamente con poca deformación plástica del material alrededor de la superficie de la grieta, resultando una fractura frágil. Otra característica de fractura frágil es que la propagación de la grieta es repentina, rápida e inestable.

Numerosas fracturas frágiles han ocurrido en servicio y hay ejemplos abundantes de ellos en gran variedad de campos ingenieriles estructurales y mecánicos. Detalles de fallas catastróficas en servicios de barcos, puentes, ductos de aceites, turbinas, accidentes aeronáuticos, etc., podrían ser encontrados en la literatura [33-36], ver figuras 2.4 y 2.5.

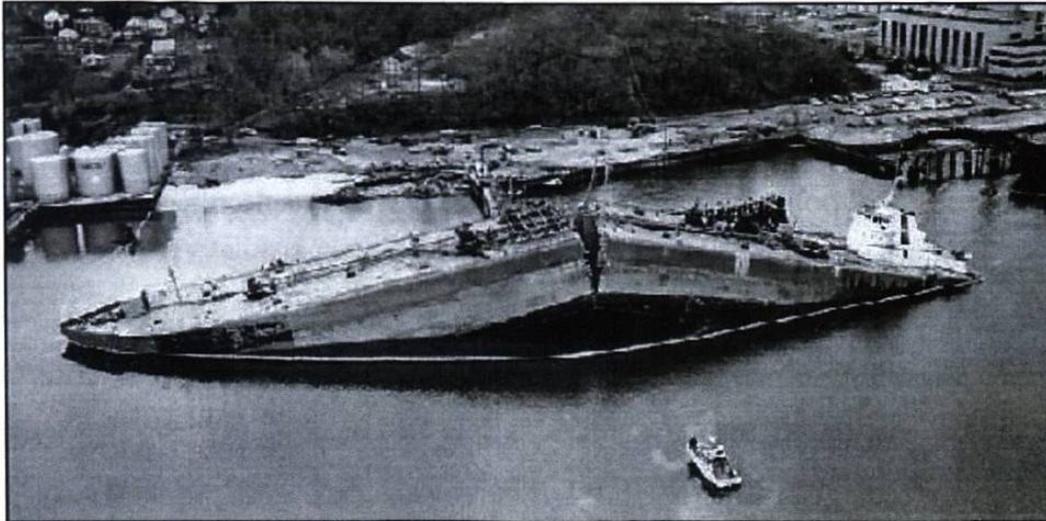


Figura 2.4 Muestra una fractura ocurrida en un barco en servicio [34].

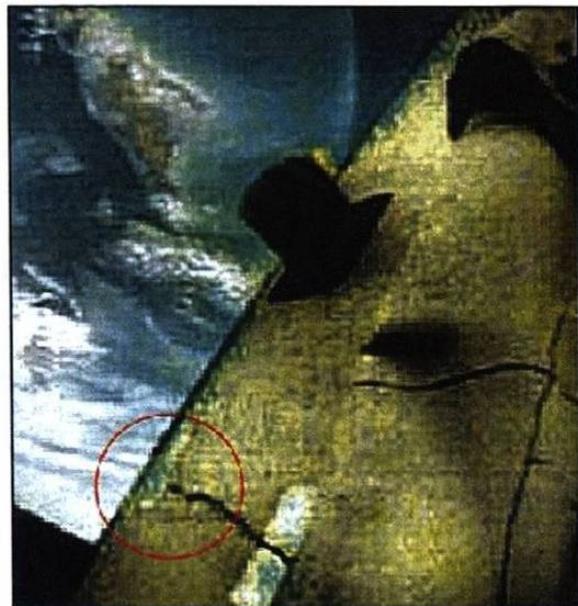
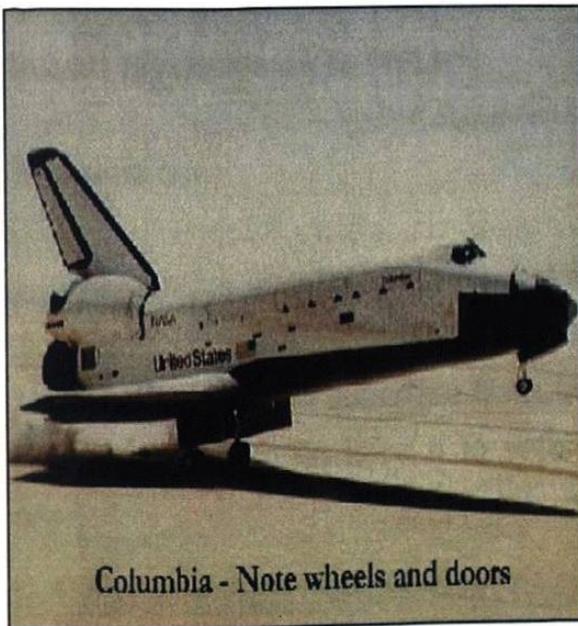


Figura 2.5 Muestra las grietas recientemente encontradas en el accidente de la nave espacial Columbia [36].

En vista de la gran importancia de las fracturas frágiles ha emergido en la vida una disciplina llamada mecánica de fractura lineal elástica (MFLE), la cual permite obtener una medida cuantitativa de la resistencia del material contra la propagación de grietas.

### 2.2.9 Tenacidad a la fractura

La MFLE es el tratamiento más generalmente empleado en nuestra muy constante lucha ante la fractura catastrófica. Este nuevo enfoque se basa en el concepto de la propiedad referente al material, la tenacidad a la fractura, es la fuerza necesaria para extender la grieta entre un miembro estructural. Bajo circunstancias especiales, esta fuerza de extensión de la grieta se vuelve independiente de las dimensiones del espécimen y este parámetro podría ser entonces utilizado para una clasificación de materiales en el orden de su tenacidad a la fractura.

#### 2.2.10 Hipótesis de la MFLE

Se asume que:

- 1.- Las grietas son defectos inherentes al material.
- 2.- Una grieta es una superficie libre, interna y plana presente en un campo de esfuerzos elástico. En base a lo anterior, se calcula el esfuerzo en la punta como:

$$\sigma_{r\theta} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde  $r$  y  $\theta$  son coordenadas polares,  $K$  es una constante llamada el factor de intensidad de esfuerzos y  $f(\theta)$  describe la distribución de esfuerzos alrededor de la punta de la grieta.

3.- La grieta crece, ocasionando la falla del miembro estructural y es predecida en términos del esfuerzo tensil actuando en la punta de la grieta. En otras palabras, la situación de esfuerzo en la punta de la grieta es caracterizado por el valor  $K$ .

### 2.2.11 Campo de esfuerzos en la vecindad de la punta de la grieta (materiales isotrópicos).

La mecánica de la fractura lineal elástica permite evaluar el estado de esfuerzos en la vecindad de grietas para geometrías simples. Para el caso bidimensional y el modo de desplazamiento I se presenta el siguiente estado de esfuerzos en la punta de la grieta:

$\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$ ,  $\sigma_{33} = 0$  (esfuerzo plano),  $\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})$  (deformación plana).

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{bmatrix} 1 - \frac{\theta}{2} \cdot \frac{\sin \frac{3\theta}{2}}{2} \\ 1 + \frac{\theta}{2} \cdot \frac{\sin \frac{3\theta}{2}}{2} \\ \frac{\theta}{2} \cdot \frac{\cos \frac{3\theta}{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Esta aportación de la MFLE se ha empleado tradicionalmente para estimar los efectos de grietas, vida útil de estructuras, entre otras aplicaciones. Nótese, sin embargo, que estos desarrollos derivados de modelos euclidianos, no dicen nada sobre la trayectoria de propagación.

## **2.3 Fractografía**

### **2.3.1 Definición**

El origen etimológico se deriva del latín *fractus* que significa fractura y del griego *grapho* que significa descripción. La fractografía es la interpretación de características observadas en superficies de fractura.

Las heterogeneidades microestructurales (límites de grano, precipitados de segunda fase, agrupación de dislocaciones) controlan la capacidad del material a resistir la iniciación o propagación de la grieta y pueden ser identificadas en la superficie de fractura como caminos fáciles para las grietas. Por esta razón la fractografía se empezó a utilizar como una herramienta útil para el entendimiento de mecanismos de fractura en materiales complejos, ya que provee una relación de dichas heterogeneidades microestructurales o la "topografía" con los mecanismos de fractura.

Mediante la fractografía se puede analizar cualitativamente las condiciones bajo las cuales se generan y propagan las grietas, realizando un examen microscópico de las superficies de fractura, este estudio se lleva a cabo utilizando microscopía electrónica de barrido (MEB) aprovechando su gran profundidad de campo.

### **2.3.2 Tipos de Fractura**

El análisis de la falla, además de requerir una combinación de conocimientos técnicos, observación meticulosa, labor detectivesca, sentido común y la historia del comportamiento (como el esfuerzo aplicado, el medio ambiente, la temperatura, la estructura y las propiedades) también se debe de tomar en cuenta la importancia de conocer los tipos de fractura ya que pueden revelar

también la causa de la falla. Para el presente trabajo se describirán dos tipos de fractura, la fractura frágil y dúctil, desde el punto de vista del comportamiento de los materiales son reconocidas dependiendo de la cantidad de deformación plástica previa.

### 2.3.2.1 Fractura Frágil

Es la fractura que ocurre cuando la deformación de la mayor parte del cuerpo es elástica, de manera que después de la fractura, los fragmentos de la pieza pueden volver a juntarse sin que haya cambios significativos en la geometría [37]. Esta puede ocurrir en los metales de alta resistencia o en los de baja ductilidad y tenacidad, se observan con frecuencia cuando la falla es causada por impacto en lugar de una sobrecarga. En algunas fracturas de aspecto frágil, ver figura 2.6, puede existir una intensa deformación plástica, solo que ésta se localiza en una región pequeña alrededor de la grieta y el resto del material permanece sin deformación plástica. La fractura frágil puede identificarse observando las características de la superficie de fractura ya que normalmente, es plana y perpendicular al esfuerzo aplicado en una prueba de tracción.

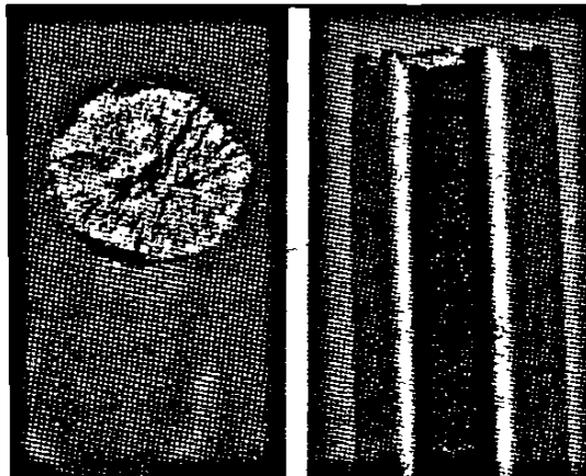


Figura 2.6 Espécimen que muestra una fractura frágil [38].

Tradicionalmente, la mayor atención se le ha dado a la fractura frágil por sus características de ser súbita, catastrófica y de ocurrir a esfuerzos por debajo de los esfuerzos de diseño.

### 2.3.2.2 Fractura dúctil

Es la fractura que ocurre después de una apreciable deformación plástica del cuerpo, entendiendo que los esfuerzos en una región relativamente grande de la pieza rebasaron el esfuerzo de cedencia o límite elástico. Esto puede ocurrir en forma transgranular (a través de los granos), ver figura 2.7, en los metales que tienen ductilidad y tenacidad satisfactorias. Se caracteriza porque ocurre bajo una intensa deformación plástica y una relativamente baja velocidad de propagación de grieta.

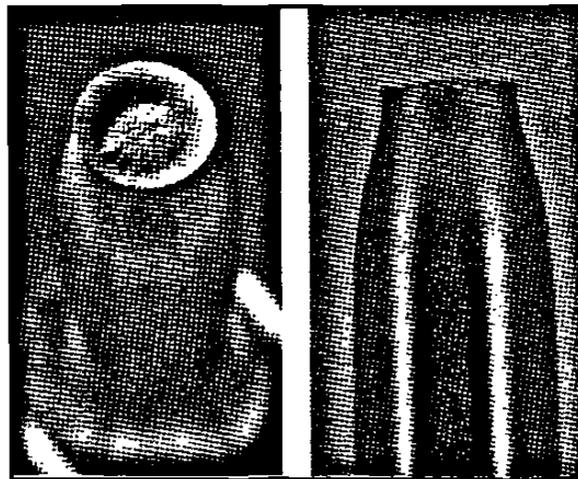


Figura 2.7 Espécimen que muestra una fractura dúctil del tipo copa y cono [38].

