

FRACTOGRAFÍA A COLOR: FUNDAMENTOS Y POSIBILIDADES

O. A. Hilders*

Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Universidad Central de Venezuela.
Caracas, Venezuela.

*Autor de correspondencia: ohilders@hotmail.com, Tel-Fax: +58 212 3725230

Recibido: Noviembre 2012. Aprobado: Diciembre 2012.

Publicado: Diciembre 2012.

RESUMEN

Se muestra la posibilidad del uso de la fractografía a color mediante la edición de imágenes en blanco y negro tomadas a través del microscopio electrónico de barrido (SEM), y del microscopio electrónico de transmisión (TEM), con el objetivo de mejorar la interpretación de los accidentes de la topografía de fractura, así como las mediciones que posteriormente se puedan realizar mediante fractografía cuantitativa. Ya que la fractografía a color basada en el uso del SEM es una técnica ausente de la literatura, y que éste es el instrumento más utilizado en los estudios fractográficos, el uso de la fractografía a color se discute específicamente en función del mismo. Esta técnica se implementó en varias fractografías tomadas mediante el SEM (fractura por coalescencia de cavidades y cuasi-clivaje), y en algunas réplicas mediante el TEM (fractura de láminas de cementita en la perlita). Esta última técnica ha sido incluida, solo para demostrar en perspectiva el uso del color como un factor a considerar. El coloreado y mejoramiento general de las fractografías se realizó mediante el editor Microsoft Word 2010®; el cual incluye la edición de imágenes a través de un gran número de opciones, lo que hace del mismo una alternativa a los programas de software gráfico externos. Esta elección también es conveniente, resultando muy versátil, económica y accesible. Por otra parte, el concepto de *percepción* ha sido tomado en cuenta, dada su importancia en la interpretación de las imágenes fractográficas, ya que mediante el uso del color se observa una mejora en la discriminación de aspectos tales como: rugosidad, separación, profundidad etc., influenciando la objetividad del análisis fractográfico. Se discuten las razones que justifican el uso de la fractografía a color mediante el SEM, y su gran potencial de aplicación como herramienta técnica de importancia, y no como algo meramente estético. Debido a que toda técnica en particular suele ser complementaria de las demás, se ha considerado conveniente mencionar algunas de las más importantes actualmente y que pueden relacionarse con la fractografía a color. Entre éstas técnicas pueden mencionarse: la metalografía, la difracción de electrones retrodispersados (EBSD), la microscopía de fuerza atómica (AFM), la microscopía de fuerza ultrasónica (UFM), la microscopía de interferencia de luz blanca (WLIM) y la tomografía [particularmente la tomografía electrónica (ET)], las cuales han sido tomadas en cuenta a través de diversos tipos de trabajos, teniendo las mismas como aspecto común la utilización frecuente del color.

Palabras claves: Fractografía a color, edición de imágenes, microscopio electrónico de barrido, percepción, fractal.

COLOR FRACTOGRAPHY: BASICS AND POTENTIAL

ABSTRACT

This article is an attempt to show the possibility to use color fractography through the edition of black and white pictures, taken from the scanning electron microscope (SEM) and the transmission electron microscope (TEM), with the aim of enhancing the interpretation of fracture surface topography features from both, qualitative and quantitative point of view. There is no information in the literature regarding color fractography using the SEM, thus, we discuss this technique on the basis of this instrument since it is by far the most important and widespread tool for fractographic studies. We applied color fractography in two SEM fracture surfaces of dimpled and quasi-cleavage type respectively and in two TEM carbon replicas showing fractured cementite lamellae in pearlite. Carbon replicas were used in order to show in perspective the usefulness of color fractography. The general enhancement and coloring of black and white pictures were done using the Microsoft Word 2010® software, which a user can utilize as an image editing program through many available options, being an economic, versatile and convenient alternative to the external graphical software programs. The concept of *perception* had been highlighted, since using color greatly enhanced the discrimination capacity of roughness, deepness, separation, etc., giving a greater degree of objectivity to the fractographic analysis. The reasons to support color fractography in the SEM and its great potential applications, as an important technical tool more than a simple aesthetic matter, are discussed. In general, since different techniques frequently complement each other, we consider useful to mention some of the current ones which have in common the use of color: metallography, electron backscatter diffraction (EBSD), atomic force microscopy (AFM), ultrasonic force microscopy (UFM), white light interference microscopy (WLIM), and tomography, particularly electron tomography (ET).

Keywords: Color-fractography, image-edition, scanning electron microscope, perception, fractal.

INTRODUCCIÓN

La fractografía es una de las áreas de mayor importancia en los estudios de los procesos de fractura en materiales. Aparte del interés puramente teórico que pueda generar, la fractografía se ha desarrollado de manera natural como una aplicación práctica de la microscopía electrónica, particularmente mediante el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM). Inicialmente y antes del desarrollo del SEM, las superficies de fractura se analizaban utilizando el microscopio electrónico de transmisión (TEM), a través del uso de réplicas [1]. Posiblemente, los mayores aportes a la investigación de los mecanismos de fractura en materiales metálicos durante los primeros años de desarrollo de la fractografía mediante réplicas (naturaleza de la propagación de grietas, modelos físicos, micromecanismos de fractura etc.), corresponde a Beachem [2-5], aunque los desarrollos en ésta área realizados por otros autores resultan especialmente numerosos cuando se habla de los aportes a la fractografía luego de la aparición del SEM. Aparte de otros, dos autores en particular pueden ser consultados en relación a éstas dos etapas generales del desarrollo de la fractografía, debido a que han revisado ampliamente el tema: Broek [6], en lo concerniente a las contribuciones de la microscopía electrónica de transmisión al desarrollo de la teoría de fractura (réplicas especialmente) y Hull [7], quien ha resumido las técnicas de observación, medida e interpretación de la topografía de las superficies de fractura en muchas clases de materiales, especialmente mediante el uso del SEM. Un trabajo importante que resume las características básicas del análisis fractográfico mediante el SEM en diferentes tipos de materiales, es el debido a Brooks *et al.* [8]. En cuanto a los avances realizados en las técnicas relacionadas con el SEM: el contraste, la reducción del haz de energía a unos pocos electrón-voltios, los papeles de la composición superficial y sub-superficial: el estado actual de la espectroscopía de dispersión de energía (EDS), la espectroscopía de dispersión de onda (WDS), la arquitectura paralela que ha

surgido entre el SEM y el microanálisis por sonda de electrones (EPM), la micro-fluorescencia por rayos X (μ XRF) etc., pueden considerarse los trabajos recientes de Cazaux [9], Holton [10], Hodoroaba *et al.* [11], etc., entre otros.

No obstante lo dicho, y pese al uso intensivo del SEM en áreas de la ingeniería mecánica y de materiales especialmente (como la del análisis de fallas), sin embargo; el uso del color es una técnica prácticamente inexplorada en fractografía, a diferencia de la metalografía; área en la cual es muy conocida [12, 13], pese a que históricamente también estuvo relativamente limitada, especialmente por el costo de las películas, del revelado y de la reproducción de las imágenes para su publicación. Entre los métodos utilizados en la metalografía a color mediante microscopía óptica, se encuentran el de contraste de interferencia diferencial, luz polarizada, campo oscuro, campo brillante, ataque químico, etc. [14, 15]. Con el perfeccionamiento de las computadoras, y el desarrollo paralelo del procesamiento digital y edición de imágenes, sin embargo; el uso del color en metalografía resulta actualmente simple y económico, por lo cual es sorprendente que el mismo no se haya desarrollado de igual forma en fractografía. Respecto al uso del color en sí mismo, puede decirse que la primera ventaja que ofrece está relacionada con la sensibilidad del ojo humano a un enorme número de colores [16], mientras que respecto a los tonos grises esta sensibilidad se reduce a unos 40 solamente, incluidos el blanco y el negro.

Fractografía vs metalografía

En relación a la diferencia básica entre la técnica más común asociada a la metalografía a color y la técnica planteada de fractografía a color, debe hacerse una aclaratoria: En el caso de la metalografía a color mediante ataque químico, bien sea que se utilice película a color, o bien, que se editen a color imágenes previamente

desarrolladas en películas en blanco y negro (escala de grises), siempre estaremos tratando con material alterado, debido a las reacciones químicas generadas por las soluciones empleadas, las cuales deben ocurrir para diferenciar las distintas fases, los granos con diferente textura, las segregaciones etc., en base a sus distintas reactividades, sin lo cual no habría diferenciación posterior en base al color. Por otra parte, en la fractografía a color estamos interesados, en principio; en la preservación de la topografía de fractura en todos sus detalles, ya que de otra forma, en muchos casos no se podría establecer conclusión alguna acerca de los eventos, mecanismos de separación, accidentes característicos, etc., relacionados con el proceso de fractura; por lo que el ataque químico previo no siempre es una etapa a ser considerada. En casos específicos, no obstante, el ataque químico selectivo y controlado en ciertas zonas de la superficie de fractura, es necesario; revelando aspectos sub-estructurales de interés, tales como: placas de martensita, martensita en paquetes, maclas, láminas de cementita, colonias de perlita, bainita inferior etc., en aceros ordinarios al carbono [17, 18], y facetas de clivaje y grietas secundarias, en asociación con martensita inducida por deformación y martensita asistida por esfuerzos, en aleaciones metaestables Fe-Ni-C [19].

