

24
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

RECONOCIMIENTO DE IMAGENES EN
FRACTOGRAFIA CUANTITATIVA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN COMPUTACION
P R E S E N T A N :
ANA ELENA CRUZ MARTINEZ
HECTOR GUSTAVO SOLARES ESQUIVEL

DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE CARRERA BOLAÑOS

MEXICO, D. F.

1993



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

PREFACIO	1
1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA METALURGICO DE FRACTOGRAFIA	1
FRACTURAS	3
FRACTURAS DUCTILES	5
FRACTURAS FRAGILES	5
FRACTURAS POR FATIGA	5
IMPORTANCIA DEL ANALISIS DE FRACTURAS	7
FRACTOGRAFIA: HERRAMIENTA DE ANALISIS	8
HISTORIA DE LA FRACTOGRAFIA	9
DESARROLLO DE LA FRACTOGRAFIA	11
USO DE MICROSCOPIOS	11
LA ESTEREOLOGIA Y LA FRACTOGRAFIA CUANTITATIVA	14
LA FRACTURA COMO UN PROBLEMA METALURGICO	15
ALGUNOS DETALLES SOBRE EL PROBLEMA A RESOLVER	16
PROCESO EXPERIMENTAL	17
EXAMEN VISUAL PRELIMINAR	19
CUIDADO Y MANEJO DE LAS FRACTURAS	19
TECNICAS DE PRESERVACION	20
TECNICAS DE LIMPIEZA DE FRACTURAS	21
SECCIONAMIENTO DE UNA FRACTURA	21
2. DESARROLLO DE LAS TECNICAS APROPIADAS DE RECONOCIMIENTO DE	
IMAGENES	23
TECNICAS DE ANALISIS DE FRACTURAS	25
PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS IMAGENES	26
DIGITALIZACION	27
USO DE FOTOGRAFIAS Y SCANNER	28
USO DE CAMARA DE VIDEO	29
USO DEL SEM PARA OBTENER IMAGENES	29

FORMATOS DE LAS IMAGENES	32
FORMATO TIFF	33
REALCE, RESTAURACION Y RECONSTRUCCION	34
FILTROS	35
FILTRO DE PROMEDIO	35
FILTRO DE MEDIANA	36
REALCE DE BORDES	37
ALGORITMO DE ROBERTS	37
DESCRIPCION Y RECONOCIMIENTO	38
EXPLICACION DE LOS PROGRAMAS REALIZADOS	38
PROGRAMAS DE DESPLIEGUE Y FILTRADO	38
MEDICION DEL PERFIL	40
DIMENSION FRACTAL DEL PERFIL	44
3. CUANTIFICACION DE PARAMETROS FRACTOGRAFICOS	45
IMPORTANCIA DE LA CUANTIFICACION DE PARAMETROS	47
CARACTERIZACION PARAMETRICA DE LA FRACTURA	47
METODO DE CUANTIFICACION A PARTIR DE IMAGENES	49
PARAMETROS DE RUGOSIDAD	50
DISTRIBUCIONES ANGULARES	52
CARACTERIZACION GEOMETRICA	52
MODELOS Y SIMULACIONES DE FRACTURAS	53
MAPEO TOPOGRAFICO	56
4. FRACTALES Y FRACTOGRAFIA	58
DEFINICION DE FRACTAL	61
APLICACION DE LOS FRACTALES EN FRACTOGRAFIA	61
EL ASPECTO FRACTAL	62
ANTECEDENTES	63
ANALISIS DEL PERFIL DE FRACTURA POR METODOS FRACTALES ...	63
METODO ALTERNATIVO AL PROPUESTO POR MANDELBROT	65
ALGORITMO PARA MEDIR LA DIMENSION FRACTAL	71

5. RESULTADOS	73
FRACTUS: PROGRAMA DE APLICACION A FRACTURAS	74
ANALISIS DE IMAGENES. OBTENCION DE PARAMETROS	74
TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS	79
6. CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS	85
A. EJEMPLO DE UN ARCHIVO CON FORMATO TIFF	88
B. PSEUDOCODIGO DE LOS PROCEDIMIENTOS MAS IMPORTANTES DEL PAQUETE FRACTUS	93
C. INSTRUCTIVO DE USO DE FRACTUS	104

PREFACIO

En la industria metalmeccánica se utilizan herramientas hechas de acero. Dicho acero debe tener ciertas características de dureza y resistencia al impacto, pero a menudo hay quejas sobre la calidad con que el acero sale de la siderúrgica, ya que se fractura muy rápido al estar en servicio. Lo anterior es causa de pérdidas económicas en la industria debido al alto costo del acero.

La industria siderúrgica aplica tratamientos térmicos a los aceros para que adquieran las propiedades ya mencionadas, pero debido a las quejas provenientes de la industria, se han hecho estudios sobre el problema y se ha encontrado que es necesario determinar otros tratamientos térmicos que hagan más larga la vida útil de los aceros. Esta tesis se realiza como una parte de dichos estudios y se basa en la obtención de ciertos parámetros que caracterizan a las superficies de fractura. Dichos parámetros se obtienen a partir del análisis de las imágenes de los perfiles de fractura.

Si se hace un corte perpendicular al plano de la superficie fractura, se obtiene su perfil. Los parámetros bidimensionales obtenidos de perfiles se obtienen para después utilizar las relaciones estereológicas y así derivar los parámetros tridimensionales relativos a la superficie. La topografía de superficies puede ser cuantificada por índices de rugosidad así como por la dimensión fractal. Se ha probado que el análisis de perfiles es un método confiable, siendo una forma fácil y rápida para caracterizar la topografía de las superficies.

Los objetivos de la tesis son:

- Medir la rugosidad de las fracturas a través del análisis de imágenes, y
- Analizar posibles aplicaciones de los fractales en el área de

fractografía.

En el capítulo uno se da una introducción sobre lo que son y lo que caracteriza a las fracturas, así como algunos métodos que existen para su estudio. También se da una amplia explicación sobre el problema que se intenta resolver desde un punto de vista metalúrgico, indicando el alcance de la tesis.

Dentro del capítulo dos se da la razón por la cual se usa el análisis de imágenes para el análisis fractográfico. Se explican los algoritmos de procesamiento digital de imágenes que ayudan a desplegar las imágenes, filtrarlas y en general a hacerlas óptimas para el análisis. Se enfatiza en la identificación de fronteras o bordes, lo cual es de suma importancia ya que para obtener los parámetros característicos se desarrolló un algoritmo para medir bordes (perfiles de fractura).

En el capítulo tres se dan las ecuaciones estereológicas que incluyen los parámetros de rugosidad lineal y superficial y que pueden ser obtenidos con los datos encontrados en el análisis de las imágenes después de la medición de perfiles. Se explican las relaciones existentes entre dichos parámetros y las diferentes morfologías que se pueden encontrar en una fractura, indicando una posible aplicación del análisis de imágenes en la identificación de patrones geométricos.

En el capítulo cuatro se estudia el carácter fractal de las superficies de fractura. El aspecto fractal de una fractura se basa en las irregularidades de la superficie, pero se ha encontrado que su comportamiento no concuerda con la definición convencional de fractales dada por Mandelbrot.

En el capítulo cinco se dan los resultados del análisis hechos con el programa creado, cuyo nombre es Fractus. Los resultados se basan

en la obtención de los parámetros de rugosidad y de dimensión fractal a partir de las imágenes de fractura.

En el capítulo seis se dan las conclusiones de la tesis.

Para determinar el tratamiento térmico que un metal debe recibir, se debe hacer una comparación entre los resultados del ensayo de impacto -que son una medida de fragilidad- y los índices de rugosidad que se determinan en ésta tesis. Usando una de las herramientas o dado de forja fracturado se podrá encontrar la fragilidad del material y así determinar qué tan bueno fué el tratamiento térmico que se le aplicó. Dentro de este trabajo no se intenta llegar a determinar tales tratamientos térmicos, el objetivo es desarrollar un programa de computadora que ayude a calcular los parámetros cuantitativos que servirán posteriormente para encontrar la relación entre fragilidad y rugosidad.

Fractus, el software que es producto de ésta tesis es útil para las personas que se dedican al estudio de las fracturas. El programa se basa en la medición del perfil de fractura para obtener los valores de rugosidad lineal, rugosidad superficial, área aparente, área proyectada, dimensión fractal convencional y dimensión fractal modificada.

CAPITULO

1

1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA METALURGICO DE FRACTOGRAFIA

Síntesis

Debido a muy diferentes causas, los metales se fracturan, y dicho problema involucra pérdidas económicas. En la industria metalúrgica se aplican tratamientos térmicos a los metales para que éstos adquieran ciertas propiedades, pero dichos tratamientos no siempre son aplicados adecuadamente. Para poder determinar cuál debe ser el tratamiento que ayuda a que un metal tenga una vida más prolongada, es conveniente encontrar una relación entre la morfología de las fracturas y la fragilización del metal.

La industria metalmeccánica cuando utiliza dados de forja, encuentra que a veces estos pueden fracturarse bajo la acción de las cargas a las que se someten. Se trata de un mecanismo de fractura que presenta características muy especiales.

Para evaluar la fragilidad del material al impacto, es necesario hacer un análisis cuantitativo de las superficies fracturadas. Desde hace mucho tiempo, ha existido la preocupación de hallar las causas por las cuales un metal se rompe. Actualmente se han desarrollado con éste fin técnicas e instrumentos que hacen más fácil su estudio.

FRACTURAS

La ruptura de sólidos causada por una carga externa es un problema de importancia tecnológica y ha sido estudiada intensamente durante los últimos cien años.

Los mecanismos de fractura son altamente dependientes del material. En escalas pequeñas (menores a 10^{-4} m) las fracturas son un tópico de la física de sólidos. En escalas intermedias de longitud (10^{-1} m) el estudio de las fracturas es objeto de la mecánica de sólidos o mecánica de la fractura. En escalas grandes (mayores a 10^1 m) la prevención de la fractura puede ser objeto de la ingeniería. Las fracturas que se analizan en este trabajo se encuentran en escalas intermedias.

Los resultados del análisis de fracturas se basan en la experiencia del analista y dependen en gran parte de la forma de producción de la fractura (fuerzas externas). En cuanto al nivel intermedio de fracturas, existen diferentes comportamientos, a saber: elástico, plástico y viscoelástico, cada uno determinado por su propio conjunto de ecuaciones diferenciales que contienen algunos parámetros que son dependientes del material.

Para describir una fractura se necesita conocer primero la forma en que un sólido no fracturado responde a una fuerza aplicada externamente. Usualmente las fuerzas muy pequeñas no son suficientes para fracturar al sólido. El régimen lineal o elástico, es válido para una fuerza F_n menor al punto límite elástico F_y , encontrándose un comportamiento reversible, es decir, la forma original del material es recuperada si la fuerza aplicada vuelve a ser cero. Más allá del límite F_y , el comportamiento es plástico, esto es, el sistema se deforma irreversiblemente. En el régimen viscoelástico hay un retraso en la respuesta del sistema a una fuerza dada, es decir, es un sistema dependiente del tiempo.

En la literatura sobre las fracturas, hay tres familias de materiales que se estudian independientemente: metales, polímeros y rocas. Típicamente en esta última familia, la fractura ocurre antes de que se encuentre en el régimen plástico, y es llamada fractura frágil. En contraste, en las otras dos familias, la fractura usualmente ocurre dentro del régimen plástico y es llamada fractura dúctil. Dúctil y frágil son términos que describen la cantidad de deformación macroscópica plástica que precede a una fractura. Las fracturas frágiles se caracterizan por una propagación rápida de la falla con poco consumo de energía y sin deformación plástica apreciable. Las fracturas dúctiles se caracterizan por el desgarramiento del material, acompañado por una deformación plástica muy apreciable y un consumo considerable de energía. Algunos materiales son más complejos: muchas rocas son de hecho dúctiles y, bajo algunas condiciones los metales son frágiles. En particular, se pueden encontrar transiciones de comportamiento dúctil a frágil si uno baja la temperatura o si se añaden agentes corrosivos. (Ref. 1) Un acero blando se fractura menos que un acero duro, por lo que se dice que mientras más duro sea, es más frágil.

El análisis que se hace en este trabajo sólo se ocupará de fracturas en metales, específicamente aceros.

Las fracturas pueden seguir un camino transgranular (es decir, que pasa a través de los granos del material) o intergranular (que pasa por los bordes de los granos del material, o entre granos). Una fractura también puede clasificarse de acuerdo al mecanismo de fractura, como son: fracturas frágiles, dúctiles, y por fatiga, entre otros.

FRACTURAS DUCTILES

Su ocurrencia resulta de una sobrecarga bajo condiciones predecibles. No son comunes puesto que se pueden prevenir. Ocurren cuando la superficie de fractura presenta hoyuelos. También se le conoce como ruptura de hoyuelos.

FRACTURAS FRAGILES

Estas pueden producirse debido a temperaturas bajas, altos rangos de tensión y ciertas condiciones ambientales. La mayoría de los metales presentan una fragilidad dependiente de la temperatura. Algunas características de este tipo de fracturas son:

- + No hay deformación plástica visible precedente a la fractura,
- + la fractura puede aparecer granular o cristalina y a menudo es altamente reflejante a la luz,
- + pueden observarse facetas, y
- + la grieta crece rápidamente, a menudo acompañada por un fuerte ruido. (Ref. 6)

FRACTURAS POR FATIGA

Una fractura por fatiga es resultado de una carga repetitiva y cíclica, depende del material y de la dirección de la carga externa aplicada.

Este tipo de fractura es muy sensible al medio ambiente, el cual puede contener gases reactivos, líquidos corrosivos, temperaturas variadas y cambios en la carga que se aplica. Debido al constante cambio en el medio ambiente, los efectos en el material varían, influyendo en

los rangos de propagación de la fractura. Por ejemplo, el efecto de gases como el hidrógeno, es que aumenta la velocidad de crecimiento de la fractura, es decir, comparado con aire seco o con un gas inerte de la atmósfera, el hidrógeno hace que el proceso de fractura se acelere. Líquidos ambientales corrosivos, como el agua, fluidos orgánicos, ácidos, sales fundidas, etc., pueden afectar disminuyendo la vida del material.

La temperatura puede alterar sustancialmente las propiedades básicas de los materiales y puede afectar la actividad de otros elementos ambientales que dependen de reacciones de oxidación y difusión. Dependiendo del ambiente la superficie de fractura se puede oxidar más a medida que la temperatura aumenta, lo que trae como consecuencia que disminuya la resistencia, encontrándose así fenómenos de fragilización. Temperaturas muy bajas disminuyen la resistencia del material. También es importante la influencia que tiene sobre la fractura la forma en que es aplicada la carga. (Ref. 2)

Aunque este tipo de fracturas son mejor conocidas en componentes metálicos, otros materiales, como los polímeros, también pueden fallar por fatiga. Después de un número crítico de cargas cíclicas, se puede empezar a crear una grieta en la región de más concentración de tensiones. Con este ciclo continuo de carga, la grieta crecerá en longitud en una dirección perpendicular a la tensión aplicada. Una vez que la grieta haya progresado, la sección del material restante no podrá soportar más las cargas y ocurrirá una ruptura final.

En general, las fallas por fatiga proceden como sigue:

- + Hay una deformación plástica cíclica antes de que se inicie la grieta,
- + se crean grietas microscópicas superficiales,
- + se propagan las grietas, es decir, crecen cíclicamente,
- + hay una ruptura final (sobrecarga).

La fatiga es un mecanismo dependiente del tiempo, y puede separarse en tres etapas: iniciación de la grieta, propagación de la grieta y fractura debida a una sobrecarga. Generalmente, alrededor del origen de la fractura se encuentran marcas características, llamadas beach marks (marcas parecidas a las huellas que deja el mar sobre la arena) y clamshell marks (marcas que asemejan la superficie de las conchas de almejas). Estas marcas permiten localizar el origen de la falla, y dan información sobre el tipo de carga, etc. Se pueden encontrar también estriaciones, que son formaciones -como arrugas- mutuamente paralelas en ángulos rectos a la dirección local de la propagación de la falla. La presencia de estriaciones establece a la fatiga como modo de falla, pero su ausencia no elimina a la fatiga como una posibilidad. Las llamadas facetas son formaciones escalonadas en la superficie.

Es común encontrar que la fractura se inicia en el lugar donde se encuentran las marcas de las herramientas de maquinado, donde hay defectos de configuración, en los huecos formados por la corrosión, etc. También puede ocurrir que existan microfracturas antes de que al material se le aplique una carga.

Usualmente, las fracturas por fatiga son transgranulares. (Ref. 6)

IMPORTANCIA DEL ANALISIS DE FRACTURAS

Una de las fuentes de información más importantes acerca de las causas de la fractura, es la misma superficie de fractura, ya que ésta se considera como un archivo detallado de la historia de la falla.

En la industria metalúrgica es indispensable tener un control que permita una vida larga a los metales, lo cual representa un factor económico muy importante. En países industrialmente desarrollados se

tienen normas para el tratamiento térmico de los aceros. Pese a que México emplea normas importadas de dichos países, la diferencia de materias primas, equipo y hábitos de trabajo hacen necesario el estudio de la aplicabilidad de dichas normas. Se sabe que los aceros para herramientas de alta velocidad y de trabajo en caliente presentan un segundo endurecimiento. Si se mide la resistencia al impacto de estos aceros en las condiciones de "máximo endurecimiento" se puede constatar que en esas condiciones aparece una mínima resistencia al impacto, es decir una fragilización (ésto aparece a 550°). (Ref. 20)

La fragilización es un fenómeno que puede ser resultado de impurezas, de la temperatura, del contacto con líquidos corrosivos o combinaciones de éstos con otros factores. Los metales pueden fragilizarse durante su fabricación, tratamiento térmico o servicio. Si se presenta un alto grado de fragilización, ocurrirá una falla prematura. Este problema puede ser observado con métodos fractográficos, y es importante su análisis para determinar la causa y seleccionar una acción correctiva.