### 2.3.3 Mecanismos básicos de crecimiento de grieta

En general la clasificación de los mecanismos de crecimiento de grietas toma en cuenta la microestructura de los materiales, en el caso de los metales que son materiales granulares la grieta puede propagarse de manera intergranular a lo largo de los límites de grano o de manera intragranular, la fractura frágil también puede darse por clivaje a lo largo de planos cristalográficos [37]. En

otros materiales como los polímeros o el vidrio, la propagación es diferente y se genera una morfología típica de zonas de fractura, como una zona especular, zona difusa y zona fibrosa para el caso del vidrio [39,40,41].

### 2.3.3.1 Clivaje

El clivaje, ver figura 2.8, es el mecanismo de fractura frágil transgranular y ocurre a través del rompimiento de los cristales a lo largo de planos cristalográficos. Los arreglos característicos de una fractura por clivaje son de caras planas, que usualmente exhiben marcas de río. Estas son causadas por la grieta moviéndose a través del cristal a lo largo de un número de planos paralelos formando una serie de mesetas. La dirección de estos patrones de río representan la dirección de propagación de grietas. Las caras de clivaje a través de los granos tienen una alta reflectividad, lo cual da a la superficie de fractura una apariencia brillante.



Figura 2.8 Fractura por clivaje en un material recocido.

### 2.3.3.2 Cuasi-divaje

La fractura por cuasi-divaje, ver figura 2.9, se observa principalmente en fracturas realizadas a bajas temperaturas en aceros templados. En esta forma de fractura las caras no son verdaderos planos de divaje, exhiben a menudo huecos y colinas rasgadas alrededor de las caras (planos que no están muy bien definidos). Es un tipo de fractura que ocurre a una muy fina escala. No se observan marcas de río.

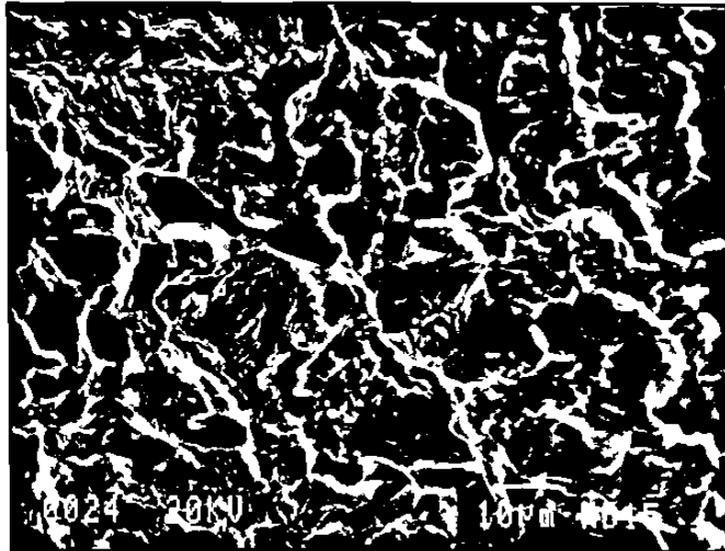


Figura 2.9 Cuasi divaje en un acero HY 80.

### 2.3.3.3 Coalescencia de microcavidades

La coalescencia de microcavidades o ruptura de huecos, ver figura 2.10, se caracteriza por depresiones como copa que pueden ser equiaxiales, parabólicas o elípticas dependiendo del estado de esfuerzos. Este tipo de superficie de fractura denota una fractura dúctil. Las microgrietas son iniciadas en partículas de segunda fase, los huecos crecen y eventualmente existen ligas entre las microgrietas de fractura.

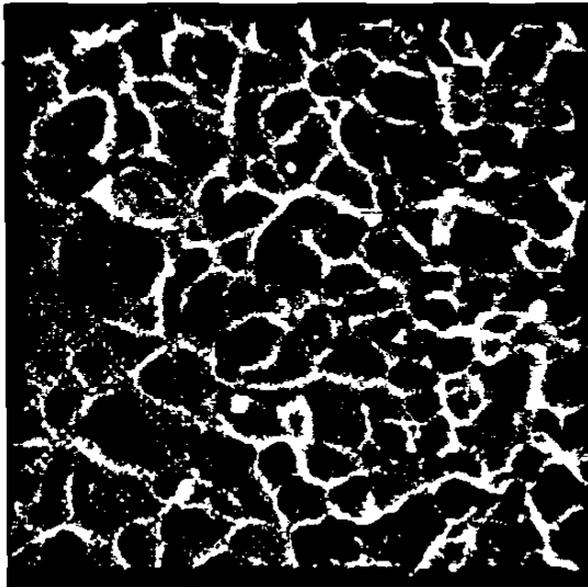


Figura 2.10 Coalescencia de microcavidades en una aleación de aluminio 2024 [31].

#### **2.3.3.4 Fractura intergranular**

Es un mecanismo de fractura de baja energía. La grieta avanza a través de los límites de granos, lo cual dá a la fractura una apariencia reflectiva y brillante en una escala macroscópica. En una escala microscópica, la grieta podría desplazarse alrededor de una partícula y crear algunas microcavidades localmente.

Este mecanismo tiende a ocurrir cuando los límites de granos son más frágiles que la red cristalográfica. En muchos casos, fracturas en temperaturas altas y termofluencia tienden a ser intergranulares, ver figura 2.11.

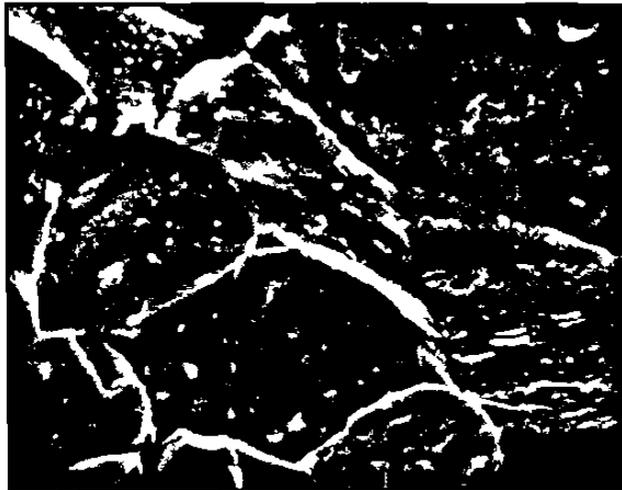


Figura 2.11 Fractura intergranular en un cojinete de bolas. La fractura muestra una ruptura dúctil del tipo copa y cono.

#### 2.4 Comentario

En la actualidad se sabe que los modelos existentes en la mecánica de la fractura moderna parten de un análisis bidimensional, sin embargo en la fractografía en general las observaciones se realizan en una superficie que se puede considerar en medio tridimensional y entonces no hay compatibilidad, de ahí la necesidad de cambiar y manejar la mecánica de fractura en medios quasibidimensionales reales como el papel, hojas de aluminio, láminas de acero, etc.

Ahora, los modelos manejados en la mecánica de fractura tradicional son completamente Euclidianos. Sin embargo las trayectorias que pueden ser intergranulares, transgranulares, clivaje, etc., en general son rugosas y poseen una geometría caprichosa que no tiene nada que ver con los modelos Euclidianos.

En investigaciones realizadas por Balankin, Susarrey y Bravo [4-9], Kertéz, Horvát y Weber [23], Provas y Nissila [24] y Tolvanen, Alava y Salimen [42], ya empiezan a tomar en cuenta lo anteriormente dicho. En el siguiente capítulo se discutirá de forma breve cada uno de sus trabajos.

## Capítulo 3

# Geometría fractal y estado del arte

### 3.1 Introducción

Las herramientas de la geometría fractal introducida por Mandelbrot [3] son, hoy en día, elementos insustituibles en el trabajo de muchos físicos, químicos, biólogos, fisiólogos, economistas, etc., pues les han permitido reformular viejos problemas en términos novedosos y tratar problemas complejos de forma muy simplificada [3].

A diferencia de la geometría euclidiana, en donde los elementos básicos pueden generarse de manera directa (líneas, círculos, planos, etc.) en la geometría fractal las formas primarias son un conjunto de procedimientos matemáticos (algoritmos) que se encargan de rotar, trasladar, reescalar o deformar figuras de una manera particular.

Una aplicación importante de esta nueva geometría en la ciencia e ingeniería de materiales se encuentra en la caracterización fractal de superficies de fractura. Aunque también se puede aplicar al movimiento de las finanzas, terremotos y volcanes, análisis de señales, medición de fronteras y costas, simulación o "síntesis" de objetos similares o afines a los naturales y análisis de fenómenos considerados como caóticos.

## 3.2 Fractales autosimilares y autoafines

Se denomina fractales (que proviene del latín *fractus* que significa *irregular*) al conjunto de formas que, generadas normalmente por un proceso de repetición, se caracterizan por poseer detalle a toda escala, por tener longitud infinita, por no ser diferenciables y por exhibir dimensión fraccional o fractal.

Este concepto fue introducido por Benoit Mandelbrot [3] quien propuso el concepto como una aproximación a problemas de escala en el mundo real y ya hace más de una década que inundaron al mundo científico con un conjunto de nuevas reglas para enfrentarse con el reto de conocer y describir la naturaleza.

Los fractales tienen características peculiares, imaginar curvas de longitud infinita que no se extienden en todo el espacio, o concebir un objeto con dimensión fraccional, es el tipo de cosas que debemos estar dispuestos a enfrentar, ya que la naturaleza es así.

### 3.2.1 Fractales autosimilares

De acuerdo a Mandelbrot [3], un fractal es un objeto cuya forma es independiente de la escala. Esta propiedad es referida como *autosimilitud* la cual implica que cualquier porción del objeto, si la ampliamos en escala, tendría una apariencia idéntica al objeto.

La transformación de similitud transforma puntos  $x = (x_1, \dots, x_E)$  en un espacio  $E$ -dimensional en nuevos puntos  $X' = (rX_1, \dots, rX_E)$  con el mismo valor de la razón de escalamiento  $r$ .

Estos fractales tienen la característica inherente de un mismo cambio de escala o escalamiento en todas las direcciones euclidianas (podemos decir que son objetos geométricos isotrópicos). En la figura 3.1 se muestra el triángulo de Sierpinski [43] que es un ejemplo de un fractal autosimilar.

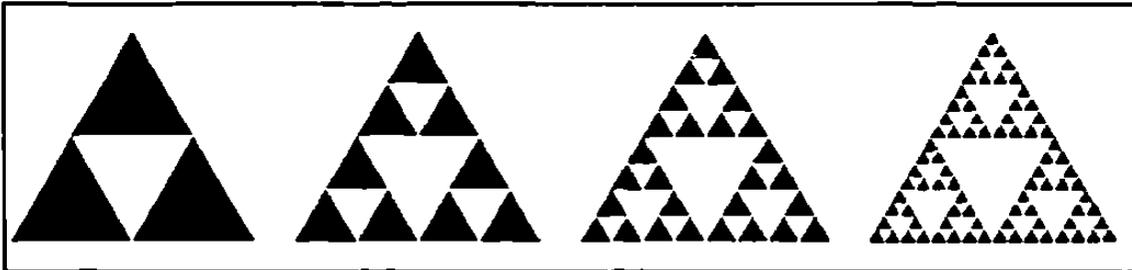


Figura 3.1 Triángulo de Sierpinski [43] el cual tiene una dimensión fraccional con un valor de 1.584.

El triángulo de Sierpinski es el resultado de seccionar a toda escala un triángulo equilátero en cuatro particiones similares cuyos lados son de tamaño igual a la mitad de los de la figura original ( $L/l=2$ ). Una vez hecho esto se extrae la sección central, de forma que queden las tres partes triangulares en los vértices ( $N=3$ ), y sobre estas se actúa de la misma manera, el proceso se repite en cada una de las partes restantes y así se procede *ad infinitum*, el resultado es similar al que aparece en la figura 3.1, aunque no hay pluma que permita dibujar la estructura a detalle.

La dimensión de Hausdorff o dimensión fractal ( $d_f$ ) [44] de la figura, la cual se define en la siguiente sección, se obtiene considerando que cada vez que la longitud del triángulo se reduce a la mitad, aparecen tres triángulos más, por lo tanto  $d_f$  viene dado por la siguiente ecuación:

$$d_f = \log(N) / \log(L/l) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

$N$ =es el número de particiones que se generan

$l$ =es cuantas veces cabe una parte de la longitud en la total

$L$ =longitud total

Por lo tanto tenemos que para el triángulo de Sierpinski :

$$d_f = \log(3) / \log(2)$$

$$d_f = 1.584$$

### 3.2.2 La dimensión fraccional o de Hausdorff-Besicovitch

La dimensión fraccional o de Hausdorff-Besicovitch [44] es una medida de la complejidad y rugosidad del objeto y da una idea de su extensión real y en que grado llena el espacio que lo contiene.