Sasaki *et al.* [20], Shechtman [21], Chesnutt *et al.* [22] y Thompson *et al.* [23]; han demostrado la utilidad de ciertas técnicas específicas para la observación simultánea de la superficie de fractura y la estructura subyacente en diversos tipos de aleaciones metálicas, mediante el pulido y ataque químico en un plano diferente al de la trayectoria general de fractura. En éstos casos podría aplicarse de manera simultánea, tanto la fractografía como la metalografía a color. En el presente caso, cuando hablemos de fractografía a color, nos referiremos a la manipulación de imágenes previas en blanco y negro obtenidas mediante el SEM, a través del uso de editores especiales, los cuales son programas de software gráfico,

que además del color ofrecen una serie de opciones para el tratamiento de las imágenes de las superficies de fractura.

Fractografía y su relación con otras técnicas

Es importante distinguir, que aparte de la metalografía existen variadas técnicas que hacen uso del color, y que de alguna manera están asociadas al estudio de las superficies de fractura, pero que por su naturaleza no constituyen parte de la presente propuesta. Esta asociación, la cual se explicará más adelante, es importante, ya que toda técnica en sí misma suele ser complementaria de las demás. Entre estas técnicas mencionaremos primeramente debido a su importancia, a la difracción de electrones retrodispersados (EBSD) [24], y a la microscopía de fuerza atómica (MFA) [25]. Mediante la EBSD pueden determinarse los patrones de Kikuchi, los cuales, al ser indexados (transformada de Hough [26]), pueden utilizarse para el análisis de la textura de las muestras a estudiar, generalmente a través de las figuras de polo, figuras de polo inversa, funciones de distribución de orientación, etc. El análisis de éstas muestras, cuya preparación es similar a la empleada en la metalografía común, se hace con más frecuencia en base a las figuras de polo inversas, asignando en el triángulo estereográfico estándar (sistema cúbico) los colores: rojo $\{[001] \quad (001)\}$, verde $\{[010] \quad (010)\}$ azul $\{[111] \quad (111)\}$ y toda la gama de tonos intermedios que correspondan a la ubicación relativa de una dirección/plano, respecto a los vértices del triángulo. A su vez, estos colores deberán corresponder a los diferentes granos en la superficie de la muestra, de acuerdo a su respectiva orientación. Ahora bien, esta técnica, aplicada comúnmente mediante el SEM, ha sido utilizada en fractografía de diversas maneras, aunque su aprovechamiento está relacionado con aspectos relativos a la orientación de ciertas zonas de la superficie de fractura, de la zona inmediata subyacente a ésta, o de un plano de análisis generado a partir de un corte a un cierto ángulo a través de la misma. Un aspecto común, sin embargo; es el coloreado de las secciones planas, y en algunos casos, el

coloreado de zonas planas específicas en la superficie de fractura (generalmente facetas de clivaje o cuasi-clivaje). Por ejemplo, Davies *et al.* [27], han determinado los índices cristalográficos de los planos de clivaje en aceros de baja aleación Mn-Mo-Ni y aceros de ultra bajo carbono (Fe-0.002C-0.058P), fracturados a -196 °C por impacto; mediante mediciones directas en la superficie de fractura e indirectas en secciones metalográficas perpendiculares a ésta, utilizando EBSD. Las correlaciones entre las mediciones directas e indirectas, mostraron una orientación del tipo [001] para las facetas de clivaje. Kumar *et al.* [28], por su parte, han analizado grietas de cuasi-clivaje e identificado los planos respectivos, en acero esferoidizado A533B fracturado por tensión; utilizando secciones metalográficas planas para las mediciones mediante EBSD y analizando visualmente por separado las superficies de fractura mediante el SEM.

Un estudio interesante es el realizado por Szczepanski *et al.* [29], en el cual se analiza el inicio de grietas en Ti-6246, mediante fatiga de alto ciclaje. A través de un sistema de microscopía de orientación de imagen (sistema para la indexación automática de patrones de difracción obtenidos mediante EBSD), se analizaron secciones planas justo debajo de las superficies de fractura, donde se inicia el agrietamiento por fatiga, mientras que en las superficies de fractura se identificaron una serie de facetas de clivaje asociadas a la zona de inicio de las grietas, cuyas normales se encontraron desorientadas más de 30° respecto al plano general de fractura. Mediante un sistema para el análisis de pares estéreo, se estudió un gran número de éstas facetas, determinándose su influencia en el inicio del agrietamiento, mediante el estudio de su distribución espacial y su número por unidad de área en la superficie de fractura (densidad). Para facilitar tanto el cálculo de la densidad como su identificación, las facetas fueron coloreadas uniformemente en amarillo. Este ejemplo constituye uno de los pocos en los que la superficie de fractura ha sido

coloreada localmente con una finalidad distinta a la que se persigue mediante el uso de la EBSD. Dos ejemplos recientes muestran la versatilidad de la EBSD, en el estudio de la relación entre los aspectos microestructurales y los procesos de fractura: Koyama *et al.* [30], han determinado que la falla prematura a lo largo de los límites de macla en aceros Fe-Mn-C, se debe a la concentración de esfuerzos generados por martensita ϵ , lo cual induce fractura por cuasi-clivaje; mientras que Jafari *et al.* [31], han evaluado la posibilidad de suprimir los efectos fragilizantes (fractura por cuasi-clivaje), de la segregación de P en los límites de grano, aumentando la energía de impacto en un acero de alta resistencia, mediante la introducción de una estructura ultrafina de granos elongados, obtenida mediante laminación en tibio, para producir una textura de fibra fuertemente orientada en la dirección de laminación, según la dirección $\langle 110 \rangle$. En ambos casos se aplicó ampliamente esta técnica. Otro de los raros casos en los cuales se ha utilizado el coloreado local en una superficie de fractura, ha sido en el análisis de la influencia de la microestructura y el envejecimiento, en la fatiga de bajo ciclaje de las aleaciones de magnesio AZ91 y AM60 producidas por fundición de alto vacío [32]. Mediante imágenes de electrones secundarios tomadas en el SEM, fue posible estudiar en detalle las porosidades en las cuales se originaron las grietas de fatiga, lo cual se facilitó a través del coloreado selectivo de estas porosidades y sus alrededores.

En el caso de la AFM, puede decirse que la misma guarda una relación más estrecha con la propuesta del presente trabajo, ya que como metodología, su empleo se acerca mucho a la práctica común del uso del SEM, además de que frecuentemente las superficies de fractura analizadas mediante AFM se presentan a color. Aunque la AFM ofrece obvias ventajas, como la presentación tridimensional de las superficies de fractura, una capacidad de resolución mayor, la capacidad de operar en

ausencia de vacío; entre otras [33], sin embargo, la proposición de la fractografía a color como método de análisis se hará desde el punto de vista del SEM, no solamente porque ha sido una técnica poco explorada, sino también porque este instrumento ofrece otras ventajas importantes para el estudio fractográfico, como un área de análisis del orden de los mm x mm (en lugar de un máximo de alrededor de 150 x 150 μm , como en el caso del AFM); además de que el tiempo de barrido del SEM lo acerca a una reproducción de la imagen que ocurre casi en tiempo real. Adicionalmente debe mencionarse una ventaja muy importante en el análisis de los mecanismos de fractura mediante el SEM: la reproducibilidad de la topografía de fractura es mayor que en el caso del AFM, ya que en este último la sonda de rastreo o barrido no es idealmente aguda, por lo que la imagen obtenida no refleja la topografía real de la superficie de fractura, sino la interacción de la misma con la sonda. Este efecto es llamado *convolución de la sonda* [34].

El AFM ha sido utilizado en multitud de estudios en muchas clases de materiales. Por ejemplo: Afzal *et al.* [35] han determinado mediante el análisis de superficies de fractura por AFM, que la resistencia a la propagación de grietas se incrementa, y con ello la resistencia y la tenacidad; en polímeros híbridos bi-fásicos compuestos por epoxy como matriz orgánica, en la cual se ha introducido dióxido de silicio (SiO_2). Dependiendo de la concentración, distribución e interacción con el epoxy, el SiO_2 , influenciará la resistencia y la tenacidad del polímero, aunque estas propiedades están determinadas, en general, por el epoxy, que es la fase mayoritaria. Las superficies de fractura respectivas se analizaron en color, lo que facilitó el estudio de los cambios en morfología. De igual forma, Smith *et al.* [36], han determinado las diferencias en dimensión fractal de las tres zonas características de la superficies de fractura del cristal de sílice (SiO_2): zona espejo, zona difusa y zona rugosa; mediante fractografías a color tomadas a través del AFM.