El caso del que nos ocupamos tiene que ver con la fragilización por sobrecalentamiento en servicio, misma que ocurre cuando los aceros son calentados a temperaturas excesivas alterándose la microestructura del material. El grado de fragilización depende del contenido de impurezas y del tiempo que haya permanecido en el rango de temperaturas críticas. (Ref. 6)

FRACTOGRAFIA: HERRAMIENTA DE ANALISIS

La **Fractografía** es una herramienta de diagnóstico en el análisis de fracturas. Podría decirse que la fractografía es para los metales como la autopsia (necropsia) es para los humanos.

El propósito de la fractografía es analizar las características de la fractura e intentar relacionar la topografía de la superficie de fractura con las causas y/o mecanismos básicos de fractura. (Ref. 2)

Para poder aplicar las técnicas de la fractografía es necesario entender cómo se fractura un metal y cómo le afectan los elementos ambientales que le rodean.

Fractografía es el término acuñado por Carl A. Zapffe en 1944, a partir de sus estudios de los elementos microscópicos en las fracturas. Se basó en la aplicación del microscopio óptico en fracturas frágiles.

Etimológicamente, fracto viene del latín fractus, y significa fractura, y graphy se deriva del griego grapho, que significa tratamiento descriptivo. También se utilizan otros términos alternativos para describir el estudio de las superficies de fractura, como fractología, y derivaciones como microfractografía, macrofractografía, fractografía óptica, fractografía electrónica, y **Fractografía Cuantitativa.**

Durante los pasados 15 o 20 años, la ciencia de la Fractografía ha madurado, trayendo como consecuencia información mucho más rica. Se han perfeccionado métodos para la preparación de las muestras metálicas a analizar, se han aplicado los avances en técnicas fotográficas, en equipo, análisis de imágenes, y se ha encontrado al microscopio electrónico de barrido como un instrumento de gran utilidad.

HISTORIA DE LA FRACTOGRAFIA

De acuerdo con el historiador metalúrgico Cyril Stanley Smith, las superficies de fractura han sido analizadas en algún grado desde el

comienzo de la edad de bronce. La primera descripción escrita del uso de la apariencia de la fractura para investigar la calidad del proceso metalúrgico fué hecha por Vannocio Biringuccio en 1540. Él describió el uso de la apariencia de la fractura como un medio para asegurar la calidad de algunas aleaciones.

En 1627, Louis Savot describe con gran detalle el uso de la prueba de fractura como un método de control de calidad para ciertos moldes de campanas, cuyo material era cobre-bismuto. El llevó a cabo observaciones sobre muestras de control como una guía para los ajustes de composición de las aleaciones y su relación con la resistencia al impacto. Así sería posible prever el comportamiento de las campanas cuando fueran golpeadas.

Otro investigador, Mathurin Jousse, en ese mismo año describió un método para determinar la calidad del acero dependiendo de la apariencia de la fractura.

Con el desarrollo de la metalografía (en el siglo pasado) como una herramienta metalúrgica, el interés en el desarrollo de estudios sobre fracturas aumentó. En 1858, P. Tunner publicó una lista en la que categorizaba las características de las fracturas, citando condiciones que influyen en las mismas, como la temperatura.

En la década de los cuarentas, Carl A. Zapffe y sus colaboradores realizaron estudios detallados de los elementos microscópicos de las fracturas. (Ref. 2)

DESARROLLO DE LA FRACTOGRAFIA**USO DE MICROSCOPIOS**

El desarrollo y la aparición de microscopios tales como el de transmisión y el electrónico de barrido hizo que se contara con nueva información sobre los mecanismos de fractura. (Ref. 2)

Es importante mencionar que posteriormente se hablará de microestructuras, con lo cual nos referimos a los constituyentes de un material que son visibles a una escala microscópica.

Los microscopios de transmisión (Transmission Electron Microscopy, TEM) fueron usados a partir de principios de los cincuenta para el estudio de fracturas en metales. Con este tipo de microscopio se eliminaron algunas limitaciones del microscopio óptico, como la profundidad de campo y el rango de aumento, pero hubo problemas como el de interpretación, ya que las imágenes producidas eran considerablemente diferentes a las del microscopio óptico (éstas últimas no daban una visión en tres dimensiones). Los especímenes para el TEM deben ser razonablemente transparentes para los electrones y ser suficientemente pequeños para caber en la platina del microscopio. Se puede trabajar con secciones del metal o con réplicas, mismas que se hacen poniendo una capa de carbón o plástico y que es removida después. En ocasiones son muy difíciles de remover y son muy frágiles. El uso de réplicas es de gran ayuda cuando se necesita estudiar una estructura muy grande.

A mediados de los sesenta se desarrolla el microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscopy, SEM), con lo que el rol de los microscopios de transmisión cambió: ya no era necesario cortar la superficie en láminas delgadas para examinarla, puesto que se podían examinar las muestras directamente. El microscopio electró-

nico de barrido se usa para observación, determinar composición y manejo de materiales. Se le considera como una de las últimas generaciones de microscopios, pero no se aplica mucho en otros campos porque la muestra debe tener características especiales, como alta conductividad. Un espécimen no conductor acumula una gran carga negativa que interfiere en la visualización.

El SEM tiene capacidades únicas para el análisis de superficies por lo siguiente: la profundidad de foco, la posibilidad de cambiar de aumento sobre un amplio rango, la preparación no destructiva del espécimen con inspección directa y la apariencia tridimensional hacen de este instrumento una herramienta muy útil para la investigación de fracturas.

El SEM funciona de la siguiente forma: un rayo de electrones se mueve siguiendo un patrón de barrido en dirección x-y a lo largo del espécimen. Se puede controlar el tamaño del haz, la energía del mismo, así como la velocidad y área de barrido entre otras cosas. Los electrones son usados como fuente de radiación en lugar de fotones, con lo que se mejora la resolución. Simultáneamente, proporciona gran profundidad de campo y tiene un amplio rango de aumento (10x a más de 100,000x). Un espécimen visto al SEM libera señales al ser irradiado. Tales señales pueden ser analizadas si se cuenta con detectores apropiados. (Ref. 9) Las señales mencionadas pueden ser de: electrones secundarios, electrones retrodispersados y rayos x. El SEM cuenta con detectores para dichas señales y cada una proporciona una visión diferente del material, por ejemplo: el detector de electrones secundarios hace que la imagen esté basada en la topología de la fractura, mientras que con el detector de electrones retrodispersados la imagen se basa en el contraste entre materiales. Los electrones retrodispersados permiten observar datos de la composición del material ya que se basa en el contraste referido al peso atómico del material. Los electrones secundarios rebotan

directamente de la superficie, tienen una energía muy pequeña y permiten observar el contraste topográfico de la muestra; además, este detector permite aumentos mayores. En ocasiones especiales, como cuando el espécimen es muy grande o no es conductor, se hacen réplicas, pero en la mayoría de los casos una fractura metálica puede ser observada directamente en el SEM.

En general, el TEM proporciona aumentos mayores que el SEM, pero la preparación de las muestras es mucho más elaborada: deben cortarse laminillas muy delgadas del material o elaborar réplicas de la muestra, para que los electrones las traspasen. Puede decirse que la visión fractográfica SEM y TEM es muy cercana en la mayoría de los casos, sólo que el TEM proporciona básicamente información interna mientras que el SEM proporciona información externa, superficial.

Debido a los problemas introducidos por la necesidad de preparar réplicas de la superficie de fractura y por los avances en el SEM, los estudios con el TEM se redujeron, quedando los siguientes casos: donde se requiere gran resolución, como en el examen de estriaciones de fatiga muy finas, donde la superficie de un componente grande debe ser examinado sin seccionar la parte, donde es necesario estudiar la estriación de partículas para su identificación. (Ref. 8) Si no se cuenta con un SEM, el microscopio óptico puede ser usado, dando resultados satisfactorios.

En cuanto al SEM, es necesario mencionar que existe software para hacer el análisis de superficies de fractura. Un ejemplo de esto es el sistema FRASTA (o Fracture Surface Topography Analysis). (Ref. 19) FRASTA está diseñado para correr en una computadora Macintosh, la cual sirve también para controlar el microscopio. Pero debido al costo del microscopio tanto como el del mismo software y por el tipo de computadora, es muy difícil que la industria cuente con ellos. La presente tesis es una ayuda para hacer un tipo de análisis de fracturas

sin tener que recurrir a herramientas tan costosas, puesto que el software que diseñamos no necesita del SEM y puede funcionar casi en cualquier computadora PC. (Apéndice C)

LA ESTEREOLOGIA Y LA FRACTOGRAFIA CUANTITATIVA

La información que proporciona una fractura se encuentra en forma de proyecciones bidimensionales (perfil de fractura) o de proyecciones tridimensionales (superficie de fractura). Dada la dificultad que se presenta al analizar las imágenes de fracturas en tres dimensiones, se aplican las relaciones de la **Esterología** (o Metalografía Cuantitativa) a los parámetros obtenidos del perfil de fractura. La Esterología tiene que ver con los métodos para explorar el espacio tridimensional cuando se cuenta con información bidimensional. Por lo anterior, a la Esterología se le llama también extrapolación de dos a tres dimensiones. (Ref. 3)

La Esterología se basa en una visión uniaxial a diferencia de la Esteroscopia, la cual está basada en la visión biaxial puesto que parte de una visión paralela desde dos ángulos diferentes formando una escena en tres dimensiones, dando una percepción de relieve y profundidad. La Esterología es opuesta a la Fotogrametría, ya que ésta última utiliza imágenes tridimensionales para la construcción de mapas. La Esterometría (geometría de sólidos) tiene que ver con las propiedades de sólidos con formas convencionales. Entonces, la Esterología es una extensión de la Esterometría, en la que están incluidos objetos con formas más complejas. (Ref. 5)

Con la fractografía cuantitativa se expresan las características de las superficies de fractura en términos cuantificables, tales como área real, longitud, tamaño, orientación y posición. La automatización ha permitido que el análisis de imágenes sea una

de las herramientas más utilizadas en el campo de la fractografía cuantitativa, minimizando uno de los factores que influyen mucho en el análisis de las imágenes: la fatiga, puesto que éste es un trabajo muy tedioso que puede provocar que se reduzca la exactitud de las mediciones.

LA FRACTURA COMO UN PROBLEMA METALURGICO

En la industria metalúrgica se utilizan herramientas llamadas **dados de forja**, que sirven para dar forma a piezas metálicas de muy diferentes tipos. Los dados de forja trabajan a temperaturas muy altas y constantemente son golpeados, por lo que el material del que están formados debe ser resistente a las altas temperaturas y al impacto, ya que de otra forma se fracturarían rápidamente debido a las condiciones a que se exponen. La vida de un dado de forja depende de su tipo (forma), del tratamiento que haya recibido, de la temperatura de trabajo e incluso de la habilidad del operario para que los dados no se traslapen. Anteriormente se mencionó la diferencia en cuanto a las normas que se siguen para tratar a los metales y, en ese sentido, los forjadores mexicanos se quejan del acero producido en México, prefiriendo comprarlo en el extranjero pues el acero nacional se fractura muy fácilmente. En Estados Unidos el acero se recuece a temperaturas más altas, por lo que queda blando y no se fractura tan fácilmente. Las personas estudiosas de la metalurgia tienen que determinar el tratamiento que debe recibir el metal para prolongar su vida, tomando en cuenta las condiciones de trabajo que imperan en nuestro país.

En este trabajo se aplicará el **análisis de las imágenes** obtenidas de los perfiles de fractura, realizando el software de aplicación para determinar algunos parámetros importantes en fractografía cuantitativa y que pueden ser usados para encontrar un tratamiento térmico

adecuado.

Con el análisis de imágenes se pretende medir la longitud real del perfil para determinar el parámetro de rugosidad lineal y, con ésto, poder hallar el parámetro de rugosidad superficial. El parámetro de rugosidad superficial es una medida cuantitativa del grado de fragilización alcanzado en el acero.

ALGUNOS DETALLES SOBRE EL PROBLEMA A RESOLVER

El metal utilizado en el laboratorio es el acero AISI H-13, y fué elegido por cuatro razones:

1. Ya se contaba con varias muestras de éste,
2. hay estudios específicos sobre su fragilización, (Ref. 20)
3. es común que este acero se utilice en los dados de forja (ya que no es tan caro como otros aceros de la serie H) y,
4. porque presenta características de resistencia, en especial para trabajo en caliente (puede trabajar a 350°C).

El análisis que se realiza en este trabajo puede considerarse general puesto que la mayor parte de los aceros para herramientas tienen problemas y características similares.

A través de diversos estudios, se ha encontrado que el H-13 pasa por un proceso de fragilización (con el cual pierde algunas de sus propiedades) entre 500° y 550°C, y el grado de fragilización depende del tiempo que permanece en éste intervalo de temperaturas. Con dichos estudios se ha comprobado que la fragilización puede eliminarse usando tratamientos térmicos de recuperación luego de varias horas de trabajo (aproximadamente 200 horas). Estos tratamientos son superiores a 550°C. El control del proceso de

fragilización y su recuperación se determina por la rugosidad de la superficie de fractura.

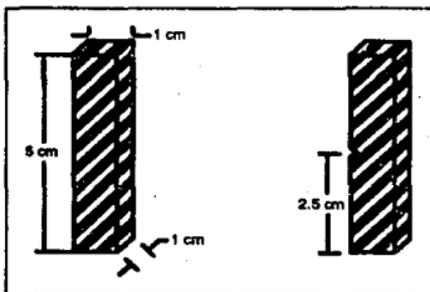
En resumen, con los tratamientos térmicos se pretende que el metal tenga ciertas propiedades como de dureza (para evitar el desgaste y la deformación) y de resistencia al impacto, la cual depende de la fragilidad del metal. La razón por la cual el acero llega al estado de fragilización es porque los metales a forjar en caliente se encuentran a temperaturas altas, sobrecalentando el dado.

PROCESO EXPERIMENTAL

El acero se coró para obtener muestras o probetas de impacto cuyas dimensiones son de 1x1x5 cm. (Fig. 1a) A las probetas se les hace una muesca a la mitad de su altura, es decir, a los 2.5 cm de altura la cual tiene dimensiones estandarizadas. (Fig. 1b) Las probetas son sometidas a tratamientos térmicos, los cuales incluyen templeado y dos revenidos. El temple consiste en precalentar el metal (815°C), calentarlo (990° a 1260°C) y después someterlo a un enfriamiento al aire para endurecerlo; en tanto que durante los revenidos se somete al metal a temperaturas relativamente bajas (200° a 500°C) con el fin de que se eliminen tensiones internas que son producto del temple. Es importante que el metal se someta a los revenidos con el fin de que no se agriete.

Después, las probetas son sometidas a ensayo de impacto, donde con un péndulo la probeta es golpeada a la altura de la muesca (misma que sirve para que las tensiones se concentren en el centro) y se provoca su fractura. La fuerza aplicada es medida dependiendo del impulso final del péndulo. Mientras más suba el péndulo después de fracturar el metal, más frágil será el metal.

Fig. 1 a) Geometría de una probeta
b) Punto de ruptura



Uno de los métodos para examinar el perfil de fractura consiste en obtener rebanadas delgadas del perfil para su mejor observación, especialmente en el TEM. Más adelante se explicará algo sobre éste y otros métodos.

En ocasiones, para preservar las características de la fractura, ésta es recubierta con una capa de oro o de carbono y es cortada perpendicularmente. La sección obtenida del corte es pulida para que el perfil de fractura aparezca en forma más nítida. En este caso la probeta se corta sólo en dos partes. Una vez que se tiene lo anterior, la sección se prepara para su observación en el microscopio óptico—cuando no se cuenta con el SEM—, del cual puede obtenerse una fotografía. Para que dicha fotografía pueda ser analizada automáticamente en la computadora, se necesita discretizarla, para lo cual se utiliza un scanner y un programa que pueda desplegar el archivo resultante. Esto se explicará en el capítulo siguiente.

Además de probar este método, se trabajará con un microscopio electrónico de barrido que se encuentra conectado a una computadora, pudiéndose obtener directamente el archivo con la imagen.

EXAMEN VISUAL PRELIMINAR

Toda superficie de fractura debe ser inspeccionada visualmente para identificar el lugar de inicio de la fractura y para aislar áreas en la región de iniciación de la fractura que puedan ser más representativas para análisis posteriores. También es posible encontrar imperfecciones del material, presencia de capas en la superficie, soldaduras y otros detalles estructurales que contribuyen a la fractura. El origen de la fractura a menudo contiene la pista para encontrar su causa, y el examen con alto y bajo aumento es crítico para un análisis preciso de la falla. (Ref. 4) Como ya se mencionó, las marcas en la fractura, formadas durante el evento, son como un mapa que el analista usa para evaluar la fractura. La iniciación y propagación de la fractura producen ciertas marcas características sobre ésta que indican la dirección del crecimiento. (Ref. 6)

El examen visual de las fracturas es usado desde hace años. A esto se le llama macrofractografía, o examen de las superficies de fractura con la ayuda del ojo humano, o a bajos aumentos. Gran número de procedimientos de control de calidad cuentan con exámenes visuales de la fractura. Aunque el microscopio óptico puede ser usado para examinar la superficie de fractura, la mayoría de los exámenes a más de 50x (microfractografía) son hechos con el microscopio electrónico de barrido. (Ref. 6)

CUIDADO Y MANEJO DE LAS FRACTURAS

Antes de hacer cualquier análisis sobre la superficie de fractura se debe tener en cuenta que éstas son frágiles y están sujetas a daños mecánicos y ambientales que pueden destruir sus características microestructurales. Consecuentemente, los especímenes de fractura deben manejarse cuidadosamente durante todas las etapas del análisis.

Dichos daños pueden clasificarse en químicos y mecánicos, y pueden ocurrir durante o después de que se fracture el metal. El daño químico es resultado de las condiciones ambientales. Si el ambiente adyacente al avance de una fractura es corrosivo, la superficie de fractura resultante se encontrará químicamente dañada. Se considera que el aire húmedo es agresivo para la mayoría de los aceros causando oxidación. Asimismo, tocar la superficie de fractura con los dedos le dará humedad y sales que pueden atacarla. El daño mecánico de la superficie de fractura usualmente resulta de las condiciones de carga. Si la condición de carga es tal que las superficies de fractura estén en contacto una con otra, las superficies se dañarán mecánicamente. Otros daños mecánicos pueden ocurrir durante el manejo y traslado de las piezas fracturadas, y también si la técnica de análisis incluye el seccionamiento de la misma.