Una curva puede ser medida contando el número  $N(\delta)$  de segmentos de línea de longitud  $\delta$  necesarios para cubrir la línea, ver figura 3.2. Para una curva ordinaria tenemos  $N(\delta) = L_0/\delta$ . La longitud de la curva se ilustra de la siguiente manera:

Para una curva

$$L = N(\delta)\delta \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} L_0 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

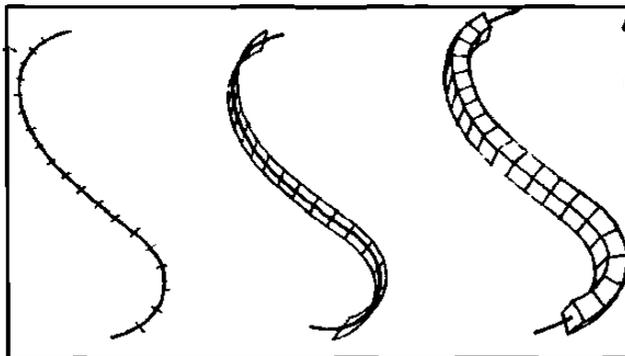


Figura 3.2 Medición del tamaño de conjuntos: longitud, área y volumen.

En el límite, la medida llega a ser asintóticamente igual a la longitud de la curva y es independiente de  $\delta$ .

Para una superficie 
$$A = N(\delta)\delta^2 \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} L_0\delta^1 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Para un volumen 
$$V = N(\delta)\delta^3 \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} L_0\delta^2 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Considerando un juego de puntos que define una superficie como se muestra en la figura 3.3.

$$A = N(\delta)\delta^2 \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} A_0\delta^0 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

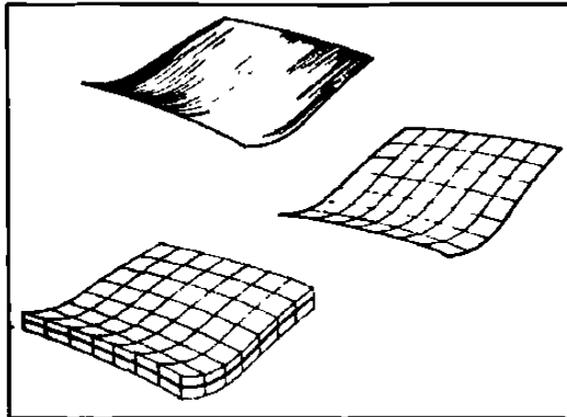


Figura 3.3 Medición del tamaño de una superficie

El número de cuadrados necesarios a cubrir una superficie es  $N(\delta) = A_0/\delta^2$  en el límite de  $\delta \rightarrow 0$ , donde  $A_0$  es el área de la superficie.

Cuando asociamos un volumen para cubrir la superficie, la suma de los volúmenes de los cubos necesarios a cubrir la superficie es:

$$V = N(\delta)\delta^3 \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} A_0\delta^1 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

El volumen desaparece cuando  $\delta$  tiende a cero.

Cuando asociamos una longitud

$$L = N(\delta)\delta \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} A_0\delta^{-1} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

El número de líneas necesarias para cubrir la superficie tiende al infinito.

Generalizando las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4 tenemos la siguiente ecuación:

$$M_d = \sum [\gamma_d] \delta^d = N(\delta) [\gamma_d] \delta^d \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde  $M_d$  es la medida en dimensión  $d$  y  $\gamma_d$  es un factor geométrico asociado a la unidad de medida  $\delta$  usada.

Como se observó en las ecuaciones 3.6 y 3.7, si escogemos un valor de  $d$  menor a la dimensión del objeto  $D$ , la medida resultante es igual a infinito y si es mayor entonces  $M_d$  resulta cero.

$$M_d = N(\delta) [\gamma_d] \delta^d \rightarrow \infty \quad \text{cuando } d < D \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$M_d = N(\delta) [\gamma_d] \delta^d \rightarrow 0 \quad \text{cuando } d > D \quad (\text{Ec. 3.10})$$

La dimensión de Hausdorff–Besicovitch [44] es el valor de  $d$  en el punto en que  $M_d$  pasa de cero a infinito, ( $D=d$ ), véase figura 3.4.

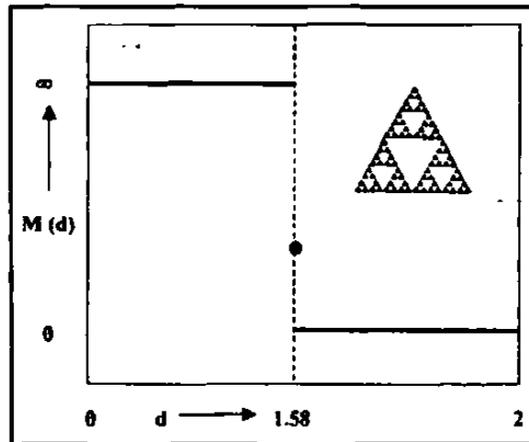


Figura 3.4 Gráfica de la función  $M_d$  (Ec.3.8), mostrando el valor de la dimensión fractal (triángulo de Sierpinski [43]) cuando  $M_d$  pasa de 0 a infinito.

### 3.2.3 Fractales autoafines

Muchos objetos en la naturaleza no son autosimilares, sin que las características de escalamiento se dan en una sola dirección, entonces tenemos los objetos autoafines.

El escalamiento apropiado para mantener invariable el aspecto es diferente en al menos una de las direcciones (objetos anisotrópicos), es lo que se define como autoafinidad.

Las superficies de fractura al ser consideradas como objetos autoafines son descritas a través de la siguiente ley de transformación:

$$(x, y, z) \rightarrow (bx, by, b^c z) \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

$z$  es la altura de la superficie a través del plano  $x, y$ .

$\zeta$  es el exponente de Hurst o de rugosidad [44].

$b$  es cualquier número real.

La ecuación anterior implica que la altura típica  $h(r)$  en un punto  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$  se determina por:

$$h(r) = \left\langle (z(x+r) - z(x))^2 \right\rangle_x^{\frac{1}{2}} \approx r^\zeta \quad (\text{Ec. 3.12})$$

En donde el exponente de rugosidad se encuentra entre valores de 0 y 1 y está relacionado a la dimensión fractal de acuerdo a la relación:  $D = 3 - \zeta$ .

### 3.3 Métodos para la determinación de la dimensión fractal o el exponente de Hurst.

#### 3.3.1 Introducción

La caracterización de las superficies de fractura comprende conceptos de geometría fractal, particularmente la determinación del exponente autoafín ( $\zeta$ ) de perfiles extraídos de la superficie de la muestra.

Los métodos para la determinación de la dimensión fractal ( $d_F$ ) o el exponente de Hurst [44] se dividen en los métodos aplicables principalmente a objetos autosimilares, los cuales son: el de conteo de cajas, método del compás y método de área-perímetro y los aplicables a objetos autosimilares y autoafines los cuales son: el de ancho de banda variable, probabilidad de retorno y espectro de potencias (transformadas de Fourier y de ondeletas).

Para la presente investigación se explicará el método de ancho de banda variable y el de conteo de cajas ya que son los más comúnmente utilizados [45].

### 3.3.2 Método de conteo de cajas

El método de conteo de cajas consiste en cubrir el perfil con rectángulos de tamaño  $r \times \mu r$ , donde la relación de aspecto  $\mu$  es constante y  $r$  es el tamaño del rectángulo y puede variar.

$B(r)$  es el número de rectángulos necesarios para cubrir el perfil, y esta cantidad puede ser estimada para diferentes valores de  $r$ , obteniendo el exponente de rugosidad o la dimensión fractal de la pendiente de una gráfica logarítmica de  $B(r)$  contra  $r$  según la siguiente ecuación:

$$B(r) \cong \left( \frac{A}{\mu L} \right) r^{(\zeta-2)} \quad \text{para} \quad r < \left( \frac{A}{\mu} \right)^{\frac{1}{(1-\zeta)}} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde  $A$  y  $L$  son la amplitud y la longitud del perfil, respectivamente. El símbolo  $\cong$  denota una validez estadística para esta ecuación. Para garantizar el cumplimiento de la condición expresada en la ecuación (Ec. 3.13), la relación de aspecto de los rectángulos se mantuvo constante al valor  $\mu=A/L$ .

### 3.3.3 Método de ancho de banda variable

Un perfil de longitud  $L$  se divide en ventanas o bandas de ancho  $r$  colocándolas al inicio del perfil  $i = 1$ . La diferencia entre las alturas máximas y mínimas  $\Delta Z(i)$  son determinadas para cada banda así como la desviación estándar de la altura  $\sigma(i)$ , promediando estas dos cantidades en cada una de las bandas. Enseguida se mueve la banda a intervalos regulares  $\Delta r$  a lo largo de todo el perfil determinado, siguiendo las ecuaciones 3.14 y 3.15, donde  $N_d$  representa el número de ventanas, el procedimiento descrito es ejemplificado en la figura 3.5.

$$Z(r) = \left( \frac{1}{Nd} \right) \sum_{i=1}^{Nd} \Delta Z(i) \quad (\text{Ec. 3.14})$$

$$W(r) = \left( \frac{1}{Nd} \right) \sum_{i=1}^{Nd} \sigma(i) \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Finalmente el exponente de rugosidad es obtenido de la gráfica logarítmica de  $Z(r)$  contra  $r$  o  $W(r)$  contra  $r$ , ver figura 3.6, según la siguiente ecuación:

$$Z(r) \propto r^{\zeta} \quad \text{o} \quad W(r) \propto r^{\zeta} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Esta ley de potencia se cumple hasta un valor límite,  $\xi$ , llamado longitud de correlación. Para tamaños de ventana mayores que  $\xi$ , el perfil puede considerarse un objeto euclidiano.

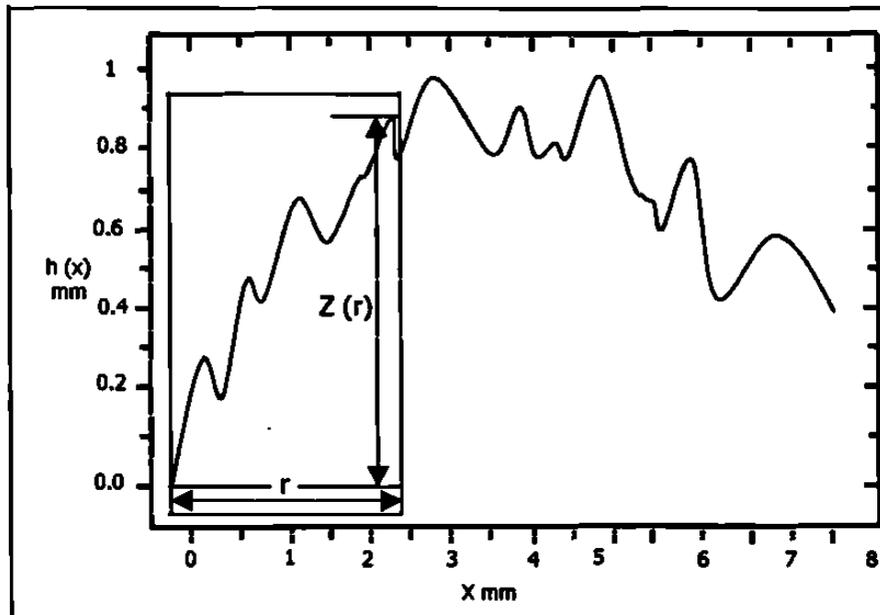


Figura 3.5 Gráfico representativo del método de banda de ancho variable

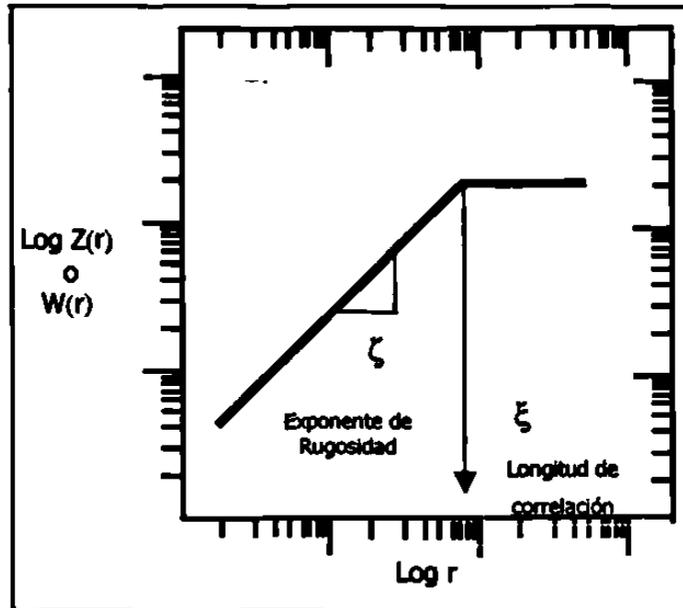


Figura 3.6 Curva de autoafinidad ideal ilustrando los parámetros autoafines  $\zeta$  y  $\xi$ .