Esta herramienta ha demostrado ser útil en fractografía, específicamente cuando no es posible detectar ciertos accidentes topográficos mediante el SEM. Recientemente el AFM ha sido aplicado al análisis de álabes de turbina de una planta nuclear, que fallaron por fatiga y/o agrietamiento debido a corrosión por tensiones [37]. En éste caso, sólo mediante AFM fue posible detectar estriaciones de fatiga en el acero al 12% de Cr de los álabes. La rugosidad de las superficies de fractura Rq , pudo ser medida a través del AFM, observándose una relación lineal entre ésta y el intervalo del factor de intensidad de esfuerzos ΔK , notándose igualmente un aumento lineal de Rq con el aumento del intervalo de carga ΔP . De esta forma, la condición de carga aplicada a los álabes de turbina, puede ser predicha. Nalladega *et al.* [38], por su parte, han estudiado los aspectos de la microestructura que controlan la fractura por fatiga en aleaciones de Ni nanocristalinas y de grano ultrafino; mediante la aplicación conjunta de nuevas técnicas basadas en el AFM, que vale la pena mencionar. Estos autores combinaron el uso del AFM con la microscopía de interferencia de luz blanca WLIM, y la microscopía de fuerza ultrasónica UFM, en la caracterización de las superficies de fractura respectivas. La WLIM es una poderosa técnica para la medición de características topográficas de las superficies de fractura, que emplea altas resoluciones verticales y moderadas resoluciones laterales, a nanoescala, y sin contacto; y cuyas principales ventajas son las de permitir un amplio campo visual y una alta velocidad de barrido. En cuanto a la UFM, se posibilita la obtención de una imagen muy superior en detalles a la obtenida mediante la AFM, ya que a través de la combinación AFM/UFM, se logra una imagen acústica, al detectarse las ondas ultrasónicas mediante la sonda del AFM. De esta forma es posible realizar un mapeo de las variaciones elásticas en el material, en los casos en los que una superficie de fractura muy plana no permita un contraste suficiente al utilizar la AFM. La combinación de éstas técnicas ha permitido a Nalladega *et al.* [38], la

obtención de superficies de fractura cuyos colores abarcan el espectro visible, desde los colores oscuros como el índigo para las zonas más profundas, hasta los claros como el naranja para las zonas más altas.

Al igual que en el caso anterior, cuando las técnicas de EBSD y AFM, junto a la más tradicional del SEM, son empleadas de manera conjunta, se ha demostrado que pueden ser de gran utilidad. Por ejemplo, Roach [39] ha estudiado las fallas por fatiga de los aceros inoxidables 316L y 22Cr-13Ni-5Mn, con una larga historia de uso en implantes quirúrgicos, así como en un acero austenítico de alto nitrógeno, analizando la topografía de fractura a escala nanométrica (AFM) en combinación con los datos del inicio y propagación de grietas (EBSD) y el estudio y cuantificación de los aspectos morfológicos de las superficies de fractura a nivel micrométrico (SEM). Aunque en su conjunto estas técnicas contribuyeron al conocimiento detallado de los aspectos que controlan los mecanismos de fractura en éstas aleaciones, sin embargo; solo las dos primeras hacen uso del color, como en casi todos los análisis donde al menos 2 de las mismas (incluida la del SEM) se utilicen simultáneamente. Finalmente, también debe mencionarse la técnica conocida como *tomografía*, la cual, en su sentido más amplio; puede definirse como el procesamiento de imágenes a través de secciones. En particular, la tomografía electrónica (ET) y la *holografía*, entre otras; son de gran interés en la ciencia de los materiales, ya que permiten la visualización y el análisis de estructuras en 3-D, a partir de materiales a nivel micro o nanométrico [40]. Una descripción muy completa de ésta técnica, ha sido dada por Banhart [41], mientras que un ejemplo de la relación de la misma con la fractografía, puede verse en el trabajo de Herbiga *et al.* [42]; donde se analiza ampliamente el crecimiento de grietas cortas de fatiga, a través de la reconstrucción en 3-D, tanto de las grietas como de los granos con diferente orientación que controlan el crecimiento de éstas.

Dado que el uso del SEM se encuentra muy difundido y constituye una herramienta de uso rutinario ampliamente conocida, la justificación de la técnica del color ha de estar suficientemente sustentada, para su aplicación en un área donde es casi inexistente; lo cual se hará a continuación en el planteamiento general del objetivo del trabajo, y a lo largo del mismo. El objetivo de esta investigación, es el de mostrar la posibilidad del uso de la fractografía a color, basada en la edición de imágenes (EDI), originalmente tomadas mediante el SEM, como una forma de mejorar la interpretación de los accidentes de la superficie de fractura. Este objetivo está dirigido al coloreado y manipulación de éstas imágenes, en forma tal que puedan resaltarse aspectos importantes de la topografía de fractura que a su vez sirvan para mejorar, tanto la comprensión cualitativa de los mecanismos de separación (y con ello el modelaje de estos mecanismos), como las mediciones que posteriormente puedan realizarse mediante fractografía cuantitativa. El proceso de percepción de imágenes juega un importante papel en la correcta interpretación de las mismas [43, 44], por lo que el mejoramiento en la capacidad de discriminación de aspectos tales como rugosidad, profundidad, separación, etc., al usar la técnica del color mediante la edición de imágenes, deberá influenciar positivamente la objetividad del análisis fractográfico en general. Actualmente el estudio de los procesos de percepción del color y las formas ha adquirido una importancia tal, que se ha incrementado su aplicación a las ciencias naturales y exactas, siendo el arte la conexión inevitable entre ambas [45 - 49]. En éste sentido resulta significativa la obra de autores cuyo desempeño está representado simultáneamente tanto en el campo de la física como en el del arte y la psicología [50-53]; en otras palabras, actualmente existe una tendencia innegable hacia la búsqueda del conocimiento a través de la investigación multidisciplinaria. De gran importancia ha sido igualmente el aporte de Mandelbrot, cuya obra sobre la geometría fractal ha trascendido los límites que separan

las áreas de la ciencia y la tecnología, de las asociadas al arte y las humanidades [54-57]. Lo anterior indica que resulta conveniente mencionar, aunque de manera breve, algunos aspectos de importancia relacionados con el concepto de *percepción*, lo cual puede redundar en un mejor entendimiento de las razones que justifican el uso de la fractografía a color como una herramienta técnica importante, y no como algo meramente estético. Estos aspectos serán descritos y discutidos convenientemente en el aparte respectivo. Adicionalmente debe mencionarse que en el presente trabajo no se pretende establecer un estándar o patrón de medición u observación, sino más bien llamar la atención sobre una metodología que resulta económica, accesible y que indudablemente puede complementar tanto a las observaciones cualitativas de las superficies de fractura, como a la fractografía cuantitativa.

En vista de la importancia actual de las técnicas del procesamiento de imágenes, y de su consideración en el presente trabajo para ser aplicadas a la fractografía, se hace necesario presentar, al menos desde un punto de vista básico, un resumen de las principales técnicas, desarrollos y aplicaciones en dicha área, distinguiendo al mismo tiempo entre el procesamiento digital de imágenes (PDI), y la edición de imágenes (EDI): Mientras el PDI ha sido tratado como un término genérico que incluye a la EDI, sin embargo; el primero se relaciona estrechamente con el desarrollo matemático del procesamiento, mientras que la EDI tiene que ver específicamente con la modificación de imágenes mediante el uso de un editor o programa de software gráfico (basado en los algoritmos creados mediante PDI).

Procesamiento digital de imágenes

En general, se denomina PDI al uso de algoritmos de computadora para la copia, almacenamiento, procesamiento, manipulación o modificación de documentos, planos, dibujos, gráficos, etc., en base a un formato digital, aunque, más que al uso; el término tiene

que ver con la creación de éstos algoritmos. A diferencia del llamado procesamiento analógico de imágenes (PAI), el PDI permite el uso de un número mucho mayor de algoritmos para su aplicación a los datos de entrada, y evita el aumento del ruido y la distorsión de la señal durante el procesamiento. Aunque la mayoría de las imágenes quedan definidas en 2 dimensiones, el PDI puede ser utilizado en forma de sistemas multidimensionales [58]. Muchas de las técnicas del PDI fueron desarrolladas durante la década de 1960, principalmente en el Laboratorio de Propulsión Jet, el Instituto Tecnológico de Massachusetts, los Laboratorios Bell y la Universidad de Maryland [59], siendo los primeros campos de aplicación, el satelital, el médico, el de reconocimiento de rostros y el mejoramiento de fotografías. El costo del procesamiento era elevado, debido a los equipos de computación disponibles para aquella época. Sin embargo, en la década de 1970 esta situación cambió, cuando se hizo posible el PDI a través del uso de hardware específicos en computadoras más económicas, pudiéndose procesar las imágenes en tiempo real. En la medida en que las computadoras de uso general se hicieron más rápidas, también se hizo innecesario el uso de hardware especializado para realizar las operaciones más características del PDI. En la actualidad el uso del PDI se ha extendido a los trabajos de rutina realizados en computadoras, ya que la introducción de tipos específicos de software como elementos estándar, así como también la de procesadores cada vez más veloces, han contribuido al aumento de la versatilidad y a la disminución del costo de ésta herramienta [60].