Una vez que se ha dañado mecánicamente una fractura, no se puede hacer nada para remover dicho daño de su morfología. Sin embargo, si ocurre daño químico, y éste no es muy severo, se pueden implementar técnicas que remuevan la capa oxidada o corroída de la superficie, restaurándola a un estado representativo de su condición original. (Ref. 4)

TECNICAS DE PRESERVACION

A menos que una fractura sea evaluada inmediatamente después de que es producida, ésta debe preservarse tan pronto como sea posible con el fin de prevenir el ataque del medio ambiente. La mejor manera de preservar una fractura es secarla con aire y guardarla en un lugar seco. Sin embargo, el aislamiento de la fractura a menudo no es práctico. Es entonces cuando se aplican capas superficiales de anticorrosivos. La desventaja de usar estos recubrimientos es que con ellos desaparecen algunos rasgos que a menudo proporcionan

información sobre la causa de la fractura. Sin embargo, es posible utilizar solventes para quitar dichos recubrimientos. Los requerimientos principales para poder aplicarlos son: que no exista reacción química con el metal base, que ayude a prevenir el ataque químico del medio ambiente, y que pueda ser removido en su totalidad sin dañar la superficie. Se pueden usar lacas acrílicas transparentes o recubrimientos plásticos, los cuales pueden removerse con solventes orgánicos. Es importante notar que en superficies muy rugosas puede ser muy difícil cubrir por completo la superficie, y en su caso, remover la capa. Hay también compuestos a base de petróleo (aceites) que protegen la superficie de fractura y pueden removerse fácilmente.

TECNICAS DE LIMPIEZA DE FRACTURAS

Las superficies de fractura expuestas al ambiente, pueden contener gran cantidad de elementos indeseables debido a que se encuentran oxidadas o corroídas. Para limpiar dicha superficie se tienen varias técnicas, como la limpieza con cepillo de fibra orgánica, la limpieza con solventes orgánicos o el uso de detergentes. Ya que hay varias técnicas para limpiar la superficie, es conveniente aplicar inicialmente la que sea menos agresiva. (Ref. 4)

SECCIONAMIENTO DE UNA FRACTURA

En ocasiones es necesario remover la porción que contiene a la fractura de la parte total con el fin de que el espécimen tenga un tamaño conveniente. Por ejemplo, el SEM limita el tamaño del espécimen a examinar. Los cortes se hacen cuidadosamente en forma perpendicular a la dirección del plano de fractura, y a una distancia suficiente, para que no se dañen los detalles estructurales de la fractura. Los cortes usualmente se hacen con un disco de diamante.

CAPITULO

2

2. DESARROLLO DE LAS TECNICAS APROPIADAS DE RECONOCIMIENTO DE IMAGENES

Síntesis

Una de las formas de encontrar el índice de fragilización de un metal, así como información del proceso de ruptura, es utilizando el método de análisis cuantitativo de la fractura. Se sabe que a partir de los parámetros lineales obtenidos del perfil de la fractura se puede hacer una extensión hacia parámetros tridimensionales, es decir, no es necesario analizar superficies de fractura, sino perfiles. Con ayuda de la computadora y teniendo el archivo que contiene a la imagen del perfil, se puede aplicar el análisis de imágenes para encontrar dichos parámetros.

El Procesamiento Digital de Imágenes desde un punto de vista computacional es una herramienta de aplicación a problemas reales que involucran la mejor forma de despliegue para hacer un análisis de imágenes. Esto quiere decir que a partir de ciertos algoritmos computacionales aplicados a las imágenes discretizadas se puede perfeccionar la forma en que se ve una imagen para obtener una de mejor calidad.

El parámetro más importante a obtener de la imagen de la fractura, es el de la rugosidad lineal, el cual se obtiene de la medición del perfil.

Existen diversas fuentes para obtener las imágenes de perfiles: de un microscopio electrónico de barrido conectado a la computadora, de fotografías digitalizadas o discretizadas, de cámaras de video, etc. Algunas de estas opciones son demasiado costosas económicamente como para suponer que una empresa las posea, por ello nos basamos en el

análisis de fotografías digitalizadas a través de un scanner.

En el programa que se desarrolló se trabaja con un formato específico de imágenes, llamado formato TIFF, el cual es considerado estándar. Fué difícil hacer el despliegue de las imágenes pues la información contenida en los archivos de este tipo no nos era conocida. Además del algoritmo de despliegue, se implementan otros algoritmos con la finalidad de mejorar la imagen y hacer las mediciones necesarias.

TECNICAS DE ANALISIS DE FRACTURAS

Es sabido que, desde hace años, los datos microestructurales de las fracturas se han obtenido en su mayoría de acuerdo con la comparación de gráficas. En años recientes se han utilizado las relaciones estereológicas para describir las características microestructurales. (Ref. 7)

Es común que se requiera hacer un análisis global de la topografía de la superficie, y también se necesita en ocasiones el análisis de partes localizadas de la superficie de fractura; pero de cualquier forma es importante contar con un equipo automático que pueda analizar las imágenes. El uso de dispositivos automatizados elimina lo tedioso de las mediciones manuales, reduce el tiempo de análisis y permite mediciones más exactas. La aparición de computadoras cada vez más potentes ha ayudado al desarrollo de tales herramientas. Durante los últimos diez años, la importancia del análisis cuantitativo de imágenes de superficies de fractura se ha incrementado, como en los campos de la ciencia, biología, geología, medicina, petrografía, etc.

Es reciente la aparición de un número significativo de aplicaciones de procesamiento de imágenes en la industria, y la razón de ello es que había que probar que existiría un claro beneficio económico sobre los métodos alternativos. Durante los últimos años, el costo de los dispositivos de almacenamiento, de detección de imágenes, así como el del equipo de cómputo, ha traído un buen número de aplicaciones de este tipo a la industria, ya que ahora se les considera como viables económicamente. El beneficio de este tipo de aplicaciones puede ser directo, como una reducción en los costos de producción, o puede ser indirecto, como un ambiente menos peligroso o más ligero físicamente.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES

En el área de la fractografía el análisis de imágenes consiste en la selección de las muestras metálicas, su preparación, obtención de la imagen, procesamiento de imágenes, medición, análisis de los datos y salida de los mismos. La selección de muestras debe ser sistemática y bien planeada para asegurar que las muestras analizadas sean representativas. Esto quiere decir que deben ser tratadas cuidadosamente, como antes se explicó, para que no hayan medios externos que influyan sobre sus características estructurales.

El término *imagen* se refiere a una función bidimensional de la intensidad de la luz $f(x,y)$, donde x e y denotan coordenadas espaciales y el valor de f en cualquier punto (x,y) es proporcional al brillo de la imagen en ese punto. Las imágenes que percibimos durante el día normalmente consisten en la luz que se refleja de los objetos.

Una *imagen digital* es la aproximación de una imagen continua que es desplegada como un conjunto discreto de puntos brillantes, o sea, es discretizada en sus coordenadas espaciales y en brillo (Ref. 18) Usualmente se almacena en la computadora como una matriz de muestras discretas cuya separación es la misma. Los índices de la matriz se refieren a renglones y a columnas, e identifican a un punto en la imagen; mientras que el elemento matricial correspondiente identifica un valor de intensidad en ese punto.

Cada muestra o punto es referido como un elemento de la imagen o pixel. Cada pixel puede verse como una región rectangular de tamaño finito sobre la pantalla. El tamaño de la imagen varía de acuerdo con la aplicación y, en el caso de las que aquí se manejan, es de $N=640$ y $M=360$ con 4 bits por pixel.

A los renglones de una imagen digital se les llama líneas de barrido. La cantidad de píxeles por línea depende del sistema. La resolución del sistema es un factor importante que depende del número de puntos en la imagen y se refiere a la claridad con que se pueda ver una imagen.

La intensidad de una imagen monocromática f en las coordenadas (x,y) será llamada el nivel de gris de la imagen en ese punto. La escala de gris se considera como el intervalo entre el color negro y el blanco.

Dentro del procesamiento de imágenes se tienen tres áreas:

- a) Digitalización y compresión: las imágenes se convierten a su forma discreta (digital) y son codificadas.
- b) Realce, restauración y reconstrucción: con diferentes algoritmos las imágenes pueden ser mejoradas, ya que en ocasiones no tienen buen contraste o contienen ruido.
- c) Descripción y reconocimiento: se comparan y registran imágenes, segmentándolas en partes, haciendo mediciones. (Ref. 17)

DIGITALIZACION

Para poder procesar una imagen en computadora, es necesario digitalizarla. Esto es posible a través de un sistema de adquisición de imágenes digitales, un dispositivo que recorre la escena y genera un arreglo de números que representan las intensidades en un conjunto discreto de puntos. Estos dispositivos cuentan básicamente con tres componentes: un sensor para medir la luz, hardware para realizar el barrido y un convertidor analógico-digital. Los sistemas de adquisición de imágenes digitales abarcan a muchos de los dispositivos de entrada más comunes, incluyendo cámaras de video y scanners.

La imagen digital de la fractura puede obtenerse de varias formas:

- Utilizando el scanner sobre las fotografías del perfil,

- por medio de una cámara de video conectada a la computadora,
- a través de un SEM conectado también a la computadora.

Una forma de hacer la medición del perfil de fractura sin recurrir al análisis de imágenes es con una tableta digitalizadora. Usando un cursor se debe recorrer el perfil de fractura en la fractografía, oprimiendo cada vez un botón de control que ayude a registrar las coordenadas de los puntos. Este método de medición es inconveniente porque es necesario medir un gran número de puntos para obtener un mapa o perfil suficientemente preciso, lo que conlleva un gasto excesivo de memoria para almacenar las coordenadas.

Uso de fotografías y scanner

La fotografía juega un rol importante para archivar o registrar las características de una fractura. Este tipo de fotografías son llamadas **fractografías**. Para fotografiar los detalles de una fractura es importante que se cuente con la iluminación apropiada y con equipo de buena calidad; también se debe tener conocimiento de la forma correcta en que se usa dicho equipo. (Ref. 5)

Para poder realizar el análisis de las fracturas, contamos con fotografías de los perfiles de fractura vistos desde un microscopio óptico. Se utilizó un scanner para obtener el archivo digital necesario y así poder hacer el despliegue de la imagen en la computadora.

Los scanners electrónicos usan un fotodetector el cual es una superficie cubierta con material fotosensible que responde a la luz incidente proyectada por una imagen. La imagen y el fotodetector permanecen estacionarios. El barrido es hecho con un foco que se mueve dando luz a un CRT, y su movimiento es controlado electrónicamente.

Hay también scanners mecánicos, que se caracterizan por sus partes móviles que transportan al material y los fotosensores pasan sobre la imagen. (Ref. 14)

Uso de cámara de video

Para manejar este tipo de equipo y obtener las imágenes de las fracturas se requiere que el equipo de cómputo tenga características especiales en cuanto a la resolución de la pantalla, memoria, almacenamiento en disco, etc. También es necesario adquirir la tarjeta y el software especial para manejar la cámara de video. Es importante que la cámara pueda permitir grandes aumentos debido al tamaño de las probetas.

En cuanto a costo, actualmente un scanner cuesta alrededor de \$1500 dls, mientras que la cámara de video con la tarjeta y el software cuestan aproximadamente \$3000 dls. La parte económica también influye en la decisión del tipo de equipo que usamos.

Uso del SEM para obtener imágenes

Cuando se usa este dispositivo, se deben hacer los ajustes necesarios para asegurar que se presenta la mejor imagen, debe estar limpio y alineado correctamente. La calidad óptica del microscopio es importante para obtener la imagen óptima. La elección del aumento puede influir en los resultados de las mediciones. Por ejemplo, se sabe que si la superficie de la muestra no es perpendicular al rayo, el aumento variará a lo largo de la imagen, introduciendo un error considerable. El área de campo disminuye al incrementarse el aumento, lo cual también puede ser un problema.

En una imagen SEM hay dos tipos de distorsión: error de perspectiva debido a la inclinación de la superficie y error de aumento. Este tipo de imágenes se presentan relativamente deformadas en los bordes debido al lente del microscopio. (Ref. 22)

En el Centro de Diseño Mecánico de esta Facultad, se cuenta con un microscopio electrónico de barrido con interfaz hacia una computadora, lo cual permite obtener directamente el archivo de la imagen. Con el objeto de hacer comparaciones y obtener las mejores imágenes de los perfiles de fractura, también se utilizó éste equipo. Tales imágenes fueron de muy buena calidad y pudieron ser grabadas con formato TIFF.

Para obtener las imágenes del SEM se utilizó el detector de electrones retrodispersados ya que en este caso se observó que es más útil para el trabajo en la computadora puesto que el perfil de la fractura se ve más detallado debido al contraste. Usando el software de manejo del SEM, las imágenes son desplegadas sobre la pantalla de la computadora o CRT, y se tiene la posibilidad de obtener videoprints en una pequeña impresora térmica, así como en una película fotográfica.



Img. 1 Imagen obtenida del SEM a 9x.
Probeta de acero H-13 tratado a
1010° C.



Img. 2 Al observar la misma imagen con mayor aumento (39x), no es posible tener el perfil completo a la vista.



Img. 3 Con un aumento de 79x, la imagen presenta detalles que hacen que el recorrido del perfil sea muy difícil.

En general los errores que se pueden encontrar al analizar las imágenes pueden ser producto de la representatividad de la muestra, errores de instrumentación, uso indebido de las relaciones estereológicas o la preparación inadecuada de las muestras. (Ref. 7)

Formatos de las imágenes

La información proveniente del scanner y de otros dispositivos se almacena en archivos con un formato específico -puede ser en bytes o words, por ejemplo-. En el mercado hay muchos formatos para los archivos de imágenes. Para desplegar la información es necesario conocer el formato del archivo.

Hay tres tipos básicos de formatos: raster, vector y metafiles. Los archivos de barrido o raster, involucran la descripción del color de cada punto en una imagen dada, dicha imagen estará formada por varias líneas y columnas de puntos. Los vector files no contienen información sobre puntos específicos, sino una descripción o código de los objetos usados para crear una imagen. Por último, los metafiles son archivos que combinan la información de los dos primeros, sin embargo, muy poco software crea este tipo de archivos.

Los archivos raster son los indicados para imágenes provenientes del scanner, para patrones aleatorios y para texturas. Los archivos tipo vector son los indicados para objetos dibujados tales como líneas, círculos, cuadrados, texto, etc. (Ref. 16)

Los archivos de imágenes típicamente tienen dos partes, la primera se conoce como el File Header o encabezado del archivo y contiene información de la imagen como un todo (versión, longitud del encabezado, identificador del tipo de la imagen, esquema de color, ancho o número de columnas, número de renglones, requerimientos de modo gráfico, número de colores, resolución, etc). La segunda parte es conocida como Image Data o datos de la imagen, que contiene a los puntos en sí. Si el archivo es de barrido -como es nuestro caso-, contendrá una larga lista de números, donde cada número representa el valor de un color.

Los nombres de algunos formatos muy usados, y las extensiones de los archivos correspondientes son: ASCII text (TXT), AutoCAD DXF (DXF), GEM Image (IMG), Lotus (PIC), PC Paintbrush (PCX), PM Bitmap (BMP) y TIFF (TIF). En este caso, el formato de las imágenes que se usa es TIFF (Tag Image File Format).

Debido a que inicialmente la información encontrada sobre este formato fué muy poca, se analizó la información contenida en los encabezados de varios archivos TIFF. Se encontraron datos importantes como los del tamaño del archivo -número de columnas y de renglones- y el tamaño del mismo encabezado. A partir de lo anterior, las imágenes contenidas en los archivos pudieron ser desplegadas. Tiempo después se encontró más información sobre el formato, lo que permitió hacer el despliegue contando con otros datos.

Formato TIFF

Es un formato estándar usado en muchas aplicaciones que trabajan con gráficos de barrido. Se desarrolló en 1986 por Aldus Corporation y Microsoft. Es el formato de barrido más versátil hoy en día. Se diseñó para proveer las bases para importar imágenes del scanner hacia los paquetes de publicidad. Como su nombre lo indica, el formato se basa en el uso de etiquetas o identificadores, los cuales estructuran los datos. Las etiquetas se encuentran en grupos de datos llamados IFD's (Image File Directory). Cada IFD contiene: 2 bytes que indican el número de campos o de etiquetas, seguido por una secuencia de 12 bytes para cada etiqueta y por 4 bytes de offset al siguiente IFD si es que éste existe.

Cada grupo de 12 bytes tiene el siguiente formato:

2 bytes cuyo valor corresponde al número (nombre) de etiqueta,
2 bytes con el tipo del dato (1=byte, 2=ASCII, 3=short o 16 bits,

4=long o 32 bits, 5=rational con 32 bits para el numerador y 32 bits para el denominador),
 4 bytes con la longitud del campo y
 4 bytes con el valor de la etiqueta (dato).

El encabezado del archivo TIFF contiene la siguiente información:

Byte #	Descripción
0-1	Byte order. Determina cómo se debe leer la información, o sea, si del MSB (bit más significativo) al LSB (bit menos significativo) o en sentido inverso. En el primer caso valen 4949H y en el segundo 4D4DH.
2-3	Version number. Siempre es igual a 42.
4-7	Apuntador al primer grupo de etiquetas, llamado Image File Directory (IFD).

Tabla 1 Encabezado del formato TIFF. (Ref. 16)

En el apéndice A se da un ejemplo del formato TIFF.

REALCE, RESTAURACION Y RECONSTRUCCION

En esta fase del procesamiento se incluyen métodos para modificar la escala de grises (incrementando el contraste), así como para la suavización y remoción de ruido.