### 3.4 Estado del arte

#### 3.4.1 Antecedentes

Mandelbrot, Passoja y Paullay [10] en 1984, caracterizaron la autoafinidad de las superficies de fractura en acero y correlacionó la dimensión fractal, con las propiedades mecánicas macroscópicas (tenacidad a la fractura,  $K_{IC}$ , del material).

Este experimento se llevó a cabo utilizando 6 aceros maraging a los cuales se les proporcionó diferente tratamiento térmico, eso les confería diferentes energías de fractura medidas mediante pruebas Charpy.

Este experimento consistió en analizar las superficies de fractura de las pruebas a las cuales se les efectuaron un recubrimiento de níquel que era cortado y pulido para contener un plano  $z$  constante. Las islas de acero rodeadas de níquel fueron analizadas midiendo su área y perímetro.

Estas islas representan objetos bidimensionales, en la que sus contornos son las intersecciones de la superficie de fractura con un plano constante  $z$  ellas tienen una dimensión  $d_F - 1$  si la superficie es autoafín de dimensión  $d_F$ , de esta manera:

$$A \propto l^2 \quad (\text{Ec. 3.17})$$

$$P \propto l^{(d_F - 1)} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Donde  $l$  es el tamaño lineal de las islas consideradas por lo tanto:

$$A \propto P^{2/(d_F - 1)} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Al graficar  $A$  contra  $P$  en una gráfica logarítmica se muestran dos regímenes, en escalas más pequeñas que la longitud de correlación se muestra una pendiente  $2/(2-d)$  y una pendiente dos arriba del valor de la longitud de correlación.

Los valores medidos del exponente de rugosidad estaban entre el rango de 0.7 a 0.85. La conclusión de los investigadores fue que conforme la energía de la fractura disminuía, el valor de la dimensión fractal aumentaba, con lo que la superficie de fractura era más rugosa.

Bouchaud [11] en 1990 realizó las mismas mediciones en una aleación comercial de aluminio 7475 usando un procedimiento experimental diferente, cuatro muestras fueron estudiadas con diferentes tratamientos térmicos el cual hace que se tenga diferente tenacidad a la fractura en cada una de las muestras y ésta fué medida en ensayos de tensión compacta preagrietadas primero en fatiga. La superficie fue recubierta con níquel se obtuvieron cortes en un plano  $z$  constante y se observaron en el MEB a diferentes magnificaciones con electrones retrodispersados los cuales proporcionaron un buen contraste entre el aluminio y el níquel.

Las imágenes fueron binarizadas y se calculó la función de autocorrelación  $C(r)$  para cada micrografía, esta exhibía una ley de potencia decreciente que se extendía hasta un tamaño  $A$  comparable al tamaño de la micrografía, las curvas relativas a la misma muestra fueron puestas en un mismo diagrama graficando  $C(r)$  contra  $r/A$ . En esas unidades reducidas, el dominio de escalas se extendía de  $0.5\mu\text{m} < r < 0.5\text{mm}$ . El exponente fue medido en cada caso y no hubo variación sistemática de  $\zeta$  con  $K_{Ic}$ , encontrando un valor de  $\zeta = 0.80 \pm 0.05$ . Bouchaud [11] concluyó que este exponente podría ser universal independiente del material, modo de fractura y de la tenacidad.

Maloy [13] en 1992 al utilizar seis diferentes materiales frágiles (plástico, baquelita, porcelana, grafito, acero y Al-Si), y utilizando métodos de análisis estadísticos como el de probabilidad de retorno y el espectro de potencias, reforzaron la teoría de la posible universalidad del exponente encontrando un valor de  $0.87 \pm 0.07$ .

Milman [14,15] en 1993 utilizó en sus experimentos realizados en superficies fracturadas de tungsteno y grafito la microscopía de barrido por tunelamiento, cuestionaron la probable universalidad ya que ellos reportaron valores entre 0.4 y 0.6.

En base a esos resultados Bouchaud estableció la existencia de dos regímenes uno que presenta un valor del exponente de rugosidad de 0.5 para bajas velocidades de propagación o escalas de longitud pequeñas y otro que presenta un valor del exponente de rugosidad de 0.8 para altas velocidades de propagación o en escalas de longitud grandes.

Daguier [16] en 1996 analizó superficies de fractura en una aleación  $Ti_3Al$ , mostró la aparición de dos regímenes, reportando el valor de 0.5 en un rango de escala de 1nm hasta  $1\mu m$  y el régimen de 0.8 lo mostró arriba de  $1\mu m$  hasta 1mm.

Bouchaud [12] en 1997 propone una relación entre el factor de intensidad de esfuerzos y los parámetros autoafines.

Hinojosa [17] en 1999 estudió superficies de fractura en una superaleación base níquel (N18) empleando MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) y MFA (Microscopía de Fuerza Atómica), obteniendo un valor del exponente de rugosidad de 0.8 y una longitud de correlación del orden del tamaño de grano, cabe señalar que su análisis consistió en seis décadas de escala de longitud.

E. Reyes [18,19] en 1999 reporta un exponente de rugosidad de 0.8 en materiales plásticos el utilizó MFA (Microscopía de Fuerza Atómica).

J. Aldaco [20,21] en el 2000 realiza el primer estudio de rugosidad a larga distancia cubriendo siete escalas de longitud, Aldaco analizó una aleación dendrítica comercial de Al-Si de uso automotriz (A319) rica en heterogeneidades microestructurales, empleando técnicas experimentales tales como: perfilometría, MEB, MFA y análisis de imágenes [21], Aldaco reportó una longitud de correlación del orden de magnitud del brazo primario de las dendritas.

X. Guerrero [22] en el 2000 realizó un análisis de autoafinidad bidimensional en el perfil de fractura en hojas de aluminio, reportando un exponente de rugosidad de 0.6.

Respecto a trabajos realizados en papel tenemos que:

Kertész, Horváth y Weber [23] en 1993, realizando experimentos usando una máquina de tensión y un digitalizador de documentos convencional, estudiaron la morfología de las líneas de ruptura en cinco tipos de hojas papel, resultando los patrones casi unidimensionales mostrando correlaciones de escalamiento sobre dos órdenes de magnitud, los valores medidos del exponente de rugosidad estuvieron en el rango de  $0.63 < \zeta < 0.72$  y discutieron la relevancia de los modelos bidimensionales en la interpretación de los resultados.

Provatás, Alava y Nissila [24] en 1996 presentaron un análisis de correlación de densidad de masa de área en papel, por medio de radiografía  $\beta$  midieron la densidad de masa local de hojas de papel elaboradas en un laboratorio, resultando que el espacio real de la función de autocorrelación de densidad calculada de los datos revela un tipo de ley de potencia no trivial de correlación con la caída del exponente independiente del peso base de las hojas. Concluyeron también que para bajas densidades las correlaciones pueden extenderse en al menos un orden de magnitud mas allá de la longitud de las fibras y para papeles pesados esto desaparecía rápidamente.

Balankin, Susarrey y Bravo [4] en 1997, debido a que en trabajos anteriores se había mencionado que no existía correlación entre las propiedades mecánicas y el exponente de rugosidad por lo tanto parecía razonable suponer que la microestructura del material debería afectar tanto a la morfología como a los patrones de escalamiento de grieta, ellos verificaron esta suposición, realizando experimentos en diecinueve tipos de hojas de papel, utilizando una máquina de tensión y un escáner de documentos convencional, de las curvas de esfuerzo – deformación de especímenes estándar encontraron las propiedades mecánicas, investigaron el efecto de la anisotropía, los valores del exponente de Hurst que encontraron estuvieron en el rango de  $0.5 < \zeta < 0.8$ , verificaron que

definitivamente no existía correlación entre las propiedades mecánicas y el exponente de Hurst, también encontraron que aunque el papel cuente con anisotropía mecánica y estructural las propiedades de escalamiento de las líneas de ruptura son independientes de la orientación de la grietas, además las propiedades de escalamiento de una línea de ruptura y de un juego de líneas están gobernadas por el mismo exponente de Hurst.

Balankin, Susarrey [6] en 1999 estudiaron el efecto de rugosidad autoafín en propagación de grietas en materiales frágiles, realizando un conjunto de experimentos con hojas de papel Xerox fragilizado, como un modelo de material perfectamente frágil. Los resultados de las pruebas mecánicas estandarizadas y mediciones fractales las compararon con predicciones de mecánica de la fractura lineal elástica (MFLE) y mecánica de las grietas autoafines en un material elástico. Encontraron que este último concuerda cuantitativamente con experimentos, los cuales difieren drásticamente con las predicciones del MFLE. Por lo tanto, propusieron la necesidad de revisar normas ASTM con mediciones de la tenacidad de la fractura y sugirieron un nuevo concepto de tenacidad a la fractura fractal.

Balankin, Hernández, Urriolagoitia, Susarrey, González y Martínez [7] en 1999 analizaron la mecánica de la grieta, la cual fue estudiada por especímenes de hojas de papel rectangulares con una simple muesca en uno de sus lados, por una aproximación que combina el concepto de trayectoria-virtual de la grieta en conjunto con el formalismo de la mecánica de la grieta autoafín. La iniciación de la grieta fue realizada, con la ayuda de una máquina de tensión, a tres tipos de papeles comerciales. En el trabajo que realizaron las distribuciones de probabilidad de la rugosidad de la grieta y los parámetros de resistencia se establecieron. Propusieron un modelo probabilístico de propagación de grieta autoafín en papel.

Balankin, Susarrey y Bravo [5] en 2001 estudiaron la falla de papel sanitario bajo carga de tensión uniaxial en la dirección máquina, mediante la curva esfuerzo deformación obtuvieron las propiedades mecánicas de cada una de las probetas y concluyeron que éstas varían de muestra en muestra debido a que se presenta un daño progresivo, este es debido a la estructura del papel (variaciones y fluctuaciones en la densidad de masa local) ya que durante el proceso de la prueba se van creando microgrietas que mediante un proceso de coalescencia ocurre la falla y se obtiene la línea de ruptura final. Las propiedades de escalamiento de las líneas de rupturas y las curvas esfuerzo-deformación fueron estudiadas digitalizándolas con la ayuda de un escáner, dejándolas en formato BMP, blanco y negro con resolución de 600dpi y por medio del software BENOIT 1.2 determinaron el exponente de Hurst, este cuenta con 5 métodos: variograma, longitud rugosa (*roughness-length*), ondeletas, espectro de potencia y análisis de rango reescalado (*rescaled-range analysis*). Al obtener los análisis por los métodos antes mencionados concluyen que las curvas esfuerzo-deformación poseen una invarianza de escalamiento autoafín, que la rugosidad de las curvas esfuerzo-deformación y de las líneas de ruptura son caracterizadas por el mismo exponente de Hurst y además este varía de muestra en muestra debido a las fluctuaciones en la estructura del papel, finalmente explican las observaciones experimentales por medio de modelo fractal del daño (*fractal damage model*).

Salminen, Tolvanen y Alava [42] en 2003 estudiaron la emisión acústica de la fractura del papel, realizando la fractura por medio de pruebas de tensión en hojas de papel, concluyeron que la energía de emisión acústica y el tiempo de espera entre los eventos acústicos siguen una distribución de una ley de potencia y que se cumple mientras la razón de deformación es variada por más de dos ordenes de magnitud. Los resultados que obtuvieron de los exponentes de la energía estadística fueron  $\beta \sim 1.25 \pm 0.10$  y el de tiempo de espera  $\tau \sim 1.0$

$\pm 0.10$  y notaron en particular, que para la energía era independiente de la razón de deformación.

Concluyeron también que esos resultados no contrastaban bien con los modelos de fractura para medios desordenados y que una razón podría ser los esfuerzos residuales rechazados en muchas teorías.

### 3.4.2 Modelo de Líneas

Este modelo es una de las teorías desarrolladas más aceptadas, que tratan de explicar el comportamiento presentado por la naturaleza, tal es el caso de la propagación de grietas en las superficies de fractura.

Una formulación que en la última década se ha utilizado para describir la propagación del frente de grieta en materiales heterogéneos consiste en imaginar el frente de fractura como una línea moviéndose a través de un material que contiene obstáculos microestructurales aleatoriamente distribuidos.