Edición de Imágenes

El proceso conocido como EDI tiene que ver con el cambio o mejoramiento de imágenes mediante el uso de un editor. El proceso de modificación de una imagen se efectúa a través de ciertos algoritmos, que de manera automática cambian la apariencia de un sector, o de la totalidad de la misma. La EDI abarca la modificación de

imágenes digitales, fotografías analógicas tradicionales o ilustraciones comunes. La herramienta típica mediante la cual un usuario puede manipular, mejorar y transformar imágenes, es el programa de software gráfico (a menudo incluido en procesadores de texto). En el año 1981, la compañía Quantel, de equipos de producción digital para televisión, cine y video, introdujo el primer sistema gráfico denominado Paintbox® [61], el cual era muy avanzado para su época. Este sistema, adoptado por la British Broadcasting Company (BBC), era controlado por computadoras Apple Macintosh®.

Los programas de software gráfico pueden agruparse en dos categorías principales: editores de gráficos matriciales (EGM) y editores de gráficos vectoriales (EGV). En el caso de los EGM, las imágenes, gráficos y fotografías quedan representadas mediante los llamados mapas de bits, los cuales son una estructura de malla rectangular o rejilla de puntos de color o píxeles, que se puede visualizar en un monitor, papel u otro dispositivo. A las imágenes en mapa de bits se las suele definir por su altura y su ancho (en píxeles) y por su profundidad de color (en bits por píxel), que determina el número de colores distintos que se pueden almacenar en cada punto individual, y por lo tanto, la calidad del color de la imagen. Mientras mayor tamaño tenga la imagen, mayor cantidad de memoria de disco abarcará. Por ejemplo, una imagen de 640 x 480 píxeles, provee una información que será almacenada en 307.200 píxeles, mientras que una imagen de 3070 x 2048 (de una cámara digital de 6,3 Megapíxeles), necesitará de 6.291.456. Ya que las imágenes de mapas de bits requieren de mucho espacio de memoria, se han diseñado algoritmos especiales para «comprimirlas» y reducir el tamaño de los archivos respectivos, siendo los formatos más comunes el JPEG® (por sus siglas en Inglés: Joint Photographic Experts Group), creado en 1992 y el GIF® (por sus siglas en Inglés: Graphics Interchange Format), creado en 1987 [62-65]. El formato de imagen de mapa de bits está

ampliamente extendido y es el que se suele emplear para tomar fotografías digitales y realizar tomas de video. Para su obtención se usan dispositivos de conversión analógico-digitales, como escáneres y cámaras. Los EGV se distinguen de los EGM, en que los primeros representan las imágenes mediante el uso de las llamadas curvas de Bézier, en lugar de los mapas de bits. Las curvas de Bézier constituyen un sistema para el trazado de dibujos técnicos, cuya descripción matemática fue publicada por vez primera por el ingeniero Pierre Bézier en 1962 [66]. Posteriormente, la generación del código de las curvas y los trazados del lenguaje conocido como PostScript®, se basaron en las curvas de Bézier, permitiendo el desarrollo de sistemas de impresión de alta calidad desde el computador [67]. Este lenguaje sigue utilizándose ampliamente y se ha convertido en un estándar de calidad universal; por ello, los programas de diseño vectorial como Adobe Illustrator® y el Corel Draw®, dos de los más importantes programas de dibujo vectorial y otros, denominan «bézier» a algunas de sus herramientas de dibujo. Los gráficos vectoriales son preferidos para la manipulación de imágenes, en aquellos casos en los que éstas deban ser representadas en varios tamaños; ya que los gráficos de malla pueden ser reducidos en tamaño sin pérdida de calidad, pero podrían lucir “pixelados” al incrementarse éste. Por otra parte, la manipulación de imágenes almacenadas como mapas de bits, mediante programas de imágenes vectoriales, resulta más compleja, obteniéndose resultados de diferentes calidades, dependiendo del programa usado [68-70]. Por el contrario, es más fácil convertir una imagen vectorial en una imagen de mapa de bits a cualquier resolución, ya que la descripción de las formas en una imagen vectorial es tal, que éstas pueden ser reacomodadas sin dificultad al formato de malla.

Los programas de software gráfico ofrecen generalmente una serie de opciones para el mejoramiento de la imagen, que pueden ser totalmente automáticas, que se pueden

activar pulsando un botón, o a las que se puede tener acceso a través de un menú, como por ejemplo: tonalidad del color, brillo, nitidez, recorte automático, etc. Los mejores programas de software gráfico también ofrecen otras variadas opciones de manipulación de imágenes, algunas de las cuales son: (a) La alteración del tamaño mediante un algoritmo matemático que transforma el valor de los píxeles, al ampliar o reducir la imagen; (b) La reducción o el aumento del ruido. Si la reducción es excesiva al tratar de eliminar los defectos de imagen, se pueden perder detalles de esta, y si es poca, podríamos obtener una imagen relativamente mejor pero con presencia de defectos bien definidos, por lo que el uso de ésta opción resulta en un compromiso entre valores de máximo y mínimo ruido «permisibles» de acuerdo a lo que se busca. Debe tenerse en cuenta que el ruido tiende a invadir una imagen, cuando ésta se ha generado inicialmente a partir de un ambiente de poca luz; (c) El cambio en la profundidad del color, siendo ésta definida, como el número de bits utilizados para asignar el color de un solo píxel, en una imagen de mapa de bits. Mientras mayor sea la profundidad de color, más colores diferentes podrá asumir un píxel individual, por lo que la imagen será de mayor calidad. El formato JPEG® es capaz de almacenar 16,7 millones de colores; (d) El cambio de brillo y contraste simultáneos, el cual es utilizado para mejorar las imágenes que originalmente presentan una baja exposición, eliminando así el sombreado indeseable. Recientes avances han permitido el mejoramiento de zonas de baja exposición, mediante la modulación selectiva del contraste y el brillo, es decir; únicamente en píxeles por debajo de una cierta luminosidad, sin afectar al resto de la imagen. Un aspecto que resulta importante en la discriminación de los colores de una imagen, y por lo tanto, en la calidad de la percepción de la misma, es el matiz. Esta propiedad se define como aquella a través de la cual los colores pueden ser percibidos en el rango: rojo-amarillo-verde-azul, lo cual permite al sentido de la visión distinguir objetos que pueden ser muy similares o

idénticos en tamaño y forma, pero de diferente color, de acuerdo con la longitud de onda dominante de la luz [71]. El control de esta característica de la apariencia del color (matiz), es común en muchos de los programas de software gráficos actuales, los cuales también ofrecen opciones para definir las otras tres características del color: el tono, la saturación y la coloración. La definición apropiada de estos términos puede consultarse en la literatura pertinente [72, 73]. Las decisiones que podamos tomar al aplicar las diferentes opciones controladas mediante un editor gráfico, son prácticamente infinitas, por lo que también lo serán las categorías de imágenes obtenidas a partir de un patrón o modelo inicial.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo está basado en fotografías en blanco y negro tomadas mediante el SEM y el TEM, con la asesoría del autor [74-76], en tanto que la edición de las mismas ha sido realizada por éste mediante el editor Microsoft Word 2010®, el cual es la principal herramienta del conjunto de aplicaciones denominado Microsoft Office 2010® [77]. Aunque el mencionado editor tiene como principal función la de procesador de textos, sin embargo incluye la edición de imágenes, con un gran número de opciones para ajuste, corrección, efectos especiales, pre-visualización activa, etc., lo que hace del mismo una alternativa a los programas de software gráfico externos. Esta opción resulta también conveniente, ya que el editor Microsoft Word 2010® es versátil, económico y accesible, siendo por lo mismo uno de los más utilizados para variados fines.