Las técnicas de mejoramiento de la imagen son diseñadas para compensar los efectos de un proceso de degradación específico. Se les conoce también como restauración de imágenes. Se usan para hacer más aceptables las imágenes y así poder usarlas eficientemente. En general, se pueden suprimir características o detalles de una imagen, o en su caso, enfatizarlas. La calidad de la imagen depende del

propósito de la misma; en el caso de las imágenes que se manejan aquí, es necesario que éstas tengan mucho contraste para obtener un perfil perfectamente bien delineado, y que estén libres de ruido, mismo que podría alterar los parámetros obtenidos en la medición del perfil.

Una imagen es susceptible de contener ruido, el cual puede ser de muchos tipos. En ocasiones el ruido es independiente de la imagen, como el proveniente de los dispositivos de captura.

FILTROS

Son usados típicamente para remover el ruido y para la reducción de efectos no deseados en una imagen. Tienen efectos de suavización. (Ref. 15) Los filtros que utilizamos se explican a continuación.

Filtro de promedio

Dada una imagen de $n \times n$, $f(x,y)$, el procedimiento para generar una imagen filtrada $g(x,y)$ es haciendo un promedio de los valores de los niveles de gris de los píxeles de f contenidos en una vecindad predefinida de (x,y) . En otras palabras, la imagen filtrada es obtenida usando la relación:

$$g(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{(n,m) \in S} f(n,m)$$

para $x,y=0,1,\dots,n-1$. S es el conjunto de coordenadas de puntos en la vecindad del punto (x,y) , incluyendo al mismo (x,y) , y M es el número total de puntos en la vecindad (ventana). (Ref. 18) Debido a la facilidad de implementación, usualmente las ventanas son cuadradas.

Filtro de mediana

En el filtro de mediana la intensidad de la imagen de salida en una localidad x es elegida sobre la base del grado relativo de intensidad de los pixeles que se encuentran en la vecindad de x . Dado un conjunto de n intensidades de pixeles obtenidas sobre una región local de la imagen, S , denotada por $f_i, i=1,2,\dots,n$, se hace un ordenamiento de esos valores en forma incremental, esto es, $R(x)=\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ donde $f_i < f_{i+1}$. La intensidad de la imagen de salida $g(x)$ es:

$$g(x) = \text{grado}_j R(x)$$

donde grado_j es la intensidad de salida en la posición o grado j en $R(x)$ y que corresponde a la posición media del ordenamiento.

Si una imagen con variaciones muy leves de grises tiene cierto tipo de ruido como un pico o impulso, un filtro de paso bajo tendería a distribuir la intensidad del ruido sobre los pixeles que rodean al pico. En contraste, el filtro de mediana remueve este tipo de ruido en la imagen sin otra degradación. Por ejemplo, si se tienen 5 muestras de intensidades en la vecindad de un pixel: $R(x)=\{100, 110, 120, 130, 240\}$, se observa que el valor de 240 es un pico de ruido o una característica especial de la imagen. En este caso, la salida del filtro es $g(x)=120$.

La vecindad de pixeles o la forma de la ventana escogidos para este filtro determinan en mucho los efectos de filtrado. La forma de la ventana debe estar de acuerdo a la imagen, es decir, se elige a priori de acuerdo con las características de ruido que la imagen presente, ya sea con orientación vertical u horizontal. Los tipos de ventanas pueden ser: de $n \times n$, en forma de cruz, como una tira vertical o como tira horizontal.

El filtro de mediana tiene varias propiedades:

- Reduce la varianza de intensidades en la imagen,
- cambia la intensidad principal de la imagen si la distribución del ruido no es simétrico con la ventana,
- preserva ciertas formas de los bordes o límites que se encuentren. (Ref. 15)

Realce de bordes

La información del borde conlleva datos de la imagen y, consecuentemente, de la escena. Un borde en una imagen continua se define como una transición de intensidades agudas entre pixeles vecinos.

Los cambios o discontinuidades en los atributos de una imagen, como la iluminación o la textura, son fundamentales ya que ellos proveen una indicación de la extensión física de los objetos de la imagen. Si se trata de recorrer el perfil de fractura en una imagen, es vital que no se encuentren tales discontinuidades. En este caso, ese perfil es lo que en procesamiento digital de imágenes se denomina borde. Existen varias técnicas para acentuar los bordes antes de hacer una detección de los mismos. (Ref. 21) Si se trata de una mejora horizontal, se utiliza la relación $G(j,k)=F(j,k)-F(j,k+1)$ y, en sentido vertical $G(j,k)=F(j,k)-F(j+1,k)$.

Algoritmo de Roberts

Roberts introdujo un método de realce de bordes en el cual se utiliza la siguiente operación:

$$G_r(j,k) = \{ [F(j,k) - F(j+1,k+1)]^2 + [F(j,k+1) - F(j+1,k)]^2 \}^{1/2}$$

Al aplicar la operación anterior, el borde es definido y aislado. Otra operación, la cual tiene una forma computacional más simple, es:

$$G_x(j,k) = |F(j,k) - F(j+1,k+1)| + |F(j,k+1) - F(j+1,k)|$$

DESCRIPCION Y RECONOCIMIENTO

Se trata del desarrollo de un programa con el cual puedan ser medidas ciertas características del perfil de fractura.

Las mediciones se hacen basadas en el número y distribución de los puntos de la imagen con respecto al tamaño de la línea de barrido y al total de puntos de la imagen.

En el desarrollo de la tesis pasamos por las tres áreas del procesamiento de imágenes que se acaban de explicar, en seguida se indican los algoritmos utilizados.

EXPLICACION DE LOS PROGRAMAS REALIZADOS

PROGRAMAS DE DESPLIEGUE Y FILTRADO

En un principio, no contábamos con ningún dato sobre el formato TIFF, por lo que el programa de despliegue se hizo después de muchas pruebas y análisis de archivos. Mas tarde encontramos la información suficiente para hacer algunas correcciones a nuestro programa, haciendolo más completo y funcional.

Primero se lee la parte del encabezado, se verifica que el archivo no esté comprimido ya que no tenemos información para desplegar archivos de ese tipo. Después se va leyendo cada word de información,

y se despliegan como pixeles con el color que indique su valor. El lugar que toma en la pantalla depende de los contadores que indican renglón y columna.

Una vez que se contó con el programa de despliegue de la imagen, fué necesario lograr que dicha imagen tuviera buena calidad. Cabe destacar que una buena imagen puede depender de la calidad de las fotografías (contraste) o de la resolución del scanner, entre otras cosas.

Se realizó otro programa para desplegar la imagen únicamente en dos colores o niveles (blanco y negro), con la finalidad de que el perfil de la fractura estuviese perfectamente definido. El algoritmo transforma la imagen de niveles de gris a blanco y negro, donde los puntos blancos corresponden a aquellos cuyo nivel es superior a un valor dado, llamado umbral. Al realizar esta acción, en la imagen del perfil pueden aparecer huecos, discriminándose algunos detalles importantes. Para realizar el análisis de la imagen, rastrearla y medir la longitud del perfil de fractura, es necesario que dicho perfil sea continuo, por lo que el programa anterior no fué adecuado.

Después de varias pruebas con el scanner, se encontró que si se digitalizaba a 16 niveles de gris, se podría obtener una mejor definición del perfil usando las transformaciones propias del procesamiento digital de imágenes.

Primero implementamos el algoritmo de Roberts para realizar el borde o perfil de la imagen, pero no fué adecuado a nuestras necesidades ya que se perdía información importante del borde del perfil y el ruido permanecía en la imagen, lo cual impedía el uso de un algoritmo de medición.

Después de estudiar más a fondo el procesamiento digital de imágenes,

nos dimos cuenta de que lo que necesitábamos no era resaltar el borde sino filtrar la imagen, esto es, eliminar las impurezas que impiden el rastreo del perfil. Para lo anterior programamos los filtros de mediana y de promedio, y obtuvimos buenos resultados. A pesar de que el filtro de promedio suaviza los bordes, durante las pruebas obtuvimos resultados satisfactorios, pero en la versión final de Fractus solamente incluimos el filtro de mediana por ser el que menos afecta las características del perfil.

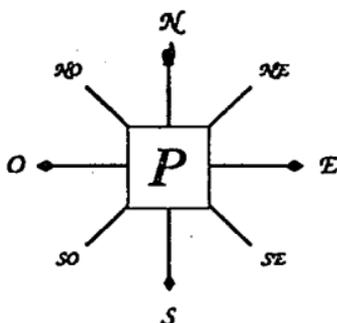
Con la finalidad de que el software fuera fácil de usar fué implementado en base a ventanas e iconos.

MEDICION DEL PERFIL

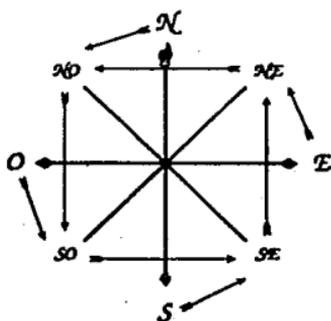
Una vez que contamos con la imagen filtrada se procedió a diseñar un algoritmo capaz de medir la longitud del perfil de fractura. El algoritmo se explica a continuación:

Partiendo de que el perfil de fractura se tiene de forma horizontal, se necesita un valor inicial y uno final en X (que llamaremos X_1 y X_2) para medir la fractura en ese rango. Tomando en cuenta que la imagen es una matriz de pixeles, el paso siguiente es recorrer la columna de X_1 de arriba hacia abajo. Cada punto de la columna es probado con la finalidad de checar si pertenece o no al perfil. Esto es posible ya que el fondo de la imagen filtrada es de color negro y la fractura es de color blanco. Una vez que se detecta el cambio de negro a blanco sabemos que ya se llegó al perfil. Al primer punto detectado del perfil lo llamaremos P . Lo siguiente es rastrear todo el borde hasta llegar a un pixel cuya coordenada en X sea igual a X_2 . Para lograr esto se deben analizar los pixeles en la vecindad de P y determinar cual es el siguiente pixel que pertenece al perfil. A los pixeles en la vecindad de P se les asignó un punto cardinal, esto

es, el pixel que esté arriba de P será el pixel Norte, el que esté a la derecha será el pixel Este, el que esté abajo será el pixel Sur, y así con cada uno de los ocho pixeles.

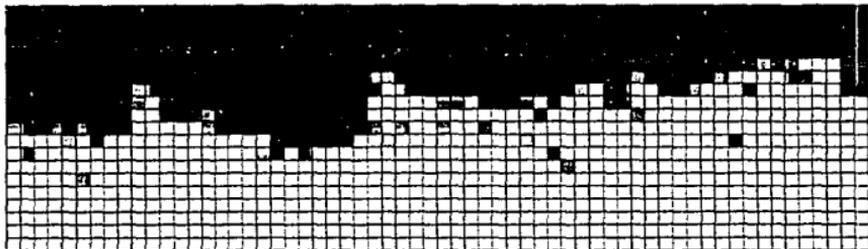


Utilizando los puntos cardinales como sistema de referencia se procedió a analizar el movimiento de búsqueda del siguiente pixel, llegando a encontrar que el adecuado es como se muestra en la siguiente figura.

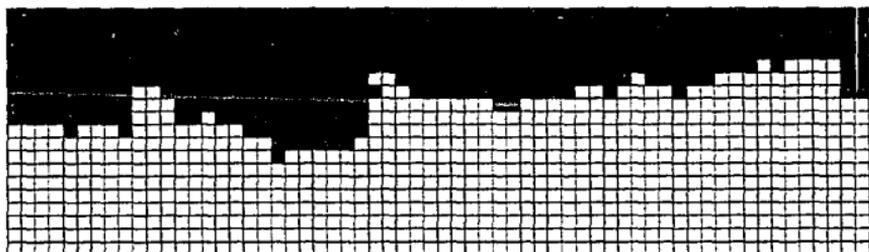


El diagrama anterior nos dice que si el movimiento del pixel fué hacia el Norte, el siguiente pixel que se debe probar será el que se encuentra en el Noroeste, o si el movimiento del pixel fué hacia el Sureste,

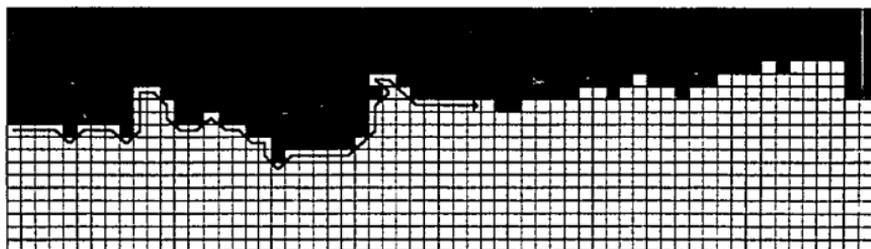
el siguiente pixel que se debe probar será el que se encuentra en el Noreste. Si el pixel que se probó no pertenece al perfil, o sea que es de color negro, el siguiente pixel que se debe probar es el que se encuentra en el sentido horario. (Img. 4,5,6)



Img. 4 Acercamiento de una imagen sin filtrar, se puede ver que el borde del perfil no está bien definido, lo cual impide que se pueda realizar una medición exacta del mismo.



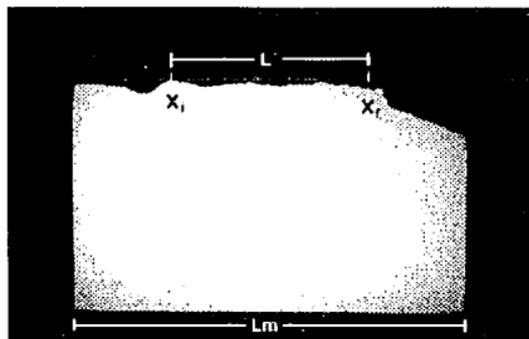
Img. 5 Acercamiento de una imagen filtrada, se puede ver que el borde del perfil está bien definido, lo cual facilita una medición exacta del mismo.



Img. 6 Acercamiento de una imagen filtrada. Se indica el recorrido que sigue el algoritmo de medición sobre el borde.

La longitud del perfil será la suma de las distancias recorridas entre los píxeles. Entre dos píxeles contiguos de manera vertical u horizontal la distancia será unitaria, mientras que entre dos píxeles contiguos de manera diagonal, la distancia será $\sqrt{2}$.

Para obtener la longitud proyectada L' (Img. 7) es necesario proporcionarle a la computadora el dato de cuánto mide la muestra de lado a lado en centímetros, L_m , dividir esta cantidad entre el número de píxeles que esto representa en la pantalla X_m y esta relación multiplicarla por la longitud proyectada en píxeles X' .



Img. 7 Si indican algunas de las variables involucradas en el algoritmo de medición.

Esto es:

$$L' = \frac{L_p}{X_p} X'$$

Para obtener la longitud aparente L_p , se divide L' entre X' y se multiplica por la longitud aparente en pixeles X_p .

$$L_p = \frac{L'}{X'} X_p$$

Con estos dos datos se pueden obtener la rugosidad lineal y otros parámetros como se indica en el siguiente capítulo.

DIMENSION FRACTAL DEL PERFIL

El algoritmo con el que se encuentra la dimensión fractal se explica en el capítulo 4.

El pseudocódigo de los dos algoritmos anteriores se incluye en el apéndice B.

CAPITULO

3

3. CUANTIFICACION DE PARAMETROS FRACTOGRAFICOS

Síntesis

El principal objetivo de la fractografía cuantitativa es expresar las características de las superficies de fractura en términos cuantitativos tales como área real, longitud, rugosidad, tamaño, espaciamiento, orientación y localización. La importancia de cuantificar superficies de fractura es para entender el rol preciso que juega la microestructura del material en el proceso de fractura.

Como se vió en el capítulo anterior, la aplicación del análisis de imágenes en el campo de fractografía elimina la dificultad del proceso manual. A partir de la obtención de parámetros como el de rugosidad lineal, se pueden aplicar las relaciones estereológicas y determinar otras cantidades de interés en la superficie.

Un valor pequeño de rugosidad indica que la fractura es relativamente plana, mientras que un valr grande indica que la superficie es más irregular.

IMPORTANCIA DE LA CUANTIFICACION DE PARAMETROS

El análisis cuantitativo de las microestructuras fracturadas permite obtener información de algunos mecanismos microestructurales involucrados, información que no se puede obtener cuantitativamente por otros métodos de investigación. La cuantificación de los parámetros sirve para entender cómo cambia la microestructura, en cuanto a sus propiedades y comportamiento.

La principal aplicación del análisis de imágenes en la ciencia de los materiales es en la medición de rasgos microestructurales para evaluar procesos de producción, esto es, en el control de la calidad.

La fractografía cuantitativa está basada en los principios del análisis cuantitativo de imágenes, porque es posible expresar la información contenida en una fractografía o en una microfractografía en forma paramétrica.

CARACTERIZACION PARAMETRICA DEL PERFIL DE FRACTURA

Los métodos y medios para el estudio de fracturas han avanzado. Es evidente que es más fácil analizar un perfil que una superficie de fractura.

Cuando se trabaja en el área de fractografía cuantitativa, en principio la investigación debe enfocarse a la rugosidad del perfil -rugosidad lineal-, ya que el parámetro que la representa es el que permite hacer derivaciones hacia otros parámetros.

En un lenguaje no técnico, se entiende por rugosidad al aspecto irregular o áspero de una superficie.

El perfil de fractura puede definirse con el parámetro de rugosidad lineal R_L . Este parámetro por sí mismo es insuficiente para describir la morfología del perfil, ya que varios perfiles pueden tener el mismo índice de rugosidad lineal, pero con una apariencia diferente. (Fig. 2) Para evitar confusiones, se utilizan otros parámetros que permiten diferenciar a dichos perfiles.

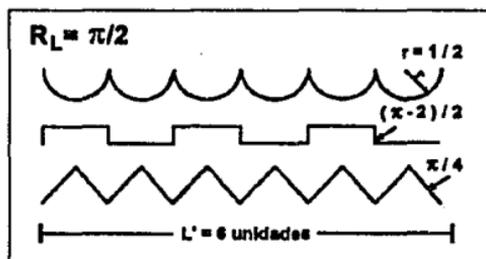


Fig. 2 Tres perfiles diferentes con valores idénticos de rugosidad lineal.

Por otro lado, así como el perfil está caracterizado por la rugosidad lineal R_L , la superficie de fractura puede caracterizarse por un parámetro similar, la rugosidad superficial R_s . Las definiciones formales de estos dos parámetros se dan más adelante.