Este frente va a separar el espécimen en dos piezas. La morfología de la línea en cada tiempo  $t$  determina la morfología de la superficie de fractura final.

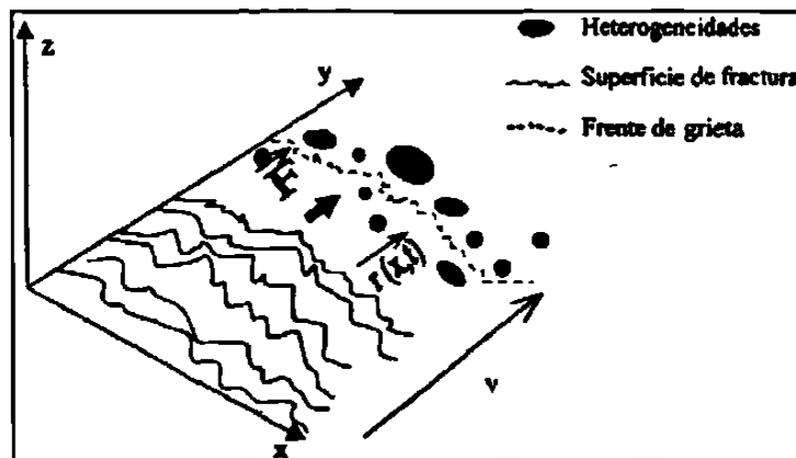


Figura 3.7 Representación de una línea moviéndose a lo largo del eje y, dentro de un medio heterogéneo dejando detrás una superficie rugosa.

El movimiento del frente de grieta se describe por una ecuación (Ec. 3.20) local no lineal de tipo Langevin [20,44,46], aplicada primero por Ertas y Kardar [47-49] en un contexto muy diferente.

$$\rho \delta r / \delta t = \delta x^2 r + f\{x, r(x, t)\} + F \quad (\text{Ec. 3.20})$$

Donde  $\rho$  es el inverso de la movilidad,  $f(x, r)$  es una fuerza aleatoria debida a las impurezas del medio heterogéneo y  $F$  es una fuerza uniforme aplicada.

Los términos no lineales toman en cuenta las variaciones de la velocidad de la grieta local con la orientación local del frente. Esta ecuación prevee un gran número de regímenes, dependiente de los valores relativos de las constantes de los términos no lineales. Aunque este modelo sufre de algunas carencias sugiere la existencia de dos regímenes de fractura.

Para velocidades tendientes a cero, la línea es capaz de liberarse de los obstáculos microestructurales. Esto se conoce como la transición de desanclaje en el problema de la línea atrapada.

En este caso, el índice de rugosidad  $\zeta_{\perp}$  perpendicular a la dirección de propagación de la grieta es igual a 0.5. Para una velocidad dada, hay una transición en alguna escala de longitud  $\xi_{QS}$  de la conducta cuasi estática a la conducta dinámica. Para escalas de longitud pequeñas ( $r < \xi_{QS}$ ), el índice de rugosidad es igual a 0.5, mientras que para escalas grandes de longitud, cuando  $r > \xi_{QS}$ ,  $\zeta$  es igual a 0.75. La longitud de cruce  $\xi_{QS}$  decrece rápidamente con la velocidad de grieta, tendiendo a infinito cuando la velocidad de la grieta tiende a cero.

Debido a que la velocidad aumenta con el aumento del factor de intensidad de esfuerzos, se espera, dentro del marco de este modelo, que la longitud de cruce decrezca cuando incrementa  $K_I$ .

Otros modelos son establecidos por Roux y François [50] para la fractura de materiales plásticos en los que la superficie de fractura son superficies de mínima energía y el exponente de rugosidad presenta un valor entre 0.4 y 0.5.

Vashista y Nakano [51] proveen interesantes simulaciones dinámicas moleculares con la existencia de dos regímenes con una longitud de cruce que decrece al aumentar las velocidades de grieta.

### 3.4.3 Modelos de fusibles aleatorios

Daguiet en su tesis doctoral, menciona que dentro de los principales modelos bidimensionales para el análisis de propagación de grietas en materiales con microestructura heterogénea está el modelo de fusibles aleatorios [52].

Con este tipo de modelo se puede dar una aproximación bastante cercana a lo que ocurre a lo largo del frente de grieta, ya que simula la estructura del material como una matriz, en donde de forma análoga, las uniones están representadas por enlaces parecidos a los de un circuito en serie, ver figura 3.8. La ruptura o fractura se presenta como resultado por los miles de desórdenes que presenta la matriz.

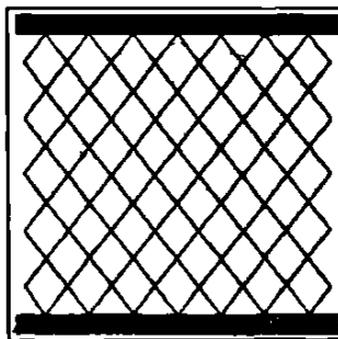


Figura 3.8 Modelo de fusibles aleatorios en 2D

También con este tipo de estudio se pueden observar propiedades interesantes como es el caso de la universalidad de la multifractalidad [52].

Las líneas que unen la matriz representan la intensidad de corriente  $i$ , que alcanzan un valor crítico  $i_c$ , cuando están ordenadas en forma transversal, de tal modo que se toma a  $i_c$  como una variable aleatoria. Inicialmente cada fusible transporta la misma corriente. Durante los procesos de iteración en donde se analiza la fractura macroscópicamente, nos dice Hansen [53] que la morfología de la línea de fractura proveniente de diferentes tipos de desorden tiene un exponente de Hurst en dos dimensiones  $\zeta_{2D}=0.7\pm 0.07$ . Este exponente se aproxima bastante al obtenido en una superficie en 2D por el método de mínima energía, que es igual a  $2/3$ .

Como observamos la geometría de fractales es de gran importancia debido a que es una poderosa herramienta para analizar las superficies de fractura tal como se vió en las investigaciones mencionadas anteriormente.

Sin embargo, los desarrollos recientes en el campo de los fenómenos de escalamiento y de modelación multiescalar plantean interrogantes y cuestionamientos como los siguientes: no existen modelos que expliquen o predigan con fidelidad el carácter autoafín ni los valores de los parámetros autoafines de las superficies de fractura.

La presente investigación pretende aportar nuevos conocimientos, particularmente en el caso de propagación de grietas bidimensional, considerando el efecto de la estructura del papel.

## Capítulo 4

### El papel

#### 4.1 Introducción

La palabra "papel" es un término que utilizamos día a día y de manera inconsciente muchas veces, pero si realmente pensamos qué es lo que hay detrás de esta simple palabra, seguramente entraríamos a un mundo desconocido e interesante que es el que a continuación se presenta.

El papel puede elaborarse a partir de diferentes fuentes vegetales. La viabilidad de un vegetal para considerarse como materia prima, depende de la forma de las fibras, siendo las estructuras "tubulares" y de "pluma" las idóneas para la elaboración de la celulosa que posteriormente dará lugar a lo que conocemos como papel. Tres factores importantes son: su abundancia, costo de obtención y la factibilidad de su conversión a pulpa.

## 4.2 Historia del papel

Según la tradición, el primero en fabricar papel, en el año 105, fue Cai Lun (o Tsai-Lun), un eunuco de la corte Han oriental del emperador chino Hedi (o Ho Ti). El material empleado fue probablemente corteza de morera y el papel se fabricó con un molde de tiras de bambú. El papel más antiguo conservado se fabricó con trapos alrededor del año 150. Durante unos 500 años, el arte de la fabricación de papel estuvo limitado a China; en el año 610 se introdujo en Japón y alrededor del 750 en Asia central. El papel apareció en Egipto alrededor del 800, pero no se fabricó allí hasta el 900 [54].

El empleo del papel fue introducido en Europa por los árabes y la primera fábrica de papel se estableció en España alrededor de 1150. A lo largo de los siglos siguientes, la técnica se extendió a la mayoría de los países europeos. La introducción de la imprenta de tipos móviles a mediados del siglo XV abarató enormemente la impresión de libros y supuso un gran estímulo para la fabricación de papel [54].

El aumento del uso del papel en los siglos XVII y XVIII llevó a una escasez de trapos, la única materia prima satisfactoria que conocían los papeleros europeos. Hubo numerosos intentos de introducir sustitutos, pero ninguno de ellos resultó satisfactorio comercialmente. Al mismo tiempo se trató de reducir el costo del papel mediante el desarrollo de una máquina que reemplazara el proceso de moldeado a mano en la fabricación del papel.

La primera máquina efectiva fue construida en 1798 por el inventor francés Nicholas Louis Robert. La máquina de Robert fue mejorada por dos papeleros británicos, los hermanos Henry y Sealy Fourdrinier, que en 1803 produjeron la primera de las máquinas que llevan su nombre [54].

El problema de la fabricación de papel a partir de una materia prima barata se resolvió con la introducción del proceso de trituración de madera para fabricar pulpa, alrededor de 1840, y del primer proceso químico para producir pulpa, unos 10 años después [54].

Estados Unidos y Canadá son los mayores productores mundiales de papel, pulpa y productos papeleros. Finlandia, Japón, la antigua Unión Soviética y Suecia también producen cantidades significativas de pulpa de madera y papel prensa [55].

### 4.3 Materias Primas

La celulosa es un polímero complejo compuesto de: Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, con la fórmula empírica:  $C_6H_{10}O_5$ , en la figura 4.1 se ilustra la morfología de fibras de celulosa así como su fórmula estructural.



Figura 4.1 Fibras de celulosa y fórmula estructural.

Las características que la hacen una materia prima óptima para elaborar papel son: su abundancia, reciclabilidad, manejo y, sobre todo, su alta resistencia a la tensión, que dada la forma de sus fibras y su gran afinidad al agua, son factores que hacen posible la elaboración de una red resistente de fibras conocidas como papel, ver figura 4.2.

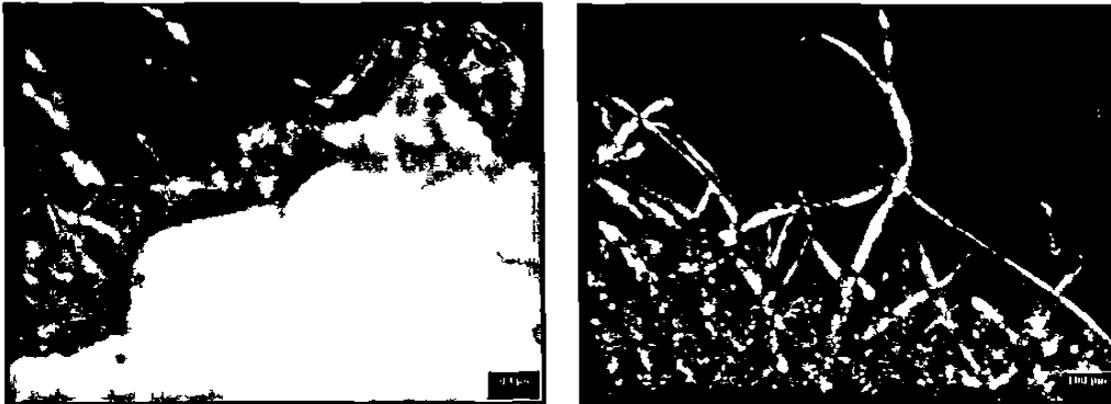


Figura 4.2 Imágenes de microscopía óptica ilustrando la red de fibras en dos diferentes tipos de papel.

Mientras que las fibras de celulosa pueden ser modificadas mecánica y químicamente en presencia del agua, también pueden resentir cambios o degradaciones por muchos compuestos químicos, lo que hace posible que dichas fibras puedan ser extraídas de los vegetales y tratadas para la manufactura de papeles.

Dentro de los principales procesos de obtención de pulpas o celulosas tenemos el Kraft (o Sulfato) y al Sulfito (ambas son procesos químicos), el de "pasta mecánica" y el de pasta químico-termomecánica siendo este último una combinación de los procesos antes mencionados [55].

Los árboles son la principal fuente de fibras naturales de donde se obtiene más del 90% de la producción de celulosa a nivel mundial; el restante 10% de las fibras son aportadas por otras plantas tales como pastos, bambúes, bagazos, algodones, linos, cáñamos y otros [55].

Industrialmente la celulosa se obtiene a partir de la separación de las fibras naturales, las que se mantienen unidas en la estructura de las plantas por un material conocido como la lignina. Estas fibras pueden ser separadas mecánicamente o mediante un proceso químico de disolución de la lignina para recuperar las fibras [56].