Los casos de aplicación que serán presentados, basados en fotografías en blanco y negro como ya se mencionó, son los siguientes: (a) Dos microestructuras perlíticas tomadas mediante un microscopio electrónico de transmisión HITACHI H-500®, luego de la preparación de las muestras correspondientes mediante la técnica de réplica al carbono en dos etapas. Las microestructuras en cuestión

corresponden a un acero AISI 1045 en forma de platina, homogenizado y fracturado por tensión a temperatura ambiente (las muestras fueron tomadas de la zona inmediata adyacente a la superficie de fractura). En ambos casos se estudió el mecanismo de ruptura de la perlita, en particular, de las placas de Fe_3C [74]. La diferencia entre las dos muestras consiste en que la segunda fue adicionalmente deformada por laminación en frío hasta un 50%, antes de la deformación final por tensión, la cual se hizo aplicando la carga respectiva a 90° del sentido previo de laminación. Es sabido que el uso de las réplicas mediante el TEM ha quedado restringido a casos muy específicos, debido al advenimiento del SEM, sin embargo; resulta ilustrativo, en función del desarrollo histórico de la fractografía, y de los objetivos del presente trabajo, demostrar en perspectiva el uso del color como un factor a considerar, cualquiera que sea la técnica empleada. Por otra parte, aun cuando los modelos relativos tanto a los mecanismos de deformación y fractura de la perlita, como a los fenómenos asociados a su formación, han sido muy bien explicados en décadas pasadas [78-81], sin embargo; actualmente existe un renovado interés en el estudio de éste constituyente eutectoide (ver por ejemplo: [82-87]). (b) Una superficie de fractura por coalescencia de cavidades (desgarramiento) de un acero super dúplex SAF 2507, envejecido a 475°C por 24 h y fracturado por impacto a temperatura ambiente, tomada a través de un microscopio electrónico de barrido HITACHI S-2400® [75] y (c) Una superficie de fractura con la presencia de ruptura por cuasi-clivaje, de un acero AISI 1045 normalizado y fracturado por impacto a 37°C , tomada mediante un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM T-300® [76].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Microestructuras perlíticas (TEM)

En las figuras 1 y 2 se representan diferentes versiones de la misma microestructura perlítica del acero AISI 1045 homogenizado y fracturado por tensión a temperatura

ambiente [74]. La microestructura original representada mediante la réplica de la figura 1-a, aunque discernible en términos generales, sin embargo puede ser mejorada con la finalidad de revelar detalles relativos a la presencia de procesos de ruptura en las láminas de Fe_3C , fenómeno que puede ser fácilmente confundido con defectos de crecimiento.

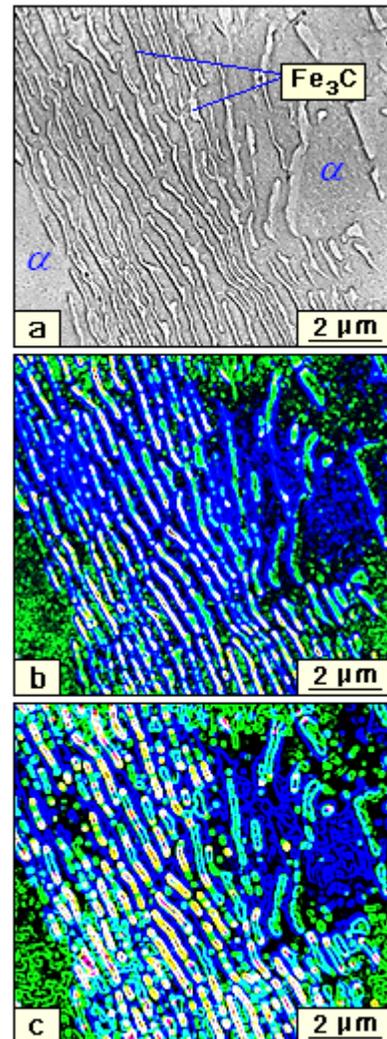


Fig. 1. Microestructuras perlíticas (TEM) del acero AISI 1045. (a) Microestructura original, mostrando las fases ferrita y cementita. (b) y (c) La misma microestructura mejorada mediante la adición de color, donde predominan diversos matices de azul, verde y amarillo, así como los tonos básicos blanco y negro (para detalles ver texto).

En particular, en las figuras 1-b, 1-c, y 2-c, se han resaltado mediante el uso selectivo del color, el contraste, el brillo, los matices etc., las áreas que corresponden a la

fase ferrita (α) y a la fase cementita (Fe_3C). Las áreas delgadas y claras representan las láminas de cementita orientadas direccionalmente, mientras que las tonalidades oscuras (azul, verde, negro, rojo y sus combinaciones); representan a la fase ferrita.

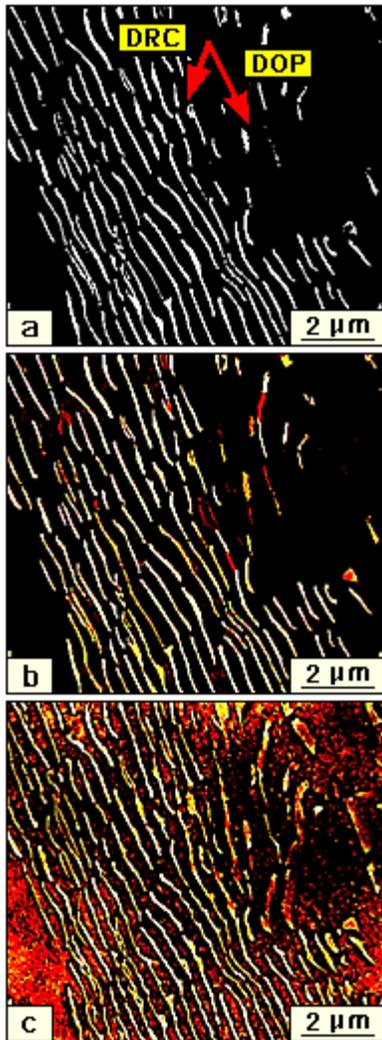


Fig. 2. Microestructuras perlíticas (TEM) del acero AISI 1045. (a) Microestructura con máximo contraste, mostrando las direcciones DRC y DOP. (b) Máximo contraste con adición de color en la misma microestructura. (c) Microestructura original mejorada mediante la adición de matices rojo, naranja y amarillo.

Por otra parte, en las figuras 2-a y 2-b, donde se ha maximizado el contraste, no solamente pueden distinguirse las dos fases mencionadas, sino que también resultaría posible mediante análisis de imágenes, una determinación más directa de parámetros tales como

distancia interlaminar, dimensión fractal (mediante el método de conteo de caja [88-90]) etc. Un aspecto importante que es revelado mediante la adición de color a la figura original 1-a, es la dirección de ruptura de las láminas de cementita (DRC), y la dirección de orientación general de la colonia perlítica (DOP). Estas direcciones se han señalado en la figura 2-a, para preservar la vista panorámica de las mismas en las demás figuras, especialmente en la 1-b y la 1-c, donde las direcciones en cuestión resultan más evidentes. El contraste y la nitidez que ofrece el color, permiten un mejor análisis del proceso de ruptura de las láminas de cementita, las cuales muestran la existencia de un cierto grado de plasticidad. La facilidad de análisis permite igualmente una mejor explicación del proceso de separación que ha ocurrido, ya que el mismo se asemeja al modelo propuesto por Miller y Smith [91] (figura 3).

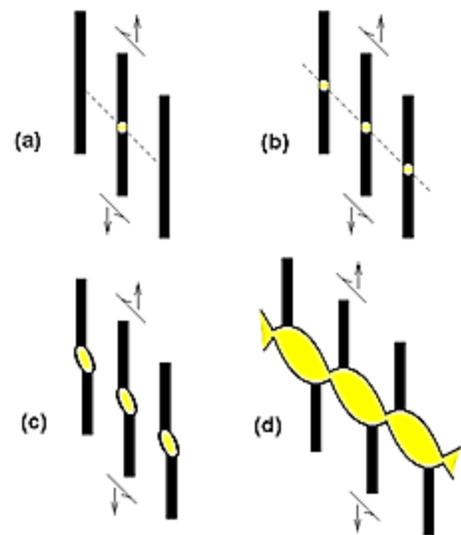


Fig. 3. Mecanismo sugerido por Miller y Smith [91] para la ruptura por corte de la perlita. (a) Agrietamiento de una placa de cementita. (b) Agrietamiento de las placas adyacentes de cementita, producido por la zona de corte generada en la ferrita. (c) y (d) Formación de cavidades y coalescencia.