En el estudio de los perfiles de fractura, R_L ocupa una posición central por su relación estadística con R_s , para expresar las características del perfil y de la superficie.

Durante sus estudios, M.A. El-Soudani demostró que es posible establecer relaciones estereométricas entre R_L y R_s . Él calculó estos dos parámetros para formas geométricas puras y obtuvo como resultado que a un valor de R_L le corresponde un valor único de R_s , y viceversa. De aquí, El-Soudani dedujo el siguiente teorema.

TEOREMA

" Dos superficies con la misma rugosidad lineal, tienen la misma rugosidad superficial. " (Ref. 12)

Se ha encontrado que sus estudios no son del todo correctos, pues las relaciones que propuso no se justificaron teóricamente. Lo anterior es válido sólo cuando los valores de rugosidad no son muy altos, pues a medida que aumenta la rugosidad, el porcentaje de error también crece.

Hasta ahora, no hay acceso a muchos parámetros morfológicos para caracterizar la superficie de fractura, pero puede usarse la descripción paramétrica de las superficies. Basados en los dos parámetros morfológicos de rugosidad, es posible, en un gran número de casos, calcular otros parámetros característicos. (Ref. 12)

METODO DE CUANTIFICACION A PARTIR DE IMAGENES

El análisis de las imágenes tiene como aplicaciones en fractografía la determinación cuantitativa del tamaño del grano, forma del mismo, determinación de áreas, espaciamientos, y en general, cuantificación de los aspectos morfológicos de las imágenes obtenidas.

Una de las limitaciones del análisis de imágenes es que no se provee directamente información química de las características microestructurales o partículas, además de que se miden cantidades bidimensionales, por lo que los parámetros tridimensionales deben ser inferidos.

Después de que el perfil de fractura en una sección plana es digitalizado, los parámetros geométricos deseados pueden ser calculados. Las cantidades importantes son los parámetros de

rugosidad y las distribuciones angulares. Recientemente se ha estudiado la importancia de la dimensión fractal con respecto al perfil de fractura y a la superficie. Existen relaciones entre el perfil y los parámetros de la superficie, lo que permite que los parámetros topográficos tridimensionales puedan ser estimados a partir de sus correspondientes perfiles en dos dimensiones.

PARAMETROS DE RUGOSIDAD

Los parámetros de rugosidad describen cuantitativamente la topología de la superficie. El análisis de imágenes ha contribuido a la eficiencia de la adquisición de datos y análisis.

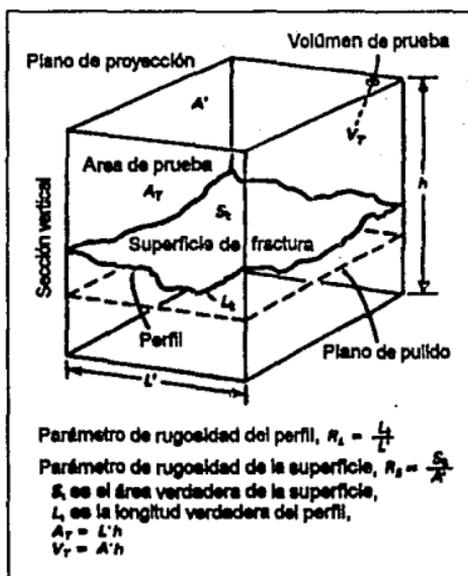


Fig. 3 Los parámetros de rugosidad lineal y superficial con respecto a una superficie de fractura.

Para un perfil de fractura se tiene el parámetro de rugosidad lineal R_L (Fig. 3), el cual es definido como el cociente de la longitud aparente del perfil L , entre su longitud proyectada L' a lo largo de cierta dirección. Esto es,

$$R_L = \frac{L}{L'} \quad [1]$$

La longitud aparente L , usualmente es obtenida por la suma de las distancias (líneas rectas) que conectan a los puntos coordenados a lo largo del perfil. La cantidad R_L es siempre mayor que la unidad, y sus valores experimentales se encuentran entre 1.06 y 2.39.

R_s (rugosidad superficial) es el parámetro análogo a R_L , sólo que en tres dimensiones (Fig. 3). R_s es definido como el área aparente de la superficie irregular S , dividida entre su área proyectada A' en cierto plano de referencia. Está dado por:

$$R_s = \frac{S}{A'} \quad [2]$$

y representa la desviación de la superficie de fractura con respecto al plano global de fractura.

Una de las formas de obtener R_s es usando la siguiente ecuación paramétrica lineal:

$$R_s = \frac{4}{\pi}(R_L - 1) + 1 \quad [3]$$

La ecuación [3] está basada en un modelo realista, esto es, una superficie de fractura que puede tener cualquier configuración entre los límites de $R_s=1$ llamada completamente orientada y de $R_s \rightarrow \infty$, llamada extremadamente compleja. Se han propuesto varias ecuaciones, pero ésta proporciona la mejor aproximación. Además, Kingshuk Banerji la ha verificado con una simulación de fractura en la que el área de la

superficie se conocía. Una ventaja de ésta relación paramétrica es que el parámetro de rugosidad del perfil puede ser obtenido por métodos estereológicos manuales o automáticos. (Ref. 11, 22)

DISTRIBUCIONES ANGULARES

Dos superficies pueden tener el mismo parámetro de rugosidad pero con apariencia diferente. Esta diferencia se encuentra en la orientación angular de los segmentos componentes del perfil con respecto a la inclinación local de la fractura. Los parámetros de rugosidad del perfil y de la superficie son significativos y necesarios, pero como ya se dijo, no son los únicos parámetros que definen al perfil o a la superficie. Las distribuciones angulares son auxiliares para la caracterización de superficies.

Las distribuciones angulares de los segmentos del perfil con respecto a una dirección de referencia dan información adicional acerca de la composición de la fractura y pueden ser influenciadas por la microestructura y por el estado de stress (tensión o carga). Son descriptores cuantitativos de la composición del camino que sigue la fractura a través de la microestructura. Sin embargo, no pueden obtenerse de este tipo de análisis del perfil de fractura, por ello nosotros no obtendremos valores para estos parámetros.

Sobre el parámetro llamado dimensión fractal, que también caracteriza a la fractura, se habla a fondo en el capítulo 4.

CARACTERIZACION GEOMETRICA

No todos los materiales producen fracturas del mismo tipo, se encuentran materiales que son frágiles y otros que son dúctiles. En

general, un material frágil produce una fractura con muy poca rugosidad, casi plana. Por el contrario, materiales dúctiles producen fracturas muy rugosas o irregulares.

Siguiendo a los procedimientos para caracterizar la geometría de las microestructuras en materiales inorgánicos tan bien como en materiales orgánicos, la cuantificación de la geometría de la superficie ha sido uno de los mayores campos en el análisis de imágenes. Los estudiosos de la ciencia de los materiales se han dado cuenta de la importancia de la información que puede ser derivada de las superficies de fractura.

La identificación de patrones puede ser una aplicación del tema que se trata en la tesis, y en general la medición de características en pantalla puede ser de gran ayuda para las personas que tratan con materiales.

MODELOS Y SIMULACIONES DE FRACTURAS

Muchos fenómenos físicos interesantes como las fracturas y su energía de generación pueden ser inferidos del estudio de la estructura detallada de la superficie. (Ref. 26)

Para caracterizar geométricamente una superficie a partir del perfil de fractura, se necesita en primer lugar tener su representación matricial de puntos espaciales coordinados.

Debido a que la fractografía cuantitativa es un desarrollo reciente dentro del análisis de imágenes, no siempre es fácil interpretar los resultados obtenidos, en particular para la morfología de un perfil de fractura.

Hay leyes que permiten predecir la morfología de la fractura como una función del comportamiento mecánico del material antes y durante el proceso de fractura. Pero en ningún caso estas leyes pueden representar la complejidad a escala microscópica.

Para describir el fenómeno observado, una solución consiste en construir un modelo teórico para el cual se fijan a priori las leyes de deformación. La aplicación de este método hace posible una comparación entre la teoría y la práctica, y de aquí la oportunidad para confirmar la validez del método. Este método no es muy usado, ya que no siempre es posible la formulación del modelo matemático porque los cálculos son muy complicados -si no es que imposibles-, y porque muchos modelos pueden llevar al mismo resultado usando los parámetros disponibles.

TIPO DE SUPERFICIE	RUGOSIDAD LINEAL (R_L)	RUGOSIDAD SUPERFICIAL (R_s)	RELACION
IDEALMENTE PLANA	1	1	$R_s = R_L = 1$
ALEATORIA	$\pi/2$	2	$R_s = (4/\pi)R_L$
CUBICA	2.8	5	...
PARABOLICA	1.73593 a 2.79339	2.57038 a 4.79665	Depende de los parámetros que definen a los paraboloides.
CONICA	1.50322 a 2.85674	1.80278 a 4.90306	Depende de los parámetros que definen a los conos.

Tabla 2 Diferentes valores de rugosidad lineal y superficial para varias superficies (Dadas por El-Soudani).

En general, las fracturas no son planas, esto provoca problemas tanto en la observación como en la evaluación cuantitativa.

El-Soudani calculó los valores teóricos de la rugosidad lineal para varias superficies regulares (esféricas, parabólicas, cilíndricas, cónicas y cúbicas) y de dos superficies irregulares. Algunos de estos valores se muestran en la Tabla 2. Tales cálculos son de interés teórico, ya que se pueden encontrar valores idénticos de rugosidad lineal para varias formas. (Fig. 4)

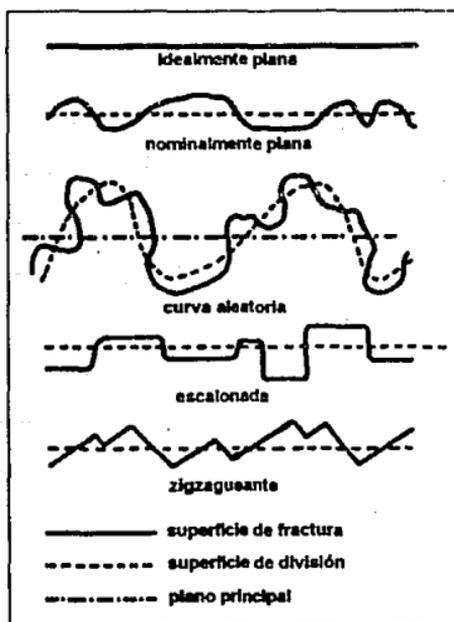


Fig. 4 Clasificación de varias características de las fracturas, de acuerdo con El-Soudani.

E. Underwood y Chakraborty proponen una caracterización paramétrica del perfil de fractura, el cual completa la noción de rugosidad lineal. (Ref. 12) Es decir, proponen que se usen otros parámetros

además del de rugosidad lineal para diferenciar entre varios perfiles.

Una superficie aleatoria es aquella en la cual no hay un orden en cuanto a geometría, o sea que la aparición de características sobre ella es al azar.

MAPEO TOPOGRAFICO

El primer paso para la caracterización geométrica de una superficie de fractura es representarla como una superficie no plana, como un arreglo de puntos con coordenadas espaciales. Con ello es posible extraer o calcular el parámetro geométrico deseado. Ya que muchas superficies topográficas son heterogéneas, se necesita muestrear grandes áreas para llegar a una descripción global precisa. Una de las mejores técnicas que permite que la información pueda ser guardada se basa en los perfiles de la superficie de fractura que están en un plano bidimensional.

Otra técnica es la de estereofotogrametría (SPG), la cual emplea pares de fractografías SEM permitiendo observar la topografía tridimensional de la fractura. Si se hace un corte perpendicular a la superficie, se puede observar el trazo de la superficie de fractura a lo largo de un plano bidimensional. Ya que la superficie de fractura es vista en un plano, las ecuaciones clásicas de estereología pueden ser empleadas convenientemente. (Ref. 13)

Geoméricamente hay 2 clases de características que ocurren frecuentemente en la superficie de fractura: hay características lineales del tipo de las estriaciones y características de área como las facetas, hoyuelos, etc. (Ya se ha hablado de estas características en el capítulo 1).

Una combinación de los parámetros de rugosidad puede ser requerida para obtener otras cantidades, como la densidad de características lineales por unidad de área de la superficie de fractura.

Si los parámetros de rugosidad no están disponibles, pueden suponerse los de la fractura plana o aleatoria (ver Tabla 2). Aunque habrá niveles desconocidos de error, en los resultados ésto no afectará teniéndose así buenas aproximaciones. Por ejemplo, para una superficie frágil, el caso plano puede representar la situación, y para una superficie con hoyuelos y rasgos complejos se puede suponer el caso aleatorio satisfactoriamente. (Ref. 13)

CAPITULO

4

4. FRACTALES Y FRACTOGRAFIA

Síntesis

El desarrollo del análisis fractal se ha dado desde 1975, incrementándose con el avance de los sistemas de cómputo. Se han desarrollado investigaciones en muy diversas áreas, tales como economía, meteorología, biología, física, sociología e incluso en el arte.

Un fractal es un objeto que puede tener dimensión fraccionaria. Tal dimensión proporciona una medida de la irregularidad de las formas del objeto en cuestión. Una aplicación muy importante de la geometría fractal es que con ella se han podido modelar estructuras propias de la naturaleza, tales como relieves montañosos, estructuras arbóreas, galaxias, flores, etc.

Los primeros estudios fractográficos usando el parámetro de rugosidad lineal muestran que éste parámetro varía en relación con el aumento utilizado. Se puede decir que un perfil de fractura posee cierto carácter fractal, lo cual ha llevado a caracterizar al perfil por su dimensión fractal. El aspecto fractal de una superficie de fractura se debe básicamente a que una irregularidad de la superficie está formada a su vez por microirregularidades.

Hay varios estudios sobre el aspecto fractal de las fracturas y en algunos se habla de que éstas al ser objetos irregulares por naturaleza, tienen un carácter fractal acorde con lo postulado por Benoit Mandelbrot, pero en otros estudios se ha comprobado que no es posible aplicar las ecuaciones propuestas por Mandelbrot en su forma canónica, por lo que se les han hecho modificaciones.

A partir de los valores de rugosidad que pueden obtenerse de las imágenes de fractura, en éste capítulo se dan las derivaciones necesarias con el fin de determinar la dimensión fractal como otro parámetro que identifica al perfil.

Mientras más irregular sea el perfil, serán mayores los valores que tome la dimensión fractal D . Por lo tanto, las variaciones en D se relacionan con los cambios en la rugosidad, forma y configuración de una curva.

DEFINICION DE FRACTAL

Hay una rama de las matemáticas llamada "geometría fractal" que fué popularizada por Benoit Mandelbrot. Los fractales prometen muchas aplicaciones importantes como el modelado y el análisis de estructuras.

DEFINICION

" Un fractal es un conjunto cuya dimensión de Hausdorff Besicovitch es estrictamente mayor a su dimensión topológica. " (Ref. 23)

De manera informal se puede decir lo siguiente:

- Un fractal es una figura hecha de partes que de alguna manera son similares al todo.
- Una curva fractal es una curva infinita en un plano finito o una curva cerrada infinita que delimita un espacio finito y por lo tanto con dimensión no entera.

En sí, los fractales son objetos -conjuntos, curvas o patrones- que exhiben formas repetitivas a diferentes órdenes de magnitud, encontrándose en ellos las características de autosimilaridad y escalamiento. (Ref. 24)

APLICACION DE LOS FRACTALES EN FRACTOGRAFIA

Conceptos como el de escalamiento y de fractales, han ayudado a formular nuevas leyes tanto en fractografía como en otras áreas.

Se sabe desde principios de siglo que cierto tipo de curvas poseen propiedades geométricas no usuales, por ejemplo, la curva copo de nieve de Koch, la curva de Peano, la curva de Hilbert, etc.

Mandelbrot postula que la longitud medida de una curva es una función del tamaño de la unidad de medida usada para estimar la longitud y que la longitud aparente se hace infinita a medida que el tamaño de la unidad de medida se acerca a cero. De acuerdo con esto, en los estudios que se han hecho se ha llegado a la conclusión de que ciertas curvas irregulares tienen características fractales. (Ref. 11)

Investigaciones recientes de Kingshuk Banerji y Ervin E. Underwood reconocen el comportamiento fractal de las superficies de fractura reales y de sus perfiles. (Ref. 11)

EL ASPECTO FRACTAL

Irregularidades de gran escala en la superficie de fractura están formadas a su vez por microirregularidades. Es esto lo que crea el aspecto fractal de la superficie de fractura. (Ref. 12)

El aspecto fractal de un perfil de fractura se considera un parámetro geométrico, al igual que los parámetros de rugosidad y de distribuciones angulares. (Ref. 13)

Si se considera un perfil irregular (ver Fig. 5), se observará que la longitud medida de cada línea será una función de la unidad de medida η . A medida que η es más pequeña, la longitud medida será más grande ya que interactuará con los detalles muy finos del perfil. La figura 5 muestra que la longitud aparente medida de una misma curva obviamente se incrementa a medida que el tamaño de η disminuye. (Ref. 25)

La naturaleza física de la dimensión fractal muestra una cercana similitud con los parámetros de rugosidad.

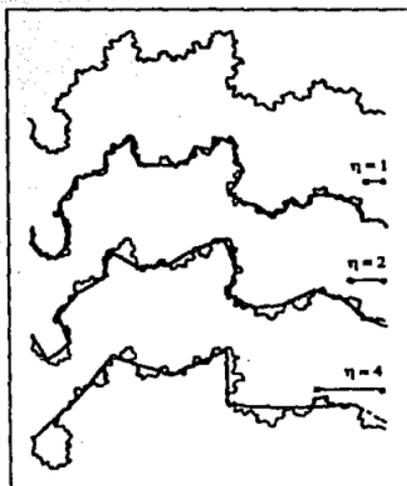


Fig. 5 Interacción de la unidad de medida η con respecto al perfil irregular. La longitud medida aumenta conforme η disminuye.

ANTECEDENTES

En estudios hechos en 1949, se reportó una anomalía inusual en las mediciones de tamaño y densidad de área en los granos de varios metales. Dependiendo del aumento empleado, se obtuvieron diferentes valores. Este efecto de aumento se ha encontrado experimentalmente en los estudios de microestructuras de granos, partículas, de volúmenes y áreas, tanto en metales como en materiales biológicos.