Dependiendo del proceso de producción, las celulosas se clasifican en los siguientes tipos:

- **Celulosa química:** se obtiene a partir de un proceso de cocción química de la madera a altas temperaturas y presiones, cuyo objetivo es disolver la lignina contenida en la madera con una solución alcalina, liberando las fibras. Dependiendo de los aditivos químicos usados en la cocción, existen celulosas químicas Kraft y al Sulfito, siendo la primera la más utilizada a nivel mundial. La celulosa química se caracteriza por tener un rendimiento total relativamente bajo, es decir, sólo entre un 40% y un 60% del material original (madera) queda retenido en el producto final (fibras), el resto (lignina) se disuelve en la solución alcalina para ser posteriormente quemada y generar la energía térmica y eléctrica necesaria en los procesos productivos. Estas celulosas son las más resistentes, ya que las fibras quedan intactas, son más fáciles de blanquear y menos propensas a perder sus cualidades en el tiempo.
- **Celulosa Mecánica:** se obtiene a partir de un proceso en el cual la madera es molida y triturada mecánicamente, siendo sometida a altas temperaturas y presiones. Posteriormente la pasta es clasificada, lavada y eventualmente blanqueada. Este proceso requiere un alto consumo de energía eléctrica.

La celulosa mecánica se caracteriza por tener un alto rendimiento, normalmente entre un 85% y un 95%, pero la lignina remanente en el producto es susceptible a oxidarse, generando el color amarillo que caracteriza los diarios viejos. Los principales usos de estas celulosas son la fabricación de papel para periódicos y papeles para impresión y escritura de menor calidad.

Esta celulosa es menos resistente que la química, no por la presencia de la lignina remanente, sino porque las fibras en ella contenida han sido cortadas en el proceso de fabricación. A nivel mundial, del total de 175 millones de toneladas de celulosas producidas (1998), cerca de un 76% correspondieron a celulosas químicas y sólo un 24% a celulosas mecánicas [57].

Otra forma de clasificar la celulosa corresponde al tipo de materia prima usada para su fabricación. Dependiendo de ella existen celulosas de fibra larga y suave (*softwood pulp*) y celulosas de fibra corta y dura (*hardwood pulp*) [56].

La celulosa de fibra larga genera en los papeles una red de uniones más resistentes que las de fibra corta. La longitud de las fibras largas fluctúa entre 2.5 y 4.5 mm, contra los 0.7 a 1.8 mm de las fibras cortas.

Dentro de la celulosa blanca de fibra larga, destacan:

- **La Celulosa NBSKP (*"Northern Bleached Softwood Kraft Pulp"*)**, producida principalmente en Canadá y los países escandinavos en base a pinos de bosques naturales y de crecimiento lento. Su principal característica es la resistencia, debido a la longitud de las fibras que la constituyen. En el mercado es valorada con un mayor precio.

- **La Celulosa BSKP "Southern Pine"**, producida en el sur de Estados Unidos y norte de Argentina usando pinos de crecimiento rápido, cuya calidad de resistencia es inferior a la NBSKP.
- **La Celulosa BSKP "Radiata Pine"**, producida en Chile y Nueva Zelanda básicamente, en el mercado es calificada como un producto intermedio entre las dos celulosas anteriores. La materia prima está basada en plantaciones de pino radiata de crecimiento rápido.

Dentro de la celulosa blanca de fibra corta, destacan:

- **La Celulosa BEKP (*Bleached Eucalyptus Kraft Pulp*)**, producida en base a plantaciones de crecimiento rápido de eucaliptos. Los principales productores son Brasil, Chile, Península Ibérica, Australia y Nueva Zelanda.
- **La Celulosa Birch**, producida con abedules del norte de Europa, los principales productores son Finlandia y Suecia.
- **La Celulosa NMHW (*Northern Mix Hardwood*)**, producida con una mezcla de varias especies de madera *hardwood* principalmente en Canadá, Francia, Japón, Corea y este de Europa.
- **La Celulosa MTH (*Mix Tropical Hardwood*)**, producida con una mezcla de varias especies tropicales de madera *hardwood* de Indonesia.
- **La Celulosa SMHW (*Southern Mix Hardwood*)**, producida con una mezcla de varias especies de maderas *hardwood* en el sur de Estados Unidos. En el mercado es valorada con un mayor precio [58].

En cada uno de los métodos se obtienen características en las pulpas como por ejemplo: blancura, opacidad y limpieza.

Con las características anteriores se obtienen papeles de alta calidad para la industria de artes gráficas y productos de uso educativo.

#### **4.4 Cargas minerales y productos químicos**

Hasta aquí se ha mencionado la composición fibrosa de un papel que aunque es aproximadamente el 80% de su constitución, también está formado por cargas minerales, productos químicos y aditivos que complementan el 20% restante de su composición. La carga o contenido restante se emplea para darle: color o pigmentación, tersura y cuerpo. Su contenido en un papel varía dependiendo del tipo y el uso a que será destinado. Dentro de las cargas usualmente empleadas en la industria papelera se encuentran: Caolín o Bióxido de Silicio, el Carbonato de Calcio y el Bióxido de Titanio.

Las cargas minerales que contiene un papel ayudan a incrementar la opacidad, blancura, receptividad de tintas y, sobre todo, se mejora la lisura y la estabilidad dimensional de las hojas.

Con respecto a productos químicos, tenemos a las resinas orgánicas y sintéticas que se utilizan para dar encolado interno o superficial, y así proporcionar una protección a la penetración de líquidos como las tintas y el agua. También existen almidones y polímeros sintéticos utilizados para dar una mejor adhesión de las fibras con el contenido mineral y así evitar problemas de desprendimiento de polvo en las prensas de las máquinas impresoras.

Finalmente, los aditivos como dispersantes, bactericidas, antiespumantes y colorantes ayudan a mantener la pasta homogénea, sin generación de microorganismos y espuma. Así mismo, proporcionan tinte o color a los papeles.

Por lo anterior, el papel es más que una red de fibras vegetales, es un entrelazamiento del contenido mineral con el fibroso cuyo resultado son las hojas sobre las que escribimos, entre otros.

## **4.5 Maquinaria**

Para la fabricación de un papel a nivel industrial existen diferentes tipos de máquinas, como son: Fourdiniers y doble tela, para papeles lisos; y las de tipo Yankee para papeles crepados o especiales. Las máquinas Fourdiniers son las clásicas y de mayor existencia en la fabricación de papeles lisos en la industria mexicana, ver la figura 4.3.

### **1. Cajón de entrada**

La pasta acuosa que contiene las fibras cae sobre una tela móvil donde se produce la formación de la hoja por el entrelazamiento de las fibras.

### **2. Tela**

El exceso de agua de la pasta acuosa se elimina a través de la tela por gravedad y vacío.

### **3. Prensas Secadoras**

La hoja de papel pasa por prensas que por presión y succión eliminan parte del agua.

#### **4. Cilindros Secadores**

La hoja de papel húmeda pasa por distintos grupos de cilindros secadores que por calor la secan.

#### **5. Monolúcido**

Es un cilindro de gran diámetro que tiene como objetivo entregar una cara del papel más lisa y brillante.

#### **6. Prensa Encoladora**

El papel recibe un baño de almidón con el cual se sella la superficie de éste.

#### **7. Lisa**

Son rodillos de acero por los cuales pasa el papel proporcionándole tersura y un espesor homogéneo al ancho.

#### **8. Bobinadora**

El papel se enrolla en el carrete de la máquina para luego ser bobinado y/o cortado a las medidas requeridas.

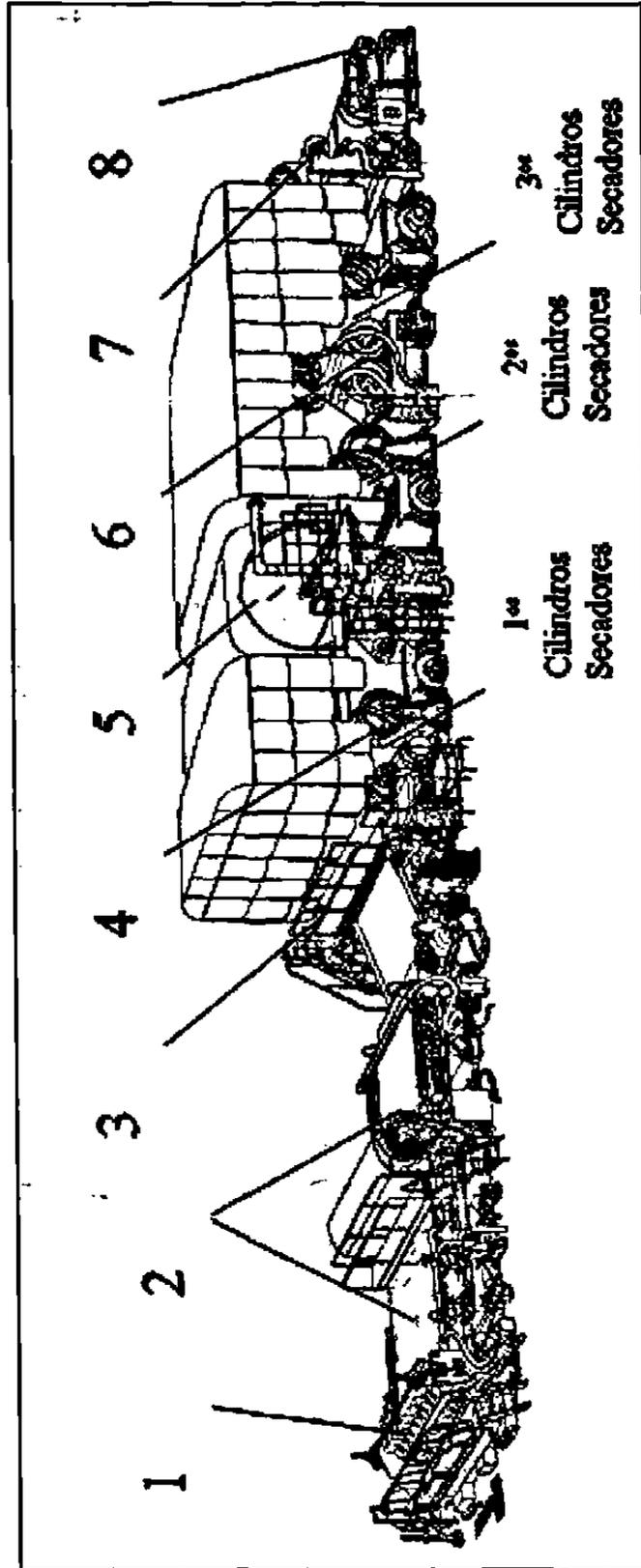


Figura 4.3 Máquina para fabricación de papel

- 1.Cajón de entrada; 2.Tela; 3.Prensas secadoras; 4.Cilindros secadores;
- 5.Monolúcido; 6.Prensa encoladora; 7.Lisa; 8.Bobinadora.

## 4.6 Preparación de pasta y refinación

Las celulosas provenientes de las fábricas de pulpa están sólo parcialmente preparadas para la manufactura del papel. Si las celulosas fueran utilizadas en esas condiciones, se obtendría la elaboración de papeles de baja resistencia, textura irregular y formación pobre, por lo que es necesario realizar una mezcla adecuada de las fibras, con cargas minerales y productos químicos apropiados y una buena refinación [55,57].

Primeramente, para preparar la mezcla, las fibras deberán ser suspendidas en agua para proveer la consistencia apropiada y permitir su mezcla con las cargas y aditivos. Las fibras son desintegradas en suspensión de agua por la acción de un "hidropulper", con recipientes y agitadores de alta velocidad; esto provoca una violenta turbulencia, la cual crea una masa fluida, que podrá ser bombeada para subsecuentes operaciones. Una vez que las celulosas han sido desmenuzadas, se hacen pasar por reguladores de consistencia manteniendo una proporción constante de fibra-agua y evitando así cambios en el peso base de un papel en máquina.

Posteriormente, la celulosa es alimentada a un refinado de disco, compuesto por dos ruedas, una fija y la otra móvil, o las dos móviles, rotando en sentidos opuestos. La abertura de los discos y su velocidad (RPM) van a dar el grado de refinación de la celulosa que no es más que el corte, dispersión y restregado de las fibras, para lograr una buena formación del papel.