La discusión relativa a la justificación de la introducción del color, puede iniciarse con el análisis de las figuras 1 y 2, desde el punto de vista de la percepción, y de la información que a partir de la misma puede obtenerse. Aunque ha sido hasta ahora la costumbre, sin embargo, la

conceptualización del color como un aspecto decorativo o estético en áreas consideradas como exclusivamente técnicas, tiende a ser reconsiderada cada vez más. Por ejemplo, Kaiser [92] en su revisión crítica acerca de la respuesta psicológica al color, plantea en primer lugar, lo que parece obvio: no hay duda de que ésta existe, ya que de no ser así, no podríamos ver los colores: al haber discriminación entre ellos, también deberá haberla en sus efectos. Igualmente se plantea el hecho de que las longitudes de onda más *cortas* características del azul y el verde (azul: entre 450 y 495 nm; verde: entre 495 y 570 nm), facilitan la comprensión de fenómenos complejos, al contrario de lo que ocurre con las longitudes de onda más *largas* características del naranja y el rojo (naranja: entre 590 y 620 nm; rojo: entre 620 y 750 nm). Elliot *et al.* [93] han demostrado que el color, aparte del valor estético, lleva en sí mismo un significado específico, el cual se convierte a su vez en una información concreta. Estos autores utilizaron extensos análisis de covarianza unifactorial, y de prueba de independencia chi cuadrado en poblaciones estudiantiles universitarias de Alemania y USA, encontrando diferencias muy significativas en el desempeño general en función de la percepción de los colores; en áreas tales como anagramas, coeficiente intelectual, habilidad matemática, influencia de la manipulación de los colores en el indicador psicofisiológico de la motivación evadida (es decir; en el redireccionamiento del comportamiento, lejos de los estímulos negativos), etc. Este estudio corrobora fehacientemente la influencia de las longitudes de onda más largas, en el pobre desempeño encontrado en las áreas mencionadas. Lo anterior resulta muy significativo, ya que se ha determinado que la eficiencia en el trabajo, entre otras cosas, puede depender de los colores utilizados en la pantalla de los monitores de computadora, frente a las cuales el ser humano promedio pasa una buena parte de las 24 horas del día [94]. En referencia a las figuras 1 y 2, y en base a lo dicho anteriormente, podríamos decir, en principio; que la percepción y la manipulación de las

figuras 1-b y 1-c, puede determinar resultados cualitativos y/o cuantitativos más exactos, a partir de los efectos cognocitivo y/o psico-motor, generados por el uso del verde y el azul. En la figura 4 se observan diferentes micrografías a color de la microestructura perlítica que

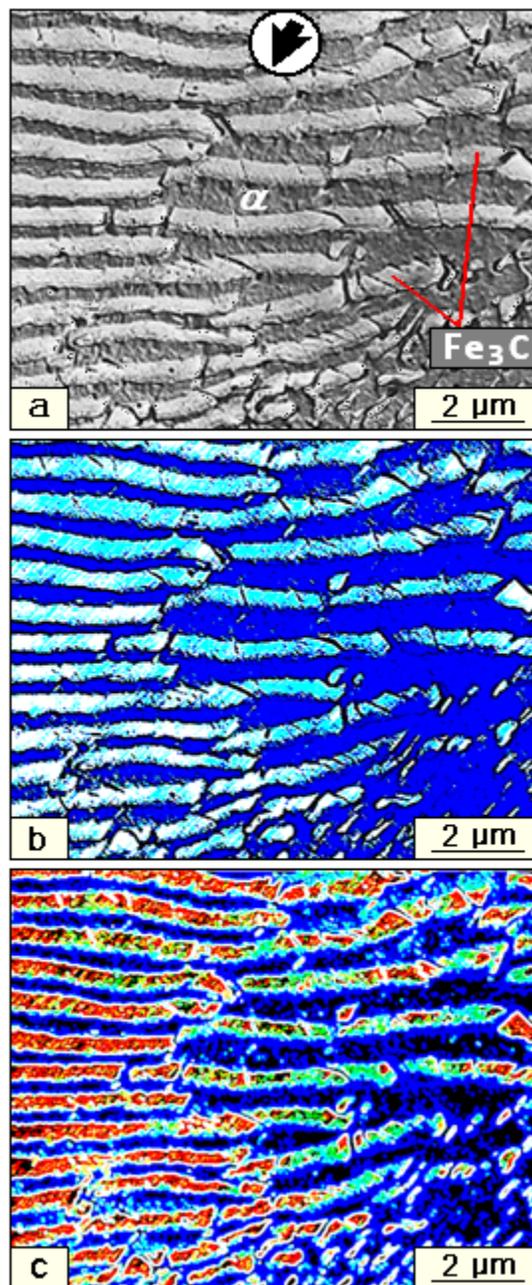


Fig. 4. Microestructuras perlíticas de la 2ª muestra de acero AISI 1045. (a) Microestructura original mostrando las fases Fe_3C y α así como una de las direcciones de fractura de las láminas de Fe_3C . (b) y (c) Coloreado de la misma microestructura mediante la combinación selectiva de diversos matices. (Para detalles ver texto).

corresponde a la segunda muestra de acero AISI 1045 (laminada en frío hasta un 50% antes de la deformación final por tensión). Por otra parte, en la figura 4-a se observan las láminas de cementita, la fase ferrítica, y la dirección en la que ha ocurrido la fractura del mayor número de láminas de Fe_3C . Esta figura representa la microestructura original, y aunque los tonos grises logran en éste caso que la percepción de los detalles pueda ser considerada como suficiente, sin embargo; nuevamente los tonos azules de la figura 4-b, en combinación con el blanco, han puesto de manifiesto el aumento de la claridad y nitidez de los detalles. Al tratar de establecer un balance entre las longitudes de onda largas (rojo y naranja) y cortas (azul y verde) en la figura 4-c, no se logra un buen contraste general, pero sí pueden discernirse con facilidad las zonas de separación o fractura de las láminas de cementita.

En la figura 5-a se ha logrado eliminar el sombreado de los bordes de dichas láminas, lo cual, junto al empleo de los colores azul y amarillo, la eliminación de todos los detalles de la fase α y el manejo adecuado de la transparencia, el brillo, el contraste y la saturación, ha dado lugar a una imagen idónea para el análisis de la naturaleza de la ruptura en las láminas de Fe_3C . Como puede observarse, la mayoría de las láminas muestran ruptura de tipo frágil, mientras que en muy pocas se observa la presencia de deformación plástica. En el primer caso, la fractura parece haber ocurrido a través de los planos de clivaje de la cementita, siendo la concentración de esfuerzos en la ferrita muy baja para generar clivaje en ésta fase. La figura 5-b por su parte, aunque similar a la figura 4-a, sin embargo muestra una definición de detalles algo mejorada, debido al contraste generado entre los tonos rojo, naranja y amarillo. Finalmente, en la figura 5-c se ha logrado un buen contraste entre el negro y el rojo, lo que puede facilitar el análisis de las placas de cementita. En esta última figura, la zona de la izquierda de la micrografía ha sido resaltada

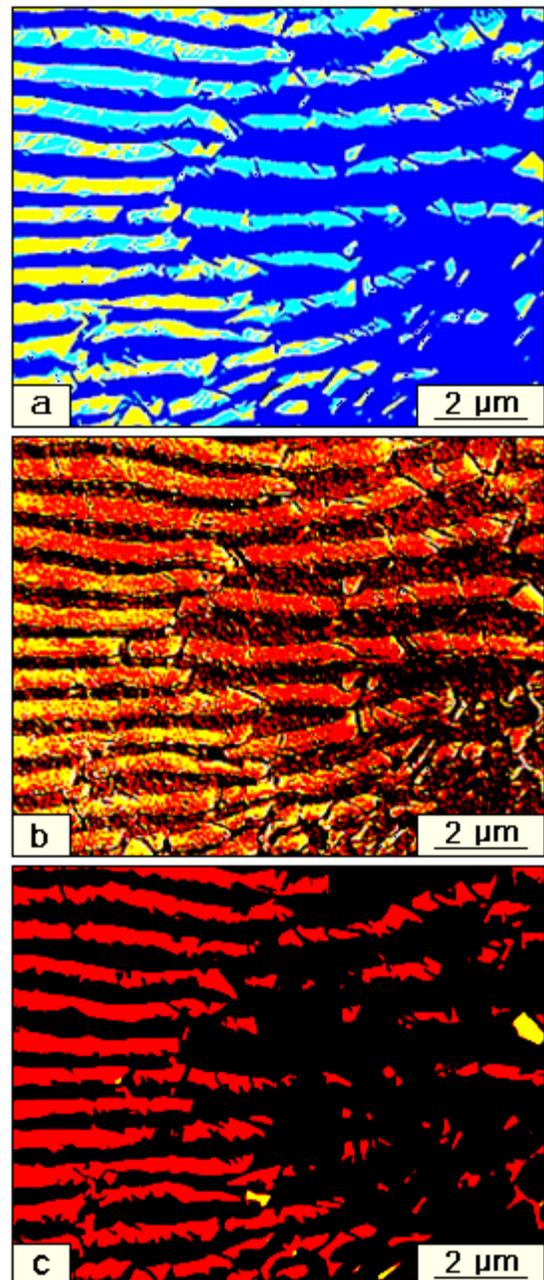


Fig. 5. Microestructuras perlíticas editadas, de la 2ª muestra de acero AISI 1045. (a) Imagen editada para el análisis específico de las láminas de Fe_3C fracturadas. (b) Microestructura original contrastada mediante tonos asociados a ondas largas. (c) Alto contraste rojo/negro para el estudio de las láminas de Fe_3C fracturadas de la parte izquierda de la micrografía.

en detrimento de los detalles de la derecha, y en función de una mejor definición de la primera, donde se encuentra el mayor número de láminas de Fe_3C que han sido fracturadas. Alexander *et al.* [95, 96] y más recientemente Li *et al.* [97], han estudiado en detalle la

fractura por clivaje en la perlita, así como los procesos de nucleación y propagación de grietas en esta fase, encontrando que además del clivaje como mecanismo predominante, también se produce ruptura dúctil en las placas de Fe_3C .