ANÁLISIS DEL PERFIL DE FRACTURA POR METODOS FRACTALES

Los primeros estudios fractográficos usando el parámetro de rugosidad lineal muestran que éste parámetro varía de acuerdo con el aumento utilizado. Se puede decir que un perfil de fractura posee cierto carácter fractal, lo cual ha llevado a la caracterización del perfil

por su dimensión fractal. De acuerdo con Mandelbrot, la dimensión fractal D de una línea puede ser determinada con la expresión:

$$D = 1 - \log L_p / \log \eta \quad [4]$$

donde L_p es el perímetro aproximado (aparente) de la línea, medido usando segmentos de longitud η . (Fig. 6)

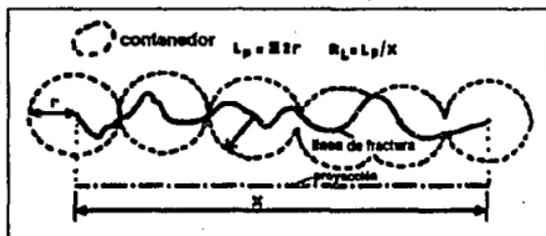


Fig. 6 Método de Mandelbrot-Richardson para medir la dimensión fractal de una línea irregular.

La ecuación [4] se ha usado para caracterizar la morfología de partículas individuales o conectadas, perfiles de fractura y figuras teóricas fractales. Es posible también calcular la dimensión fractal de un perfil usando un analizador automático.

La dimensión fractal no permanece realmente constante durante el análisis. Se ha demostrado que hay una excelente correlación entre el tamaño de los granos de la microestructura y los valores máximos de la dimensión fractal, entre las fracturas frágiles transgranulares e intergranulares. Este no es el caso para fracturas dúctiles, donde no hay correlación directa, porque la rugosidad es causada por todas las cavidades producidas sobre la superficie de fractura. (Ref. 12)

Mandelbrot postula que todo objeto irregular natural está hecho con una jerarquía de autosimilaridad en todas las escalas dimensionales. Para una línea irregular como la mostrada en la Fig. 5, la longitud

estimada de acuerdo con la ecuación de Richardson (ec. [5]) es una función de la unidad de medida η .

$$L(\eta) = L_0 \eta^{-(D-1)} \quad [5]$$

donde L_0 es una constante con dimensión de longitud y D es la dimensión fractal, que es una constante relacionada con la pendiente de la forma lineal de la ecuación, y caracteriza la estructura escalada de la línea irregular. Sus valores se encuentran entre uno y dos. (Ref. 13,25) La forma lineal de la ecuación anterior es:

$$\log L(\eta) = \log L_0 - (D-1) \log \eta \quad [6]$$

La curva resultante de $L(\eta)$ contra η en coordenadas log-log es llamada una gráfica fractal. Es decir, si uno grafica la longitud estimada contra la unidad de medida en una gráfica log-log los datos deberían caer en una línea recta. De ésta forma la dimensión fractal es obtenida de la pendiente de dicha recta.

La ecuación [5] predice que la longitud estimada se acercará a infinito si $\eta \rightarrow 0$. Esta abstracción teórica no puede aplicarse a curvas reales como los perfiles de fractura, ya que en curvas reales la longitud parece acercarse a un límite a medida que η es más pequeña.

METODO ALTERNATIVO AL PROPUESTO POR MANDELBROT

Varios estudios muestran que las gráficas fractales para las curvas de los perfiles irregulares difieren significativamente de las postuladas por Mandelbrot -curvas subdivisibles indefinidamente con autosimi-laridad-, a medida que η se hace más pequeña. Desde un punto de vista práctico, es obvio que bajo un pequeño valor de η no se encontrarán más detalles en la estructura y por eso la longitud

estimada se acercará a un valor real constante debido a las irregularidades. (Ref. 13)

En lugar de encontrar una curva fractal lineal y una dimensión fractal constante D , se encontró una curva sigmoideal inversa (RSC) y una D variable. (Ref. 11) Una RSC muestra una tendencia a una curvatura asintótica. Esta tendencia se ha encontrado en muchos rasgos microestructurales que tienen bordes rugosos, irregulares. Diversos estudios han revelado que no hay relación con el postulado de autosimilitud. El comportamiento asintótico es entendible en curvas reales debido a las limitaciones del tamaño atómico o, si nos referimos a imágenes digitales se deberá al tamaño del elemento de la imagen o pixel. Existe un procedimiento alternativo en el cual se aplican las curvas sigmoideales inversas para perfiles y superficies respectivamente. (Ref. 11,25)

Las características de las costas irregulares y de ciertas curvas especiales han sido analizadas en función de la unidad de medida n de acuerdo con la ecuación propuesta por Richardson (ecuación [5]) Se dice que las curvas irregulares poseen la propiedad de auto similaridad, esto es, la curva tiene aparentemente la misma forma y configuración para cualquier aumento con el que se la vea.

Se habla de dos tipos de datos: uno, da la curva experimental cuya configuración aparentemente no cambia con el aumento (o, equivalentemente, con una mayor resolución); y el otro tipo, proporciona una curva teórica con auto similaridad cuya configuración muestra más y más detalles a medida que el aumento es mayor.

Los reportes acerca del comportamiento fractal de perfiles de fractura, revelan que no hay relación con la ecuación [6]. La autosimilaridad no existe en estos casos. Esta discrepancia no fué detectada en los primeros trabajos fractográficos en parte porque el

rango de η estaba muy limitado, ya que los microscopios no permitían grandes aumentos. (Ref. 11)

En los análisis hechos por Banerji y Underwood, en lugar de utilizar $\log L(\eta)$ contra η para graficar, como se indica en la ecuación [6], se usó una forma más útil de la ecuación fractal, la cual es:

$$\log R_L(\eta) = \log C - (D-1)\log \eta \quad [7]$$

donde C es una constante y R_L , el parámetro de rugosidad del perfil. (Ref. 11) Lo anterior se observa en la Fig. 7.

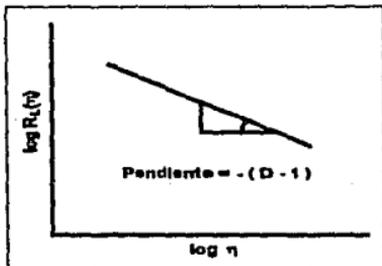


Fig. 7 La dimensión fractal y su relación con la pendiente de la gráfica log-log de $R_L(\eta)$ versus η

Los parámetros de rugosidad tienen significados físicos simples que pueden ayudar a entender mejor la dimensión fractal D . Al graficar R_L y R_s contra temperatura, se ha encontrado que son curvas muy similares. D refleja un cambio gradual a medida que η se acerca a un detalle fino del perfil. Entonces, la longitud aparente del perfil se incrementa a medida que η se hace más pequeña. R_L es un valor de longitud el cual puede incrementarse ya sea haciendo una curva más tortuosa o picos más grandes. Un cambio en D está relacionado con los cambios en la rugosidad, forma y configuración de la curva.

Ya que R_s es proporcional a R_L , no es sorprendente que el comportamiento de las RSCs sea también observado en las gráficas fractales de $\log R_s$ versus $\log \eta$. (Ref. 11,25)

Es importante tener una expresión para superficies no planas comparable con la ecuación de Richardson para curvas irregulares planas.

Banerji y Underwood hacen las siguientes consideraciones:

1. Las ecuaciones fractales modificadas para perfiles y superficies están basadas en un comportamiento RSC.
2. La ecuación fractal de superficies tiene la misma forma que para perfiles.
3. La unidad de medida es η^2 para superficies y η para perfiles.
4. Las dimensiones fractales modificadas D_s y D_v están relacionadas con la pendiente β de la RSC lineal para perfiles y la pendiente γ de la RSC lineal para superficies. (Ref. 11)

Una forma modificada de la ecuación [5] es la siguiente:

$$L(\eta) = L_0 \eta^{-(D_s - 1)} \quad [8]$$

Considerando la ecuación para superficies en términos de la unidad de medida de área η^2 , se tiene que:

$$S(\eta^2) = S_0 [\eta^2]^{\frac{1}{2}(D_s - 2)} \quad [9]$$

donde $S(\eta^2)$ es una función de η^2 .

La forma lineal de la ecuación [8] en términos de $R_L(\eta)$ es

$$\log R_L(\eta) = \log C' - (D_s - 1) \log \eta \quad [10]$$

donde D_p es la dimensión fractal modificada para perfiles. La forma lineal de la ecuación [9] en términos de $R_s(\eta^2)$ es

$$\log R_s(\eta^2) = \log C'' - \frac{1}{2}(D_p - 2)\log \eta^2 \quad [11]$$

donde D_p es la dimensión fractal modificada para superficies.

Tomando en cuenta las características encontradas en las curvas, Banerji y Underwood seleccionaron una ecuación del tipo RSC, la cual es:

$$\log \frac{R_L^0 - 1}{R_L(\eta) - 1} = k\eta^{(D'-1)} \quad [12]$$

donde

R_L^0 es la rugosidad lineal cuando $\eta \rightarrow 0$,

$R_L(\eta)$ es la rugosidad lineal estimada,

k es una constante y

D' es la dimensión fractal modificada.

Al linealizar la ecuación [12] y cambiando $(D'-1)$ por β se tiene lo siguiente

$$\log \log \frac{R_L^0 - 1}{R_L(\eta) - 1} = \log k - \beta \log \eta \quad [13]$$

De acuerdo con la ecuación anterior, al graficar $\log \frac{R_L^0 - 1}{R_L(\eta) - 1}$ vs η se obtendrá la pendiente β . Lo mismo se hace para D_p pero a partir de

$$\log \log \frac{R_s^0 - 1}{R_s(\eta^2) - 1} = C_2 + \gamma \log \eta^2 \quad [14]$$

Graficando $\log \log \frac{R_s^0 - 1}{R_s(\eta^2) - 1}$ vs η^2 se obtiene la pendiente γ .

Las dimensiones fractales de las RSC están relacionadas de acuerdo con:

$$D_p = \beta + 1 \text{ y } D_f = 2\gamma + 2$$

Un valor típico de $\beta = 0.512$ da $D_p = 1.512$ y para un valor de $\gamma = 0.253$, $D_f = 2.506$. La diferencia $D_f - D_p$ es cercana a la unidad.

Los datos experimentales encajan con la ecuación lineal. Además, las dimensiones fractales de las RSCs D_p y D_f son consistentes con $D_f - D_p = 1$ y $D_p > 1$ y $D_f > 2$. Estos son valores razonables de dimensiones fractales para perfiles irregulares y superficies, basados en las RSCs fractales.

En resumen, algunas curvas planas, conforman lo dictado por Mandelbrot sobre una dimensión fractal constante D . Sin embargo, para las curvas complejas e irregulares obtenidas experimentalmente, la autosimilaridad no se observa, D no es constante y la longitud aparente de la curva no se incrementa sin límite a medida que η se acerca a cero.

Se ha investigado el comportamiento fractal de los perfiles de fractura de acuerdo con la ecuación de Richardson. La curva fractal no es recta, toma la forma de una curva sigmoideal inversa (RSC). Para investigar las características fractales de las superficies de fractura, se necesitan los valores de las áreas. Esto es calculado de la ecuación paramétrica (ec. [3]) dada en el capítulo 3. Ya que D no es constante, se propone una nueva dimensión fractal constante D_p basada en la pendiente constante β de la RSC. De acuerdo con esto, la ecuación fractal para perfiles es la ecuación [13] donde $\beta = D_p - 1$. La ecuación fractal para superficies irregulares análoga a la curva modificada del perfil, pero como una función de η^2 es la ecuación [14], donde $\gamma = (D_f - 2)/2$.

La diferencia $D_1 - D_0$ es cercana a la unidad. $D_0 > 1$ y $D_1 > 2$ como se esperaría desde un punto de vista fractal.

Se encuentra que los atributos de rugosidad, forma y configuración local son factores que influyen en D .

Se cree que las ecuaciones dadas pueden tener validez general para curvas irregulares complejas y superficies que se encuentran en la naturaleza. (Ref. 11,25)

En el software desarrollado se aplican algunas de las ecuaciones anteriores y se obtienen valores para la dimensión fractal convencional y la dimensión fractal modificada para perfiles.

ALGORITMO PARA MEDIR LA DIMENSION FRACTAL

Basándonos en la teoría que se muestra en el capítulo 4, se implementó el algoritmo que mide la dimensión fractal de un perfil de fractura. Para ello se siguió en principio, la filosofía del procedimiento que mide la fractura, esto es, rastreamos el perfil de fractura y fuimos midiendo la distancia del punto inicial al punto que recorre el perfil. Cuando esta medida iguala una cantidad que representa la longitud del segmento con el que se está midiendo, se incrementa un contador, que indica cuantos segmentos de esa longitud llevamos y las coordenadas iniciales pasan a ser las del último punto rastreado, así se sigue hasta que rastreamos todo el perfil de fractura y tenemos los datos de cuantos segmentos de este tamaño se necesitaron para medir todo el perfil.

Esto se repite para varios tamaños del segmento de medición, por lo que se implementó en un ciclo. En nuestro caso se hizo para segmentos desde uno hasta cincuenta píxeles.

Los datos de cada una de las veces que se repite el ciclo son almacenados en un arreglo, lo que hace las veces de una tabla que a final nos sirve para hacer la linealización de los datos experimentales a través del método de mínimos cuadrados, y la pendiente de la recta resultante es la dimensión fractal D que se muestra como resultado en la pantalla.

CAPITULO

5

5. RESULTADOS**FRACTUS: PROGRAMA DE APLICACION A FRACTURAS**

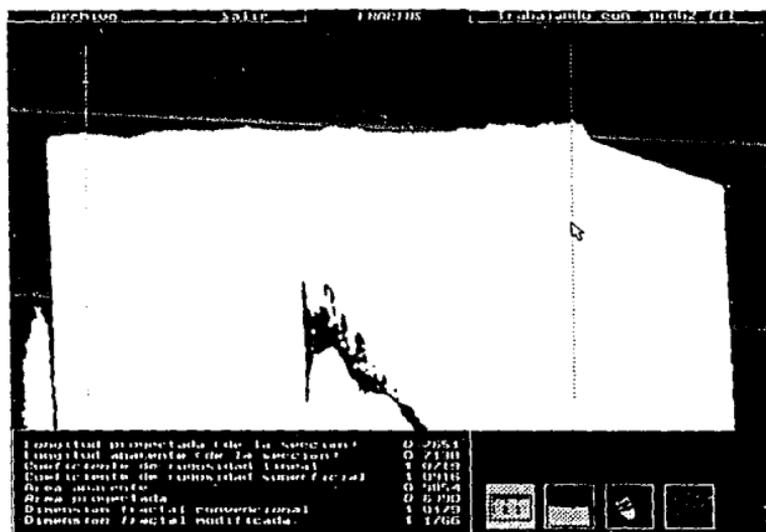
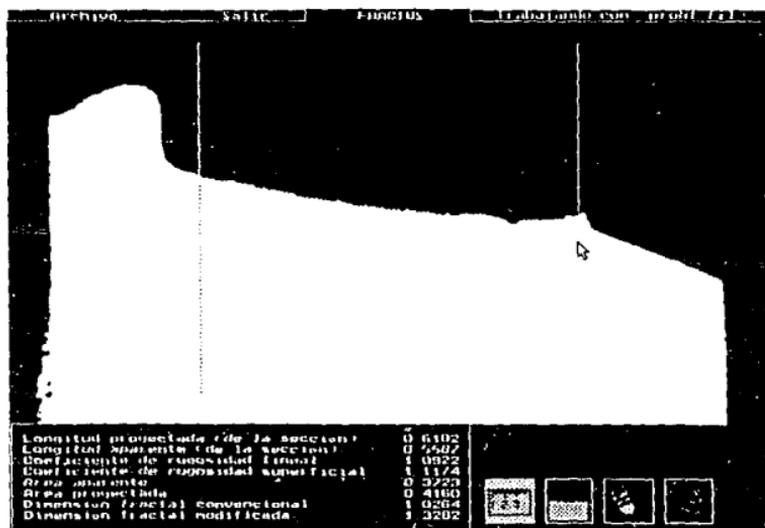
Como primer resultado del desarrollo de la tesis se obtuvo el paquete llamado Fractus, el cual reúne a los algoritmos de despliegue, filtrado y medición dados en el capítulo 2, así como otros propios del ambiente del programa tales como el de manejo del mouse.

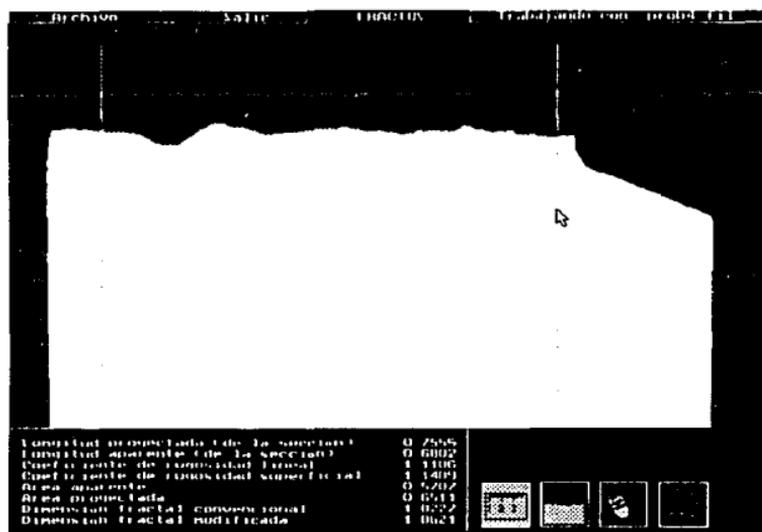
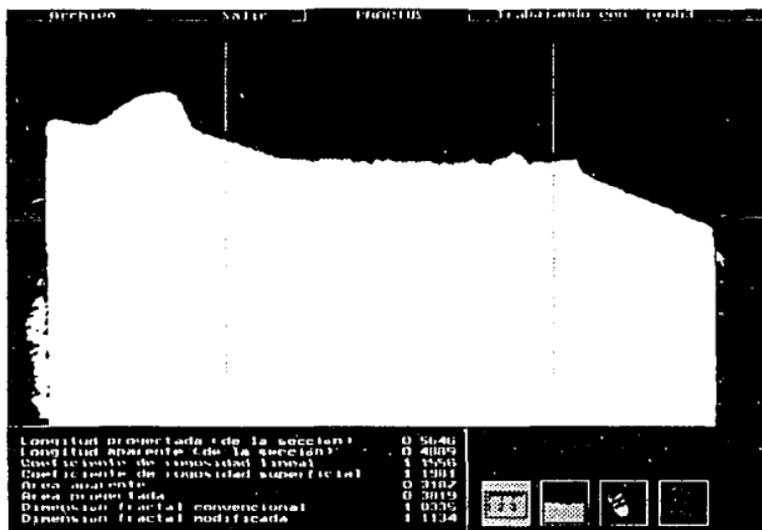
Fractus se maneja dando las órdenes a través de íconos. Las imágenes que se analizan deben ser filtradas para evitar errores. El usuario de Fractus debe indicar cuál es la sección de la probeta a medir (por medio del mouse). Lo anterior depende del criterio del usuario ya que normalmente hay partes de la probeta que no proporcionan información, como lo es la zona en que se encuentra la muesca.