## 4.7 Proceso de fabricación

Una vez hecho lo anterior, a la mezcla se le dará otra pasada por uno o varios refinadores cónicos, los cuales tienen como función peinar y orientar las fibras en la pasta, para lograr un mejor entrelazamiento que conllevará a una buena formación del papel. La máquina de papel, ver figura 4.3, se divide en tres grandes secciones que son:

**Sección húmeda:** Una vez que la pasta se ha colocado en la caja de entrada, se mantienen las fibras en continua dispersión para lograr una mezcla homogénea que después será alimentada en la mesa de formación. En esta fase se le da a la pasta espesor, consistencia y velocidad uniforme, dando como resultado el peso base, calibre y otras propiedades de la hoja. La máquina de papel Fourdiner utiliza una tela horizontal sinfin en una mesa formadora, que anteriormente era de bronce, pero que ha sido substituida por plástico mejorando la resistencia a la abrasión y costos. Una vez que las fibras en suspensión fluyen sobre la tela, el agua es drenada a través de la tela por gravedad, quedando las fibras retenidas en la malla aleatoria, siendo algunas partículas de mineral y aditivos extraídos también en este proceso de drenado. A la vez que la tela avanza, más fibras son depositadas en la misma para formar así una guía de papel. La parte de la fibra formada en contacto con la tela, es llamada "cara tela" del papel y la parte superior es llamada "lado fieltro".

También en la mesa existe una vibración ayudando a un buen entrelazamiento y orientación de las fibras para lograr así una mejor formación. En la mesa existen cajas de alto y bajo vacío para lograr una mayor extracción de agua. En esta sección es posible utilizar un rodillo conocido como "*dandy roll*" que, además de ayudar a la formación del papel, puede dar una marca de agua al mismo.

La tela llega al final de este proceso en el rodillo llamado *couch*, el cual tiene perforaciones con un sistema de vacío para lograr una extracción de agua mayor de la guía. En este punto, el papel tiene del 80% al 85% de agua y es de aquí en donde la guía se separa de la tela para pasar a la sección de prensas.

**Sección de prensas:** el propósito de esta sección es remover el mayor contenido de humedad posible por prensado y succión, así como reducir costos en la sección de secado. Otra función de las prensas consiste en compactar el papel para lograr un mejor entrelazamiento de las fibras y dar mayor resistencia a la hoja. A la salida de esta sección, el papel lleva del 60% al 70% de humedad.

**Sección de secado:** consiste en un tren de secadores cilíndricos que contienen vapor sobresaturado y pasan la guía a través de éstos en forma de serpentina. Bajo este sistema, tanto el lado fieltro como el tela están en contacto alterno con los secadores para producir así un balance de secado apropiado. Posteriormente la guía es alimentada a una prensa de encolado superficial para darle mejor acabado, cuerpo y resistencia, mediante la aplicación de una solución de almidón que varía del 2% al 8% de sólidos, dependiendo el caso. También en esta prensa son aplicables algunas resinas sintéticas que le dan propiedades de resistencia a la humedad.

Después, la guía, alimentada a una segunda sección de secadores, para darle el secado final del papel, saliendo con valores del 2% al 8% de humedad.

Una vez que la guía ha salido de la etapa de secado, es pasada a la calandra, en donde se le dará el acabado final del papel (lisura y calibre) en base a las necesidades requeridas y dependiendo del tipo de papel y uso al que será sometido. En la figura 4.4 se ilustra en una forma simple el proceso del papel.

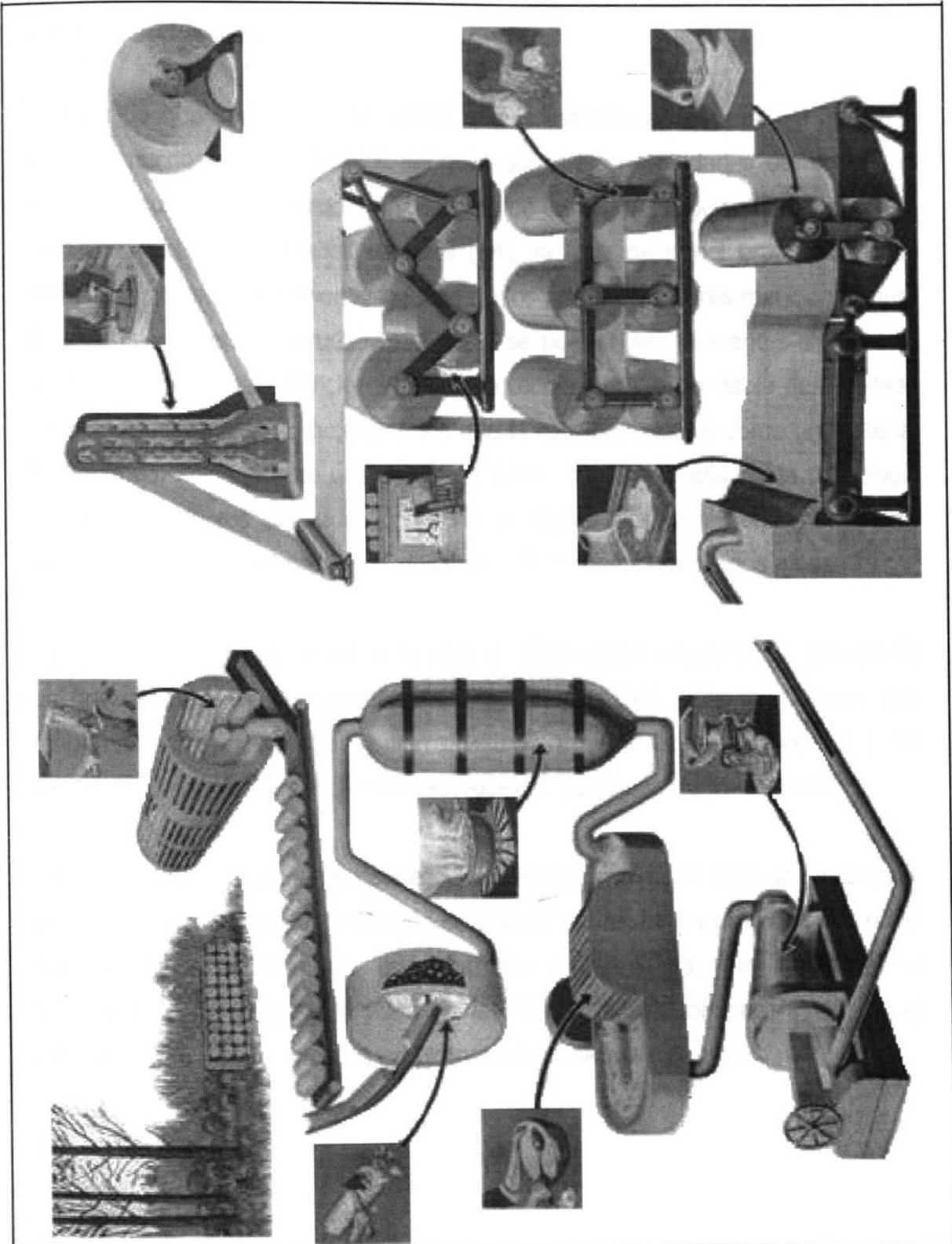


Figura 4.4 Ilustración simple del proceso del papel desde el corte de la madera hasta la formación de la hoja [54].

## 4.8 Propiedades del papel

### 4.8.1 Introducción

A pesar de que siempre se ha sabido que la estructura del papel es fibrosa y porosa, muchos de los estudios antiguos sobre las propiedades del papel, no tenían en cuenta esta estructura y muchas de las teorías asociadas con el tema, la despreciaban. En aquellos estudios [54], la hoja de papel era considerada como una unidad. Ciertamente algunos de los primeros autores mencionan que, a pesar de que en la estructura del papel se puedan ver diferentes elementos, se debe ignorar esta condición y aplicar la tecnología que se había desarrollado para otros materiales en hojas, en los que la estructura se ve como un material homogéneo. Por supuesto que se puede ganar mucho estudiando la tecnología de otros productos parecidos, pero no es lógico despreciar el conocimiento sobre la estructura del papel y el desarrollo de modelos adecuados a ella.

La investigación moderna sobre la relación fibra–papel requiere, en opinión de un gran número de investigadores en este campo [56], modelos teóricos que tengan un nivel apropiado de verosimilitud. Algunos de estos modelos y las teorías asociadas a ellos, han resultado buenos guías para la investigación.

Conviene dejar claro un punto desde el principio, el desarrollo de modelos y teorías no permite hacer predicciones exactas sobre las propiedades del papel que se va a fabricar en una máquina determinada. Sin embargo, el conocimiento del papel y la física de las fibras ha sido de gran ayuda en el entendimiento y la solución de problemas en la máquina de papel.

En igual forma es difícil predecir el comportamiento del papel durante su transformación y uso final, pero el conocimiento de su estructura y sus propiedades, puede dar información muy valiosa que, bien interpretada, puede evitar problemas posteriores cuando se tiene la oportunidad de realizar pruebas al papel antes de emplearlo en un proceso o para un uso para el cual no resultaría adecuado.

El papel tiene una estructura tridimensional y al ser fabricado en un proceso continuo, sus propiedades son notablemente diferentes en sus tres dimensiones.

En el proceso de la formación de la hoja de papel a partir de una suspensión de fibras, el grado en que se entrelazan las fibras para formar una matriz depende de las dimensiones de las fibras, su forma y su flexibilidad [55,58].

Para obtener resistencia en el papel, la operación debe ir más allá del entrelazado de las fibras, es necesario aumentar la fuerza de las uniones entre fibras en la matriz. Esto se obtiene por medio del tratamiento mecánico o refinación de la celulosa suspendida en agua, que hace que aumenten la flexibilidad de las fibras y el número de uniones entre ellas, en la hoja seca.

#### **4.8.2 Características estructurales del papel**

Estas características describen cómo se encuentran arreglados los componentes en una hoja de papel. Las propiedades que llamamos estructurales son aquellas que describen la naturaleza y diferencias en la dirección de la hoja de papel, así como las diferencias entre sus dos caras [56,58]. Las propiedades y características que tienen especial interés desde el punto de vista de la estructura del papel son: doble cara, dirección o sentido, peso base, espesor, peso específico aparente (Densidad aparente), formación, lisura, y porosidad.

Estas características se pueden agrupar en tres categorías de acuerdo con su naturaleza [56]:

- Las características: peso base, espesor, densidad y *bulk*, se pueden llamar globales, debido a que se refieren al peso y espesor promedio de un lote completo de papel, independientemente de cualquier variación de su composición en una parte pequeña del papel.
- Las características: formación, dirección y doble cara, se refieren directamente a las variaciones en la estructura en una parte del papel.
- Las características: lisura y porosidad, están relacionadas con la estructura del papel en la interfase papel - aire, en la superficie cuando se trata de la lisura y en el interior de la hoja para la porosidad.

#### 4.8.3 Lado tela y lado fieltro del papel

Cuando el papel ha sido fabricado en una máquina Fourdrinier convencional (mesa plana) o en una de cilindros (de formadores), al formarse la hoja, el lado que quedó pegado a la tela de formación, se denomina como "lado tela" y el lado opuesto se llama "lado fieltro".

Sin embargo, la mayoría de los papeles se fabrican aún en máquinas Fourdrinier convencionales o máquinas de cilindros con una sola tela de formación y lo que se va a decir a continuación, se refiere a este tipo de papeles.

**Importancia de la doble cara o lado del papel.** Las diferencias entre los lados o caras, tela y fieltro, tienen importancia por su influencia en otras propiedades del papel. Como regla general, el brillo y la lisura de las dos caras

es diferente, así mismo, el tono o la intensidad del color pueden ser diferentes, debido a que la mayoría de los colorantes tienen mayor afinidad por los finos y las cargas, que se encuentran en mayor concentración en el lado fieltro. Los dos lados se comportan en forma diferente durante la impresión, por lo que es importante identificarlos antes de iniciar un trabajo.

**Identificación de los Lados o caras.** El lado tela es generalmente más áspero que el lado fieltro, debido a la marca que deja en él la tela de formación de la máquina de papel, y a que es en general abierto o poroso en el lado tela y más cerrado, con una textura más fina por el lado fieltro, esto se debe al arrastre de los finos en el agua, al drenar a través de la tela durante el proceso de fabricación.

Esta diferencia es ocasionada por la diferencia en la composición fibrosa entre las dos caras de la hoja, originada durante la formación de la misma, al ser arrastrados los "finos" (fibras pequeñas y cargas) por el agua y el vacío, así como por la marca que deja la tela de la máquina en la superficie inferior de la hoja, cosa que no sucede en la superficie opuesta del papel.

**Causas de la doble cara del papel.** El papel nunca tiene características idénticas de apariencia y superficie por los dos lados. Esta diferencia se ha denominado "doble cara". La doble cara se puede deber a que exista realmente una estructura diferente en cada una de sus caras, por existir una concentración mayor de encolado, pigmentos y finos en una de sus caras, o bien, puede tratarse de una doble cara óptica, debida a una diferencia de acabado o reflectancia de una cara a la otra. La mayoría de los papeles, especialmente los de espesor alto, muestran una diferencia definitiva en la composición fibrosa de sus dos lados, esto se manifiesta generalmente por una preponderancia de fibras largas en el lado tela y de fibras cortas y finos en el lado fieltro. Los papeles blancos algunas veces tienen mayor blancura en el lado tela que en el

lado fieltro, debido a que se han removido gran cantidad de finos de color más oscuro del lado tela, ya que como mencionamos antes, fijan más los pigmentos.