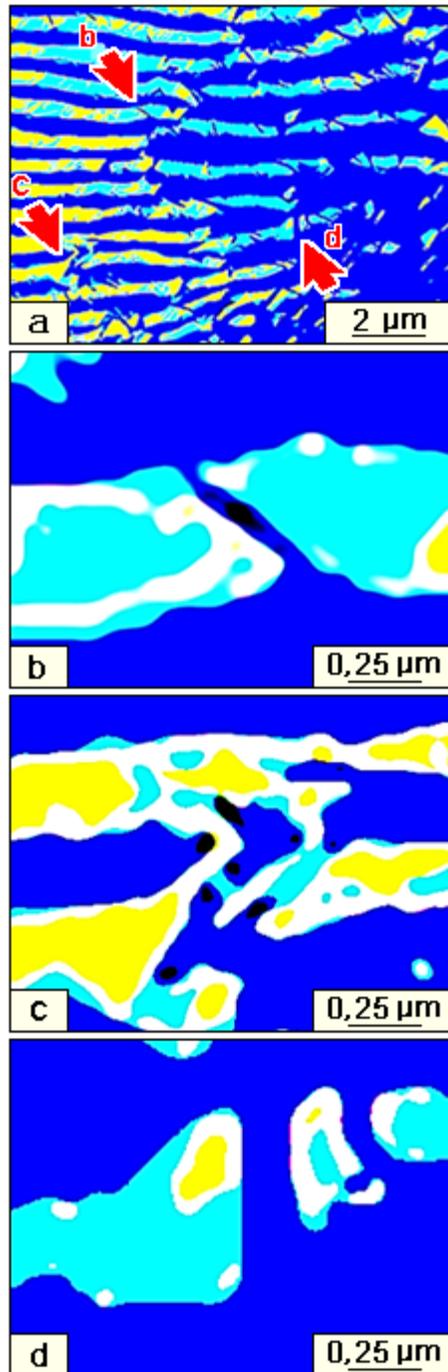


Fig. 6. (a) Imagen detallada de la Fig. 5-a, mostrando tres zonas particulares de ruptura. (b), (c) y (d) Detalles de la microestructura señalados en (a). (Para detalles ver texto).

Ambos mecanismos resultan claramente visibles a partir de la figura 6 del presente trabajo. En la figura 6-a se observan las zonas señaladas como b, c y d, las cuales a su vez aparecen ampliadas en las figuras respectivas. Puede verse en las figuras 6-b y 6-d, que la fractura de la cementita es de naturaleza frágil, notándose especialmente en la figura 6-d, donde la separación es por clivaje cristalográfico. También es posible observar la presencia de deformación plástica de la cementita en la figura 6-c.

Morfologías de Fractura (SEM)

El análisis de las superficies de fractura en función del objetivo del presente trabajo, estará limitado a los dos ejemplos ilustrativos descritos en el aparte correspondiente. En el primer caso se analizará una superficie de fractura por impacto a temperatura ambiente del acero inoxidable super dúplex SAF 2507, envejecido previamente a $475\text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 h [75]. El mecanismo de fractura observado (figura 7-a), corresponde al de coalescencia de cavidades por desgarramiento [2]. Las cavidades desarrolladas mediante este mecanismo, muestran una forma cuasi-parabólica parecida a la que presentan las cavidades formadas durante el mecanismo de ruptura por corte, con la diferencia de que el vértice de las mismas apunta en el sentido contrario al de propagación local de la grieta (en ambas caras de la superficie de fractura) como se ha indicado en la figura 7-a. Es conocido que las inclusiones y partículas de segunda fase, a menudo constituyen el origen de la nucleación de cavidades [98-102], sin embargo; no siempre suelen verse alojadas en éstas, ya que con frecuencia se desprenden luego del proceso de fractura. Debido a lo anterior, y en principio; las cavidades en sí mismas podrían dar una idea de la distribución y cantidad relativa de inclusiones, lo cual resulta muy importante, ya que su fracción volumétrica y la separación entre ellas, son dos de los factores que más afectan a la tenacidad [103-106]. Para el estudio detallado de la superficie de fractura mediante el uso del color en este caso en particular, se propone separar

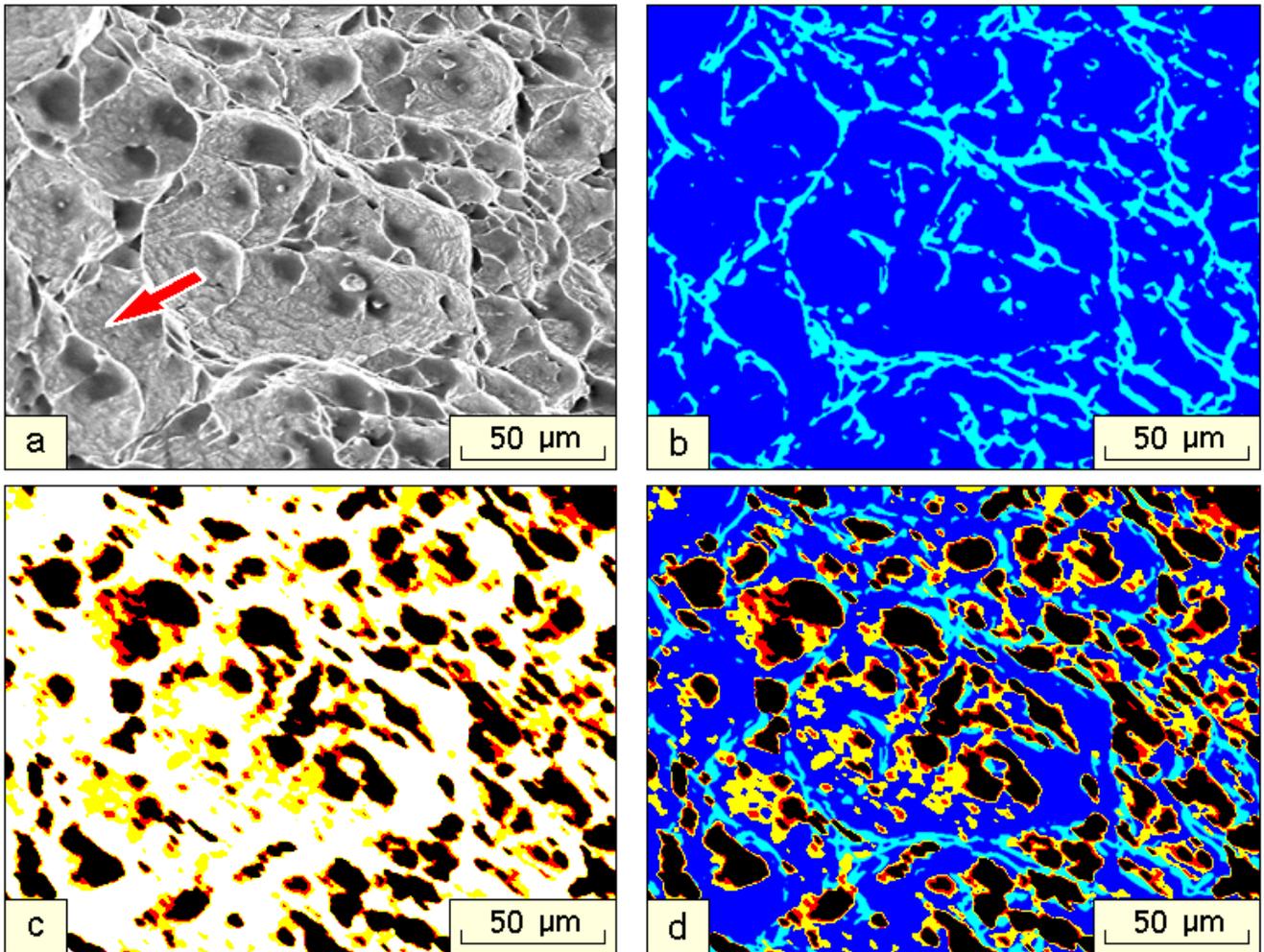


Fig. 7. (a) Fractura por impacto a temperatura ambiente del acero super dúplex SAF 2507 envejecido a 475 °C, mostrando separación por coalescencia de cavidades (desgarramiento). La flecha indica la dirección local de propagación de la grieta. (b) Edición de la fractografía original, resaltando los límites externos de las cavidades. (c) Distribución y tamaños relativos de las zonas profundas de las cavidades, asociadas a la presencia de inclusiones. (d) Edición final mediante la superposición de las micrografías (b) y (c).