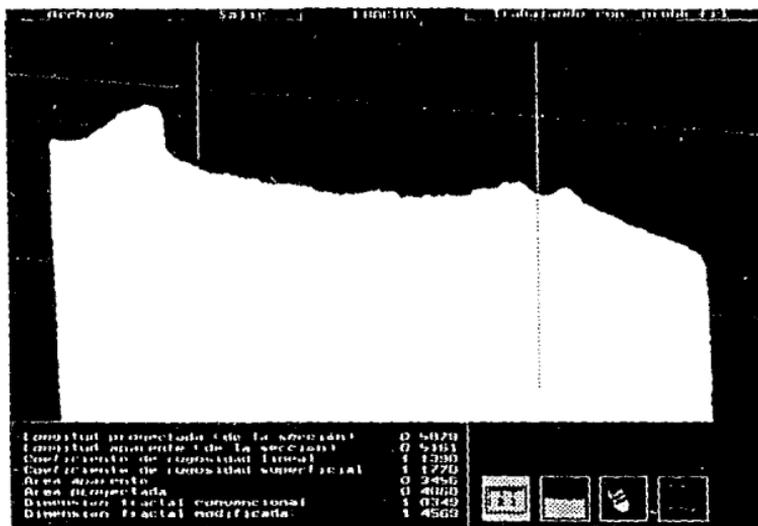
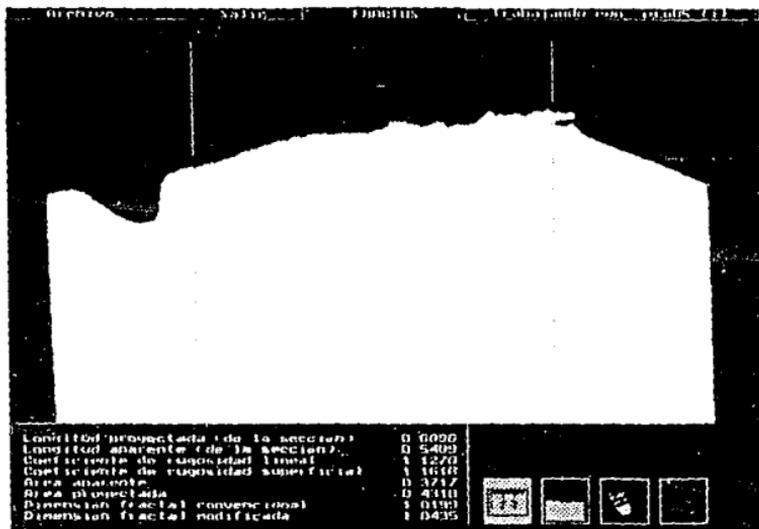
La opción de medir que tiene Fractus proporciona al usuario los valores para los parámetros de rugosidad lineal, rugosidad superficial, longitud proyectada, longitud aparente, superficie aparente, dimensión fractal convencional y dimensión fractal modificada. Tales parámetros se obtienen de las relaciones que se encuentran en los capítulos 3 y 4.

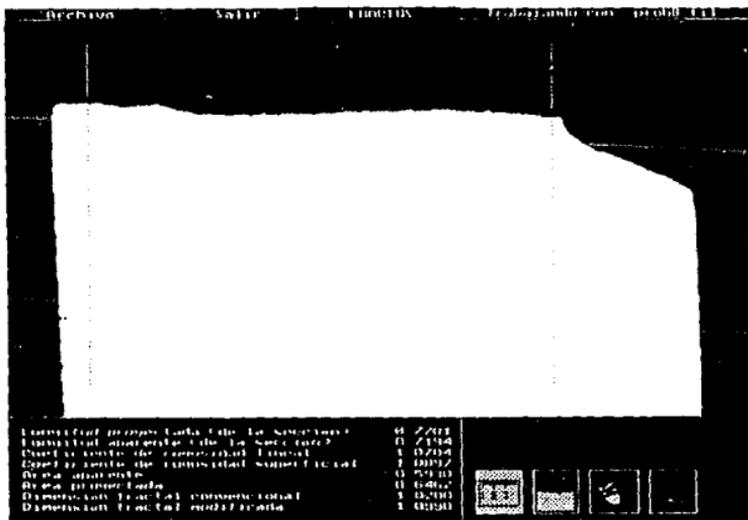
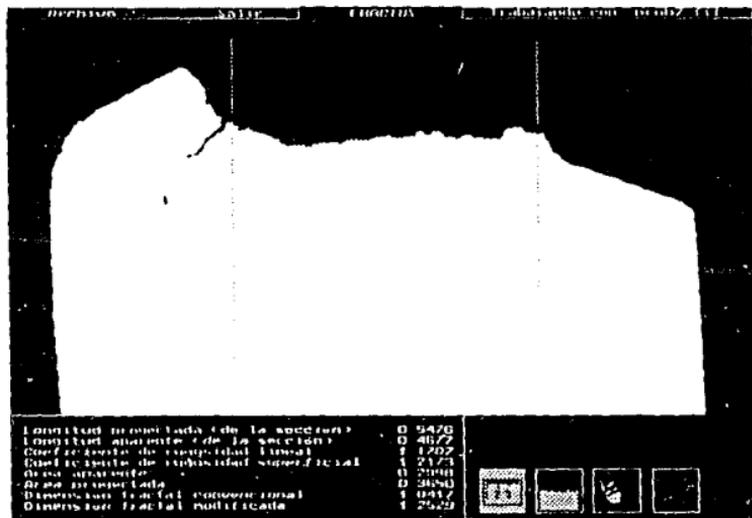
ANALISIS DE IMAGENES. OBTENCION DE PARAMETROS

Para trabajar con Fractus y hacer las pruebas que en seguida se muestran, se digitalizaron 9 fotografías de diferentes perfiles de fractura. Los resultados obtenidos de la medición de cada una de esas imágenes son los siguientes:









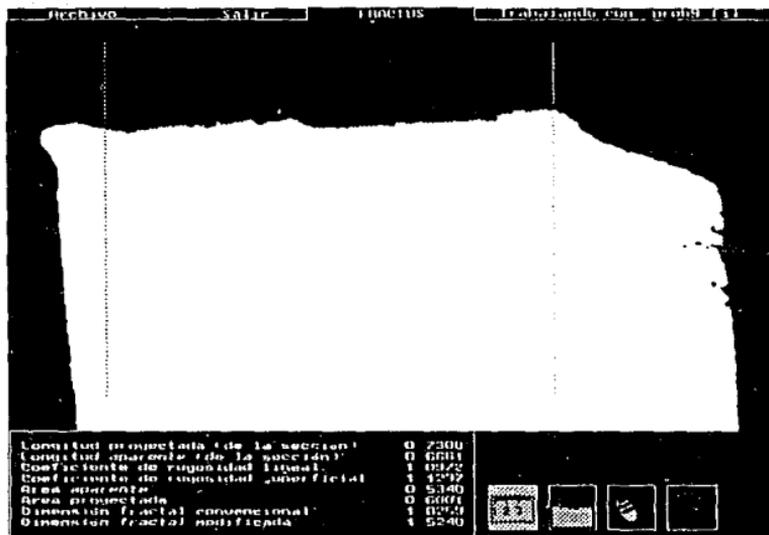


TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS

En siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de imágenes.

Se observa que de acuerdo con lo esperado:

- R_L aumenta de acuerdo con la apariencia rugosa de la imagen,
- que la dimensión fractal aumenta con cierta proporción a R_L ,
- que R_s es proporcional a R_L .

PROBETA	L'	L_p	R_L	R_S	S_r	A'	D	D_p
1	0.6102	0.5587	1.0922	1.1164	0.3723	0.4160	1.0264	1.3282
2	0.7651	0.7138	1.0719	1.0916	0.5854	0.6390	1.0179	1.1766
3	0.5646	0.4885	1.1556	1.1981	0.3187	0.3819	1.0335	1.1134
4	0.7555	0.6802	1.1106	1.1409	0.5707	0.6511	1.0227	1.0621
5	0.6096	0.5409	1.1270	1.1608	0.3717	0.4318	1.0199	1.0435
6	0.5879	0.5161	1.1390	1.1770	0.3456	0.4068	1.0349	1.4569
7	0.5476	0.4677	1.1707	1.2173	0.2998	0.3650	1.0417	1.2529
8	0.7701	0.7194	1.0704	1.0897	0.5930	0.6462	1.0200	1.0990
9	0.7308	0.6661	1.0972	1.1237	0.5340	0.6001	1.0259	1.5240

CAPITULO

6

6. CONCLUSIONES

El análisis de perfiles es una forma fácil de obtener parámetros característicos de las superficies de fractura. Al utilizar imágenes y el procesamiento de las mismas, el análisis se hace sencillo para quienes se dedican al estudio de las fracturas.

Por lo anterior se desarrolló un programa que permite analizar las imágenes de los perfiles de fractura. Al software desarrollado se le llamó Fractus, y utiliza como entrada imágenes digitalizadas con formato TIFF. Las funciones de Fractus se basan en el cálculo de parámetros como la rugosidad lineal, rugosidad superficial, longitud del perfil, área aparente, así como la dimensión fractal. Para obtener dichos resultados las imágenes deben tener un perfil bien definido, por lo cual Fractus permite que sean filtradas.

En la literatura consultada sobre análisis de imágenes no se habla de un algoritmo que permita medir un perfil, por lo que desarrollamos un algoritmo para hacerlo. El algoritmo de medición se basa en la identificación de los colores de los píxeles para determinar si pertenecen o no al perfil, y en los movimientos que se deben hacer para seguir el perfil.

Fractus obtiene los valores de los parámetros ya mencionados a partir de la aplicación de las ecuaciones de la estereología, las cuales proporcionan una relación entre los parámetros lineales y los superficiales.

En cuanto a la dimensión fractal, ésta es obtenida a partir de la ecuación de B. Mandelbrot y de la forma modificada de E. Underwood y K. Banerji.

Durante el desarrollo de Fractus observamos la importancia de que las imágenes fueran de buena calidad, empezando por las fotografías. Debido a que esto no siempre es posible, trabajamos con un algoritmo para definir bordes pero no fué adecuado a nuestras necesidades, sin embargo, los filtros de mediana y de promedio nos proporcionaron imágenes bien definidas.

En cuanto al formato de las imágenes, se eligió TIFF ya que es un estándar y porque el uso de este tipo de imágenes es común en muchos paquetes usados para adquirir imágenes del scanner.

Fue muy gratificante realizar una aplicación real sobre un tema al que habíamos dedicado muchas horas de estudio y del cual no encontrábamos una aplicación: los fractales.

Aunque no es nuestra área resultó muy interesante la investigación que realizamos en metalurgia. Comprobamos que la computadora no es más que una herramienta que se aplica a muy diversas áreas.

Consideramos que se alcanzó el objetivo de la tesis: " Crear un programa que resulte útil a los metalúrgicos para realizar un análisis cuantitativo de las fracturas. "

¿Cómo puede crecer este desarrollo?

En el futuro se puede hacer crecer este paquete para que abarque cosas como la simulación de perfiles a partir de parámetros teóricos, y también se puede pensar en implementarlo en Windows, ya que este se ha convertido en un estándar para las computadoras personales. Esto último puede hacerse utilizando un lenguaje de Programación Orientada a Objetos (OOP) ya que esto permite hacer modificaciones más fácilmente y reusar partes de un paquete en otros.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Hans J. Herrmann
FRACTURES
2. V. Kerlins, A. Phillips
HISTORY OF FRACTOGRAPHY & MODES OF FRACTURE
ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 12 1987 p 1-71
3. E. Underwood
QUANTITATIVE STEREOLOGY
Addison-Wesley Publishing Company 1970
4. Richard D. Dipp, E. P. Dahlberg
PREPARATION AND PRESERVATION OF FRACTURE SPECIMENS
ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 12 1987 p 72-77
5. Theodore M. Clarke
PHOTOGRAPHY OF FRACTURED PARTS AND FRACTURE SURFACE
ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 12 1987 p 78-90
6. G. Vander Voort
VISUAL EXAMINATION AND LIGHT MICROSCOPY
ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 12 1987 p 91-165
7. G. Vander Voort
IMAGE ANALYSIS
ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 10 1987 p 309-322
8. TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY
ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 12 1987 p 179-192
9. B. Gabriel
SCANNING ELECTRON MICROSCOPY
ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 12 1987 p 166-178
10. E. Underwood
QUANTITATIVE METALLOGRAPHY
ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 9 1987 p 123-134

11. E. Underwood, K. Banerji
 FRACTALS IN FRACTOGRAPHY
 Materials Science and Engineering Vol. 80 1986 p 1-14
12. M. Coster, J.L. Chermant
 RECENT DEVELOPMENTS IN QUANTITATIVE FRACTOGRAPHY
 International Metals Reviews Vol. 28 No.4 1983 p 228-250
13. K. Banerji
 QUANTITATIVE FRACTOGRAPHY: A MODERN PERSPECTIVE
 Metallurgical Transactions Vol. 19A, Abril 1988 p 961-971
14. George Wolberg
 DIGITAL IMAGE WARPING
 IEEE Computer Society Press 1990 p 1-14
15. Robert J. Schalkoff
 DIGITAL IMAGE PROCESSING AND COMPUTER VISION
 Ed. John Wiley and Sons, Inc. 1989 p 1-17,130-180
16. MANUAL DEL PAQUETE HiJaak
 Graphics Conversion and screen capture
 INSET Systems
17. A. Rosenfeld, A. C. Kak
 DIGITAL PICTURE PROCESSING
 Academic Press Vol. 1 1982 p 1-8,53-55,209-265
18. R. Gonzalez, P. Wintz
 DIGITAL IMAGE PROCESSING
 Addison Wesley 1987 p 6-9,140-201,331-344
19. T. Kobayashi, D. Shockey
 FRASTA: A NEW WAY TO ANALYZE FRACTURE SURFACES
 Advanced Materials & Processes Noviembre, 1991 p 28-34
20. D.M.K. de Grinberg, M. Trujillo
 EFECTO DE UN UNICO REVENIDO SOBRE LA DUREZA Y LA FRAGILIZACION
 DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS AISI H13 DE TRABAJO EN CALIENTE
 Memorias de 11o. Encuentro de Investigación Metalúrgica,
 Saltillo Coah. Nov. 1989 p 482-495

21. W.K. Pratt
 DIGITAL IMAGE PROCESSING
 Ed. John Wiley and Sons, Inc. 1978 p 307-335
22. E. Underwood, K. Banerji
 QUANTITATIVE FRACTOGRAPHY
 ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 12 1987 p 193-210
23. B.B. Mandelbrot
 THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE
 Ed. Freeman 1983 p 15
24. G. Solares Esquivel
 INTRODUCCION A LAS IMAGENES FRACTALES
 Lab. de Computación Avanzada DEPEFI-UNAM Notas del curso 1991
25. E. Underwood, K. Banerji
 FRACTAL ANALYSIS OF FRACTURE SURFACES
 ASM Metals Handbook 9th. Edition. Vol. 12 1987 p 211-215
26. K. Wright, B.Karlsson
 TOPOGRAFIC QUANTIFICATION OF NON-PLANAR LOCALIZED SURFACES
 Journal of Microscopy Vol. 130 1983 p 37-51
27. H. Eckart, M.Fripan
 QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THREE-DIMENSIONAL ROUGHNESS, ANISOTROPY
 AND ANGULAR DISTRIBUTIONS OF FRACTURE SURFACES BY STEREOOMETRY
 Journal of Microscopy Vol. 138 1985 p 161-178
28. J. Feder
 FRACTALS
 Ed. Plenum Press 1988 p 11-15
29. M. Barnsley
 FRACTALS EVERYWHERE
 Ed. Academic Press 1988 p 190-193

APPENDICE A

A. EJEMPLO DE UN ARCHIVO CON FORMATO TIFF

Este ejemplo se basa en el archivo TIFF que corresponde a una de las probetas analizadas. Debido a la longitud del archivo, sólo se incluye el encabezado y una pequeña parte de los datos de la imagen. En el capítulo 2 se habla de este formato.