La doble cara del papel puede ser causada por uno o varios de los siguientes factores:

- Composición fibrosa del papel y su grado de refinación. Otros aditivos empleados como: cargas, encolantes, colorantes y ayudas de retención de finos, principalmente.
- Pérdida de finos a través de la tela antes de que se forme una red con las fibras más largas.
- Asentamiento más lento de las fibras más finas, debido a su peso específico menor y su resistencia hidrodinámica, con el resultado de que un porcentaje mayor de finos se deposita en el lado fieltro de la hoja.
- Remoción de los finos del lado tela de la hoja húmeda, después de su formación, como resultado de la acción de los cilindros de la mesa y las cajas de succión.

La doble cara del papel normalmente es indeseable, ya que resulta en una diferencia en las propiedades entre sus dos superficies, que afecta durante el uso del papel, sin embargo, esto en las máquinas de papel de una tela, es inevitable.

Esto no se refiere a los papeles que intencionalmente se fabrican con dos caras diferentes, buscando la economía y alguna mejora en los productos, como es el caso de las cartulinas plegadizas con una cara blanca y la otra gris.

#### 4.8.4 Sentidos del papel

El papel tiene dos sentidos, debido a la mayor orientación que sufren las fibras en la dirección en que corre la máquina y también al esfuerzo de tensión que se aplica al papel durante el prensado y el secado. Se denominan sentido de fabricación o de máquina (SF o SM) y sentido transversal (ST).

Cuando el papel ha sido hecho en máquina de formadores, esta diferencia es más marcada que cuando ha sido hecho en máquina fourdrinier, debido a que en esta última, la distribución de las fibras es más aleatoria y en las de formadores mayor cantidad de fibras quedan orientadas en SF.

La relación de las propiedades del papel de SF a ST, en cuanto a la resistencia a la tensión, es de 1.5 a 2 veces si proviene de máquinas Fourdrinier, en cambio si fué fabricado en máquinas de formadores, puede ser de 5 veces o más. Lo anterior deberá tenerse en cuenta para su uso, por ejemplo: al imprimir las cartulinas plegadizas para hacer cajas, en las que la rigidez es muy importante y varía mucho según el sentido del papel, especialmente si son de máquinas de cilindros.

Al sentido de fabricación también se le llama hilo o grano. Cuando el papel está cortado en hojas con el sentido de fabricación paralelo al lado más largo de la hoja, se denomina de grano largo y en el caso de que el sentido de fabricación sea paralelo al lado corto de la hoja, será de grano corto.

Los sentidos del papel se deben tener en cuenta al realizar las determinaciones de algunas de sus propiedades físicas. Por ejemplo, para las pruebas de resistencia a la tensión, al rasgado y al dobléz, se deben cortar especímenes en ambas direcciones del papel.

En las determinaciones de tensión y dobléz, la dirección de la máquina o transversal se refieren a la dirección en la que se aplica la fuerza y no a la dirección en que se produce la ruptura, que en estas pruebas es en ángulo recto a la fuerza aplicada y los resultados son mayores en el sentido de fabricación. En cambio, en la determinación del rasgado, la fuerza que se aplica y la ruptura son en la misma dirección y el resultado es mayor en el sentido transversal.

Al imprimir el papel por el proceso offset es importante que el sentido de fabricación o hilo del papel sea paralelo al lado más largo de la hoja, de manera que quede paralelo al eje de los cilindros de la prensa, para evitar problemas de registro debidos a falta de estabilidad dimensional, acentuada al existir humedecimiento del papel en el proceso. El papel se expande menos en sentido de fabricación que en sentido transversal y el crecimiento de la hoja se puede compensar cambiando el diámetro de la máquina, cuando el papel viene cortado como se indicó, cosa que de lo contrario es imposible.

## **4.9 Formación**

### **4.9.1 Descripción**

La uniformidad con que están distribuidas las fibras y otros materiales sólidos en la hoja de papel, denomina la "formación" del papel, que también se conoce como su estructura interna. Es una característica, que se puede definir como la uniformidad con que el papel transmite la luz. En la práctica, este término se refiere a la apariencia de la hoja de papel al analizado a contraluz. Se dice que un papel tiene mala formación, cuando las fibras están distribuidas en forma poco uniforme, dando al papel un aspecto moteado, de nubes o aborregado, al ser analizado a contraluz; en cambio un papel con buena formación presenta un aspecto uniforme que se asemeja al de un vidrio esmerilado. Hay características

que influyen en la apreciación que se hace de la formación del papel, debido a que el ojo no es sensible a la distribución de los materiales en la hoja, sino a la luz y a sus variaciones de intensidad. Esto significa que si tuviéramos dos papeles con una formación idéntica, pero de distinto color o con propiedades ópticas diferentes, al ser observados contra una fuente de luz, parecerían más o menos diferentes en su formación.

También se ve afectada la intensidad de transmisión de la luz por algunos defectos como las marcas de la tela o los fieltros de la máquina de papel, que aparecen con regularidad en toda la hoja y algunas otras alteraciones en la distribución de las fibras, que aparecen irregularmente y son causa de que la formación parezca peor de lo que en realidad es, al ser analizado a contraluz. Es conveniente tener en cuenta las características que pueden influir en la apreciación visual, al hacer la evaluación de la formación de un papel [56].

La formación del papel es muy importante en papeles de escritura e impresión, debido a que afecta el aspecto de los productos y aunque es en realidad una propiedad de apariencia, también tiene importancia en el comportamiento del papel, ya que está relacionada con sus propiedades físicas y ópticas. Lo anterior se debe a que un papel con mala formación tiene zonas con mayor número de fibras aglomeradas y por lo tanto, con mayor espesor que otras y que, lógicamente afectarán los valores de muchas de sus propiedades, ocasionando problemas al imprimir por ser débiles las zonas delgadas, además de mala calidad en la impresión. Entre las propiedades que dependen mucho de la formación de un papel, están la planicidad y la suavidad. Si durante la fabricación del papel se intenta compensar las diferencias en el calibre, de unas zonas a otras de la hoja derivadas de una formación mala, por medio de mayor calandrado, se obtendrá una hoja con densidades diferentes de unas áreas a otras, lo cual será causa de que sea también diferente la absorción del vehículo de la tinta. Por ejemplo, la impresión de una plasta grande mostrará

desigualdades en la intensidad de la tinta impresa de unos puntos a otros de la hoja. En tipografía y en huecograbado afecta mucho la mala formación, ya que la presión ejercida durante la impresión dependerá del espesor y la densidad de la hoja en cada punto, dando por resultado impresos poco uniformes en intensidad.

En cambio en offset, este defecto resulta menos crítico, debido a que estas diferencias de espesor y densidad se ven compensadas por la elasticidad del hule utilizado en la transferencia de la tinta. No siempre es posible obtener el papel con la formación ideal, debido a que existe una relación, en ocasiones opuesta, entre esta característica y otras características del papel, de manera que se tiene que dar preferencia a mantener las propiedades más importantes para cada tipo de papel, a costa de que disminuyan algunas que no lo son tanto.

Por ejemplo si se requiere una resistencia al rasgado alta, es necesario fabricar el papel con fibras largas, que impiden tener una formación muy uniforme. También se debe tener en cuenta que el costo de fabricación de un papel se eleva al exigírsele una mayor calidad.

#### **4.9.2 Determinación**

La formación se determina tanto por la densidad de las áreas gruesas como por su espaciamiento. Se puede examinar visualmente, aunque el resultado no puede expresarse numéricamente, por lo que es necesario hacer comparaciones con muestras estándar para cada calidad de papel y confiar en el juicio del observador. Se debe tener en cuenta que la apreciación de nubes que por el ojo humano, se ve afectada por el grado de transparencia y el color del papel, un papel más transparente tiene mayor apariencia de mala formación; el color

también afecta en la apreciación de la formación, el azul da impresión de peor formación que el blanco o el amarillo. La observación visual para evaluar la formación del papel es completamente subjetiva, sin embargo, su utilidad ha sido demostrada por la aplicación práctica durante mucho tiempo. Existen varios instrumentos para medir la formación, con base en la cantidad de luz transmitida a través de una hoja de papel. Este sistema trabaja por barrido de la superficie, haciendo atravesar un rayo de luz de intensidad controlada, por todos los puntos de la muestra.

La luz transmitida se recoge mediante una celda fotoeléctrica por la otra cara del papel y se registran las fluctuaciones de la intensidad de la luz en una gráfica, o bien con la ayuda de un dispositivo digital que da lecturas de los valores medio, mínimo y máximo. Se realiza la prueba en los dos sentidos del papel y por las dos caras.

## **4.10 Pruebas de laboratorio para el papel**

### **4.10.1 Introducción**

Los productos de papel deberían caracterizarse y comercializarse sobre la base de nomenclatura y métodos de prueba normalizados, con objeto de estar seguros de que al tratar sobre productos de papel y valores de pruebas, los participantes hablen el mismo lenguaje. Desafortunadamente, no se emplean las mismas normas universalmente, sin embargo, en la medida en que se especifique la fuente de las normas, las negociaciones se llevarán a cabo y las investigaciones científicas se documentarán con un mínimo de ambigüedad y malentendidos.

En México, las normas más empleadas para pruebas y definiciones relacionadas con el papel, son las TAPPI, de EUA (*Technical Association of the Pulp and Paper Industry*), pero no manejan parámetros de calidad.

#### **4.10.2 Acondicionamiento de las muestras**

Las propiedades de un papel en particular, dependen en un alto grado de su contenido de humedad. El papel es un material higroscópico y la humedad absorbida entra en equilibrio con la humedad del ambiente que lo rodea, variando así su contenido de humedad.

Cuando se quieren obtener resultados reproducibles, las muestras de papel deben acondicionarse en un ambiente controlado a  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  de temperatura y  $50 \pm 2\%$  de humedad relativa, de acuerdo con TAPPI T400 sp - 97 [59]. El contenido de humedad de equilibrio, para la mayoría de los papeles, cuando quedan expuestos a un ambiente con estas condiciones, está entre 7 y 9% en peso de humedad en el papel.

No se puede generalizar sobre los efectos de la humedad relativa en las propiedades del papel, los cambios dependen de la composición fibrosa, el grado de refinación, los aditivos agregados y el tratamiento de la superficie de la hoja, sin embargo, se mantienen dentro de variaciones razonables. Por ejemplo, al aumentar la humedad relativa del ambiente, se observa que aumenta la elasticidad y con ella, las resistencias al rasgado y al doblado, en cambio, disminuyen las resistencias a la explosión y a la tensión [56].

### **4.10.3 Pruebas físicas**

Estas pruebas proporcionan información sobre la calidad del papel y dan la base para estimar su comportamiento.

Es conveniente dividir las pruebas físicas del papel en cuatro grupos para su mejor entendimiento, estos son:

#### **1. Propiedades físicas y mecánicas.**

Entre las más importantes están: peso base o gramaje, espesor o calibre, densidad aparente, *bulk* (Volumen específico aparente) y resistencias a: tensión, rasgado, explosión, doblez, elongación, rigidez y estabilidad dimensional.

#### **2. Propiedades de la superficie.**

Como son: porosidad, lisura o rugosidad y resistencia de la superficie al levantamiento (*Dennison*).

#### **3. Propiedades ópticas.**

Blancura, opacidad, brillo y color.

#### **4. Permeabilidad a los fluidos líquidos y gaseosos:**

Entre estos tenemos: encolado: penetración de agua o tinta, absorción de agua, penetración de aceite y porosidad o resistencia al paso del aire

Existen muchas otras determinaciones para probar el papel, sin embargo, estas son las más importantes para uso general.

En el caso de las Artes Gráficas, las propiedades a tener en cuenta son las que contribuyen a lograr obtener un buen trabajo y que se han reunido en dos grandes grupos, uno se refiere a la facilidad para ser impreso, denominado

imprimibilidad (*printability*) y el otro a la facilidad para pasar por la máquina (*runnability*).

Entre las del primer grupo son importantes: lisura, receptividad de la tinta, blancura, opacidad, brillo, formación, resistencia de la superficie al levantamiento y limpieza, principalmente. Para el segundo grupo podemos mencionar: resistencia, uniformidad, rigidez, peso base, espesor, densidad, estabilidad dimensional, porosidad y lisura, entre otras.

En el siguiente capítulo se explicarán con más detalle algunas de las pruebas mencionadas anteriormente ya que fueron necesarias para la caracterización del papel.