# DE WORD	VALOR	SIGNIFICADO	COMENTARIO
1	18761	Byte Order	Bytes 0-1 File Header
2	42	Version	Bytes 2-3 File Header
3	8	IFD offset	Salta al byte 8 File Header
4	0		Bytes 6-7
5	10	Comienzo IFD	Habr� 10 etiquetas en el IFD
6	255	Sub File Type	Etiqueta 1
7	3	Dato tipo short	Tipo del campo
8	1		Longitud del campo
9	0		Longitud del campo
10	1		Dato
11	0		
12	256	Image Width	Etiqueta 2
13	3	Short	Tipo
14	1		Longitud
15	0		Longitud
16	1320	1320 columnas	Dato
17	0		
18	257	Image Lenght	Etiqueta 3

19	3	Short	Tipo del campo
20	1		Longitud del campo
21	0		Longitud del campo
22	319	319 renglones	Dato
23	0		
24	258	Bits per sample	Etiqueta 4
25	3	Short	Tipo del campo
26	1		Longitud del campo
27	0		Longitud del campo
28	4		Dato
29	0		
30	259	Compression	Etiqueta 5
31	3	Short	Tipo del campo
32	1		Longitud del campo
33	0		Longitud del campo
34	1	No hay compresión	Dato
35	0		
36	262	Photometric Intr.	Etiqueta 6
37	3	Short	Tipo del campo
38	1		Longitud del campo
39	0		Longitud del campo
40	1		Dato
41	0		
42	273	Strip Offsets	Etiqueta 7
43	4	Long	Tipo del campo
44	1		Longitud del campo
45	0		Longitud del campo
46	150	Byte 150 empieza info.	Dato

47	0		
48	279	Strip Byte Counts	Etiqueta 8
49	4	Long	Tipo del campo
50	1	Longitud del campo	
51	0		Longitud del campo
52	13932		Dato
53	3		
54	282	X Resolution	Etiqueta 9
55	5	Rational	Tipo del campo
56	1		Longitud del campo
57	0		Longitud del campo
58	134		Dato
59	0		
60	283	Y Resolution	Etiqueta 10
61	5	Rational	Tipo del campo
62	1		Longitud del campo
63	0		Longitud del campo
64	142		Dato
65	0		
66	0		Fin del IFD
67	0		Fin del IFD
68	300		
69	0		
70	1		
71	0		
72	300		
73	0		
74	1		
75	0		
76	1	Comienza info.	Bytes 150-151

77	256	Dato imagen	Comienza Image data
78	4096	Dato imagen	
79	4112	Dato imagen	
80	1	Dato imagen	
81	256	Dato imagen	
82	257	Dato imagen	
83	0	Dato imagen	
...	

APPENDICE B

B. PSEUDOCODIGO DE LOS PROCEDIMIENTOS MAS
 IMPORTANTES DEL PAQUETE FRACTUS

PROCEDIMIENTO CALIBRA

{ ESTE PROCEDIMIENTO OBTIENE LOS LIMITES DE LA MUESTRA A MEDIR Y
 OBTIENE EL FACTOR POR EL CUAL SE DEBEN MULTIPLICAR LAS CANTIDADES EN
 PIXELES PARA CONVERTIRLAS A CENTIMETROS }

INICIO

ENCIENDE EL MOUSE

REPITE

SENSA EL MOUSE

HASTA QUE SE OPRIMA EL BOTON

GUARDA LA ABSCISA INICIAL XI

{ ESTA ABSCISA SE REFIERE A DONDE COMIENZA LA MUESTRA }

REPITE

SENSA EL MOUSE

HASTA QUE SE OPRIMA EL BOTON

GUARDA LA ABSCISA FINAL XF

{ ESTA ABSCISA SE REFIERE A DONDE TERMINA LA MUESTRA }

FACTOR = $1/(XF-XI)$

{ FACTOR POR EL QUE SE DEBEN DE MULTIPLICAR LAS
 CANTIDADES EN PIXELES PARA CONVERTIRLAS A CENTIMETROS }

FIN DEL PROCEDIMIENTO CALIBRA

PROCEDIMIENTO HIDE

{ ESTE PROCEDIMIENTO OBTIENE LA MEDIDA DEL PERFIL, ASI COMO EL
COEFICIENTE DE RUGOSIDAD LINEAL }

INICIO

REPITE

SENSA EL MOUSE

HASTA QUE SE OPRIMA EL BOTON

GUARDA LA ABCSCISA INICIAL XI

{ ESTA ABCSCISA SE REFIERE A DONDE COMIENZAREMOS A MEDIR }

REPITE

SENSA EL MOUSE

HASTA QUE SE OPRIMA EL BOTON

GUARDA LA ABCSCISA FINAL XF

{ ESTA ABCSCISA SE REFIERE A DONDE TERMINAREMOS DE MEDIR }

REPITE

{ DESDE LA POSICION INICIAL DE X }

INCREMENTA COORDENADA Y

REVISAS COLOR DEL PIXEL

HASTA QUE SEA EL COLOR SEA MAYOR A OCHO

{ DETECTA EL BORDE }

PINTA EL PRIMER PIXEL DE ROJO

APUNTA HACIA EL NE

INICIALIZA VARIABLES

H = RAIZ DE DOS

LONG = CERO

REPITE

EN CASO DE QUE APUNTE HACIA

N : SI EL PIXEL QUE ESTA AL N ES MAYOR O
 IGUAL A OCHO ENTONCES
 MUEVETE A ESA POSICION
 PINTA EL PIXEL DE ROJO
 INCREMENTA LONG + 1
 APUNTA HACIA EL NO
 DE OTRA MANERA
 APUNTA HACIA EL NE

NE : SI EL PIXEL QUE ESTA AL NE ES MAYOR O
 IGUAL A OCHO ENTONCES
 MUEVETE A ESA POSICION
 PINTA EL PIXEL DE ROJO
 INCREMENTA LONG + H
 APUNTA HACIA EL NO
 DE OTRA MANERA
 APUNTA HACIA EL E

E : SI EL PIXEL QUE ESTA AL E ES MAYOR O
 IGUAL A OCHO ENTONCES
 MUEVETE A ESA POSICION
 PINTA EL PIXEL DE ROJO
 INCREMENTA LONG + 1
 APUNTA HACIA EL NE
 DE OTRA MANERA
 APUNTA HACIA EL SE

SE : SI EL PIXEL QUE ESTA AL SE ES MAYOR O
 IGUAL A OCHO ENTONCES
 MUEVETE A ESA POSICION
 PINTA EL PIXEL DE ROJO
 INCREMENTA LONG + H
 APUNTA HACIA EL NE

DE OTRA MANERA

APUNTA HACIA EL S

S : SI EL PIXEL QUE ESTA AL S ES MAYOR O

IGUAL A OCHO ENTONCES

MUEVETE A ESA POSICION

PINTA EL PIXEL DE ROJO

INCREMENTA LONG + 1

APUNTA HACIA EL SE

DE OTRA MANERA

APUNTA HACIA EL SO

SO : SI EL PIXEL QUE ESTA AL SO ES MAYOR O

IGUAL A OCHO ENTONCES

MUEVETE A ESA POSICION

PINTA EL PIXEL DE ROJO

INCREMENTA LONG + H

APUNTA HACIA EL SE

DE OTRA MANERA

APUNTA HACIA EL O

O : SI EL PIXEL QUE ESTA AL O ES MAYOR O

IGUAL A OCHO ENTONCES

MUEVETE A ESA POSICION

PINTA EL PIXEL DE ROJO

INCREMENTA LONG + 1

APUNTA HACIA EL SO

DE OTRA MANERA

APUNTA HACIA EL NO

NO : SI EL PIXEL QUE ESTA AL NO ES MAYOR O

IGUAL A OCHO ENTONCES

MUEVETE A ESA POSICION

PINTA EL PIXEL DE ROJO
 INCREMENTA LONG + H
 APUNTA HACIA EL SO
 DE OTRA MANERA
 APUNTA HACIA EL N

HASTA QUE LLEGUE A LA ABCISA FINAL XF
 { LA LONGITUD EN PÍXELES ESTA EN LA VARIABLE LONG }
 SE MULTIPLICA LONG * FACTOR
 { ESTO SE HACE PARA OBTENER LA LONGITUD EN CENTIMETROS }

FIN DEL PROCEDIMIENTO MIDE

PROCEDIMIENTO DIMENSION FRACTAL

{ ESTE PROCEDIMIENTO OBTIENE LA DIMENSION FRACTAL }

INICIO

DESDE INCRE IGUAL A 1 HASTA 50

INICIALIZA VARIABLES

CONT = 0 { ALMACENA EL NUMERO DE SEGMENTOS DE
 TAMAÑO INCRE }

X1, Y1, X2, Y2, XB, YB = 0

POS = NE

REPITE

EN CASO DE QUE APUNTE HACIA

N : SI EL PIXEL QUE ESTA AL N ES MAYOR O
 IGUAL A OCHO ENTONCES
 MUEVETE A ESA POSICION

```

DIST = SQRT(SQR(X2-X1)
            +SQR(Y2-Y1))
{ MIDE LA DISTANCIA LINEAL
  ENTRE 2 PÍXELES }
SI DIST >= INCRE ENTONCES
    X1 = X2
    Y1 = Y2
    INCREMENTA CONT + 1
  APUNTA HACIA EL NO
  DE OTRA MANERA
  APUNTA HACIA EL NE

```

```

NE : SI EL PÍXEL QUE ESTA AL NE ES MAYOR O
     IGUAL A OCHO ENTONCES
     MUEVETE A ESA POSICION
     DIST = SQRT(SQR(X2-X1)
                 +SQR(Y2-Y1))
     { MIDE LA DISTANCIA LINEAL
       ENTRE 2 PÍXELES }
     SI DIST >= INCRE ENTONCES
         X1 = X2
         Y1 = Y2
         INCREMENTA CONT + 1
     APUNTA HACIA EL NO
     DE OTRA MANERA
     APUNTA HACIA EL E

```

```

E : SI EL PÍXEL QUE ESTA AL E ES MAYOR O
    IGUAL A OCHO ENTONCES
    MUEVETE A ESA POSICION
    DIST = SQRT(SQR(X2-X1)
                +SQR(Y2-Y1))

```

```

{ MIDE LA DISTANCIA LINEAL
  ENTRE 2 PÍXELES }
SI DIST >= INCRE ENTONCES
  X1 = X2
  Y1 = Y2
  INCREMENTA CONT + 1
  APUNTA HACIA EL NE
DE OTRA MANERA
  APUNTA HACIA EL SE

```

```

SE : SI EL PÍXEL QUE ESTA AL SE ES MAYOR O
    IGUAL A OCHO ENTONCES

```

```

  MUEVETE A ESA POSICION
  DIST = SQRT(SQR(X2-X1)
              +SQR(Y2-Y1))
  { MIDE LA DISTANCIA LINEAL
    ENTRE 2 PÍXELES }
  SI DIST >= INCRE ENTONCES
    X1 = X2
    Y1 = Y2
    INCREMENTA CONT + 1
    APUNTA HACIA EL NE
  DE OTRA MANERA
    APUNTA HACIA EL S

```

```

S : SI EL PÍXEL QUE ESTA AL S ES MAYOR O
    IGUAL A OCHO ENTONCES

```

```

  MUEVETE A ESA POSICION
  DIST = SQRT(SQR(X2-X1)
              +SQR(Y2-Y1))
  { MIDE LA DISTANCIA LINEAL
    ENTRE 2 PÍXELES }
  SI DIST >= INCRE ENTONCES

```

X1 = X2

Y1 = Y2

INCREMENTA CONT + 1

APUNTA HACIA EL SE

DE OTRA MANERA

APUNTA HACIA EL SO

SO : SI EL PIXEL QUE ESTA AL SO ES MAYOR O
IGUAL A OCHO ENTONCES

MUEVETE A ESA POSICION

DIST = SQRT(SQR(X2-X1)

+SQR(Y2-Y1))

{ MIDE LA DISTANCIA LINEAL
ENTRE 2 PIXELES }

SI DIST >= INCRE ENTONCES

X1 = X2

Y1 = Y2

INCREMENTA CONT + 1

APUNTA HACIA EL SE

DE OTRA MANERA

APUNTA HACIA EL O

O : SI EL PIXEL QUE ESTA AL O ES MAYOR O
IGUAL A OCHO ENTONCES

MUEVETE A ESA POSICION

DIST = SQRT(SQR(X2-X1)

+SQR(Y2-Y1))

{ MIDE LA DISTANCIA LINEAL
ENTRE 2 PIXELES }

SI DIST >= INCRE ENTONCES

X1 = X2

Y1 = Y2

INCREMENTA CONT + 1

APUNTA HACIA EL SO
 DE OTRA MANERA
 APUNTA HACIA EL NO

NO : SI EL PIXEL QUE ESTA AL NO ES MAYOR O
 IGUAL A OCHO ENTONCES

MUEVETE A ESA POSICION
 $DIST = \sqrt{SQRT(X2-X1) + SQRT(Y2-Y1)}$

{ MIDE LA DISTANCIA LINEAL
 ENTRE 2 PÍXELES }

SI DIST \geq INCRE ENTONCES

X1 = X2

Y1 = Y2

INCREMENTA CONT + 1

APUNTA HACIA EL SO
 DE OTRA MANERA
 APUNTA HACIA EL N

HASTA QUE LLEGUE A LA ABSCISA FINAL XF
 { EL NUMERO DE SEGMENTOS ESTA GUARDADO EN CONT }
 ARREGLO[INCRE] = CONT
 { SE ALMACENAN LOS VALORES DE CONT EN UN ARREGLO }

FIN DE CICLO

INICIALIZA VARIABLES

SX,SY,SXY,SX2,XM,YM = 0

{ SE UTILIZAN PARA LINEALIZAR LA CURVA Y OBTENER D }

DESDE I IGUAL A 1 HASTA 50

SX = SX + LN(I)

SY = SY + LN(1 / ARREGLO[I])

SXY = SKY + LN(I) * LN(1 / ARREGLO[I])

SX2 = SX2 + SQR(LN(I))

XM = XM + LN(I)

YM = YM + LN(1 / ARREGLO[I])

FIN DE CICLO

XM = XM / 50

YM = YM / 50

D = (50 * SX - SX * SY) / (50 * SX2 - SQR(SX))

{ OBTIENE LA DIMENSION FRACTAL }

FIN DEL PROCEDIMIENTO FRACTAL

APENDICE C

C. INSTRUCTIVO DE USO DE FRACTUS

Requerimientos para correr Fractus:

Se recomienda procesador 386 en adelante
 Monitor VGA
 Disco duro
 Sistema operativo MS-DOS V5.0 en adelante
 Scanner
 Mouse (de preferencia)

El paquete ocupa aproximadamente 100KB y las imágenes digitalizadas ocupan aproximadamente 500KB cada una, por lo que se recomienda un espacio en disco de 10MB.

En el caso de que no se cuente con mouse, se pueden usar las siguientes teclas:

←↑→↓	Movimiento
+	Incremento en el salto
-	Decremento en el salto
INS	Botón izquierdo
DEL	Botón derecho

Instalación de FRACTUS en el disco duro:

1. Se debe crear un subdirectorío llamado Fractus.
2. Copiar todos los archivos contenidos en el diskette a ese subdirectorío.
3. El programa se corre tecleando Fractus desde el subdirectorío Fractus.

Obtención de imágenes:

Las fotografías obtenidas del microscopio (fractografías) deber ser digitalizadas a 16 niveles de gris usando un scanner. El software de manejo del scanner debe permitir archivar las imágenes en formato TIFF, que es el que Fractus utiliza. Las imagenes digitalizadas se deberán copiar en el subdirectorío Fractus.

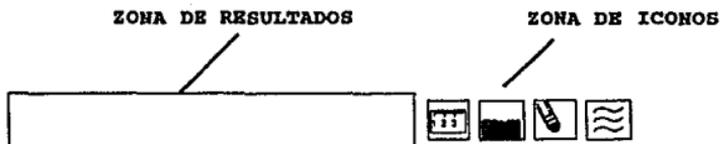
Si el paquete del scanner así lo permite, se deberán ajustar los controles de brillo y contraste para obtener la mejor imagen posible. También se debe verificar que el tamaño de la imagen final no exceda 640 pixeles de ancho por 480 pixeles de largo, lo cual puede calcularse del número de puntos por pulgada.

Explicación de la pantalla de trabajo de Fractus

Al correr Fractus aparecerá una pantalla que contiene las siguientes partes:



ZONA DE DESPLIEGUE



En el Menú se tienen 2 opciones:

Listar

Salir

En la zona de iconos se tienen 4 opciones:

Desplegar

Borrar

Filtrar

Medir

A continuación se explican cada una de las opciones del menú y de la zona de iconos.

Listar

Permite ver cuáles son los archivos de imágenes (.TIF) o filtrados por Fractus (.FIL) que hay en el subdirectorío de Fractus.

Salir

Permite dar por terminado el trabajo en Fractus y salir al sistema operativo MS-DOS.



Desplegar

Se usa cuando se desea llamar una imagen para visualizarla. Para ello se deberá teclear el nombre del archivo con extensión.



Borrar

Limpia la zona de despliegue.



Filtrar

Todas las imágenes TIFF que hayan sido adquiridas deben ser filtradas antes de hacer cualquier tipo de medición, ya que una imagen con ruido arrojaría errores o haría imposible su medición. El proceso generará un nuevo archivo con extensión

.FIL, el cual contendrá la imagen filtrada.



Medir

Este icono funcionará sólo si hay una imagen desplegada. Fractus esperará a que se seleccionen varios puntos correspondientes a:

1. el borde izquierdo de la muestra (botón izquierdo del mouse)
2. el borde derecho de la muestra (botón derecho del mouse)
3. el borde izquierdo de la sección a medir (botón izquierdo del mouse)
4. el borde derecho de la sección a medir (botón derecho del mouse). Los cuatro puntos son necesarios ya que Fractus debe hacer una calibración con respecto al tamaño real de la muestra y su tamaño en pantalla.

Una vez hecho esto, aparecerán los valores de las mediciones en la zona de resultados.

Procedimiento para obtener los parámetros característicos de un perfil de fractura

I. Si no se ha filtrado la imagen

- + Seleccionar icono de Filtrar
- + Dar el nombre del archivo a filtrar

II. Si ya se filtró la imagen

- + Seleccionar icono de Borrar
- + Seleccionar icono de Desplegar
- + Seleccionar icono de Medir
- + Seleccionar borde izquierdo de la muestra
- + Seleccionar borde derecho de la muestra
- + Seleccionar borde izquierdo de la sección a medir
- + Seleccionar borde derecho de la sección a medir

En caso de querer conocer la Dimensión Fractal

+ Seleccionar icono de Borrar

+ Seleccionar icono de Dimensión Fractal