los elementos principales de la misma en un primer paso, y superponerlos al final, de acuerdo a la metodología que se explicará a continuación; lo cual podría constituir una técnica útil y novedosa que facilite el análisis de la relación entre la topografía de fractura del material y su tenacidad; bien sea que se utilice algún método de la geometría fractal [107-108], o cualquier otro de la fractografía cuantitativa [109]. Una manipulación conveniente de la figura 7-a, ha resaltado los límites externos de las cavidades, los cuales aparecen delineados en la figura 7-b (tono claro). Estos límites representan la parte superior de las paredes que separan las cavidades. En la figura 7-b se ha eliminado todo detalle de textura y

rugosidad de la superficie, al cancelar completamente la escala de grises (incluyendo el negro). Por otra parte, el área interna de las cavidades (tono oscuro en la figura 7-a), el cual es un parámetro importante, como veremos; podría deducirse a partir de un análisis de la figura 7-c, basado en dos tonos únicos. Ahora bien, ya que la superficie de fractura es rugosa, el área real de la misma (A), será mayor que el área de la micrografía (A_o), la cual es la proyección del área real en el plano medio de fractura, por lo que cualquier cálculo de áreas deberá tener en cuenta este factor. Debido a la gran dificultad inherente a la determinación de A , se han desarrollado relaciones para diferentes morfologías de fractura, a partir de los

índices de rugosidad superficial y lineal, R_s y R_L respectivamente, siendo $R_s = A/A_o$, y $R_L = L/L_o$, donde L es la longitud real de una línea trazada sobre la superficie de fractura y L_o la longitud de la línea proyectada en el plano medio. Una de estas relaciones, es la debida a El-Soudani [110], quien ha tomado en cuenta estos índices a través de la ecuación:

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_\ell} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2 - R_S)^n}{(2n+1) R_S^{n+1}} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{1}{R_S} - \frac{(2 - R_S)}{3R_S^2} + \frac{(2 - R_S)^2}{5R_S^3} - \frac{(2 - R_S)^3}{7R_S^4} + \dots \right] \quad (1)$$

donde ℓ es el índice de rugosidad lineal promedio. Para superficies de fractura de tipo dúctil, El-Soudani [111], ha demostrado que $\ell = \pi/2$, en cuyo caso; de acuerdo a la ecuación (1): $R_s = 2$, teniendo en cuenta solamente el primer término de la serie, ya que el mismo se relaciona con la aleatoriedad que muestra la curvatura de una superficie de fractura de esta clase, mientras que los términos de orden superior representan las desviaciones a tener en cuenta en otros tipos de fractura. Asumiendo lo anterior, entonces: $A = 2A_o$, lo cual sería válido para cualquier sub-área de la figura 7-a. Mediante variaciones del contraste, color, transparencia y otras variables del proceso de edición de la fractografía original, puede obtenerse la imagen que se muestra en la figura 7-c, donde se han eliminado nuevamente los tonos grises (a excepción del negro), incluyendo los límites externos de las cavidades. Como resultado, se ha obtenido una imagen donde las zonas más profundas de las cavidades (en negro en la fractografía original y también en ésta figura), se muestran sobre un fondo claro, es decir; una serie de «manchas negras» que delínean las zonas donde se encuentran las inclusiones, o se encontraban antes de la fractura; aparecen emplazadas en su posición original, destacándose contra un fondo claro, que representa al resto de la fractografía. En principio, estas zonas oscuras

pueden asociarse, por su tamaño y distribución, al tamaño y distribución relativos de las inclusiones asociadas a las cavidades, lo cual permitiría mediante un análisis cuantitativo, conocer el tipo de distribución relativa de tamaños de éstas, así como también otros parámetros, como el número de inclusiones por unidad de área de fractura, entre otros.

El tamaño de las cavidades en este tipo de fractura, se asocia normalmente al tamaño de las inclusiones [103, 112], aunque en el presente caso esta asociación se refiere únicamente a las zonas más profundas (vértice) de las cavidades, cuya forma es cuasi-parabólica, y donde realmente se alojan las inclusiones. La modulación del color ha permitido asociar el rojo a las zonas adyacentes a las partes más profundas de las cavidades, y el amarillo y el blanco, en ése orden, a las zonas externas. Los principales aspectos de la superficie de fractura analizada, pueden observarse en su conjunto en la figura 7-d, la cual resulta de la superposición de las figuras 7-c y 7-b. Claramente, en la figura 7-d se tienen definidas de mayor a menor profundidad: las zonas negras; indicadoras de la posición, número y tamaño relativo de las inclusiones; las zonas rojas, las zonas amarillas, las zonas azul oscuro y finalmente las zonas azul claro que representan los límites externos de las cavidades. Los parámetros de la fractografía cuantitativa relacionados con las áreas así definidas, serán más fáciles de analizar e interpretar, ya que estarán basados únicamente en estos cinco tonos y no en la compleja escala de grises de la micrografía original.

Uno de los mecanismos de fractura cuya complejidad hace muchas veces difícil su identificación, es el que se conoce como cuasi-clivaje [28, 30, 113], el cual consiste en una forma de separación mixta, que involucra tanto al clivaje como a la coalescencia de cavidades, y que se produce en una faceta de clivaje cuando esta aparece delante del frente de grieta y al aumentar el esfuerzo, se extiende por desgarramiento a la matriz circundante mediante coalescencia de cavidades, no existiendo un límite

evidente entre la faceta de clivaje y la zona de microcavidades adyacente. El cuasi-clivaje se puede producir por impacto, a bajas temperaturas, a temperatura ambiente bajo condiciones de restricción plástica, o a temperatura ambiente en zonas intensamente trabajadas en frío. En la figura 8-a puede verse una fractografía representativa de éste tipo de mecanismo de ruptura [76]. En éste caso se trata de un acero AISI 1045 fracturado por

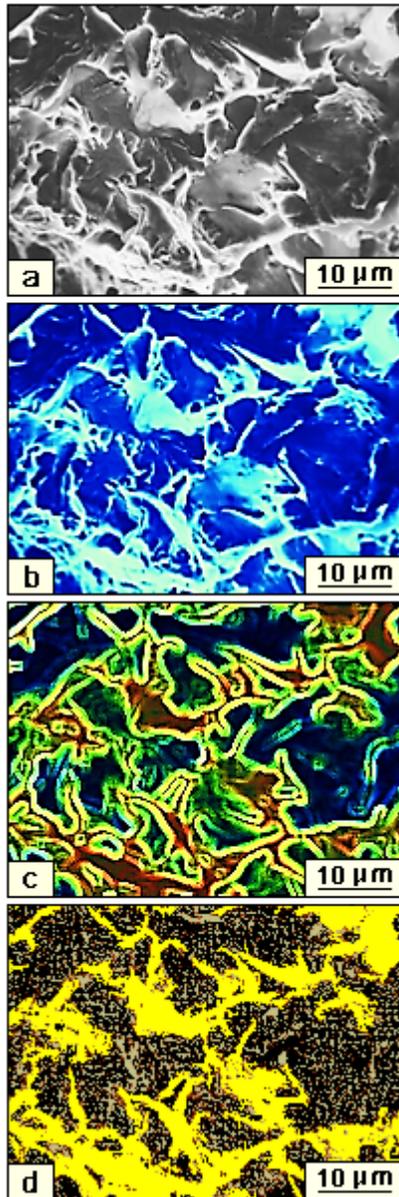


Fig. 8. (a) Fractura por impacto a 37 °C del acero AISI 1045 mostrando separación por cuasi-clivaje. (b) Imagen original editada en tonos azules. (c) y (d) Imágenes

editadas destacando la forma y distribución de las hojuelas de cuasi-clivaje,

impacto a 37 °C. Se observa que las zonas fibrosas asociadas a las microcavidades y las hojuelas de cuasi-clivaje (estructuras parecidas a los *patrones de río* típicos del clivaje, pero sin el desarrollo de éstos), parecen como estructuras con una mayor iluminación, mientras que las zonas planas correspondientes a las facetas de clivaje muestran un tono oscuro. Este efecto tiene su origen tanto en la textura de estas zonas, como en la orientación relativa de la muestra respecto al haz de electrones y la naturaleza de la topografía de fractura; lo cual puede ser aprovechado, como veremos, para determinar el porcentaje de área cubierto por las facetas de clivaje y por las hojuelas de cuasi-clivaje. Puede notarse que el contraste entre las dos zonas descritas se ha incrementado con la introducción de los tonos de azul, como se muestra en la figura 8-b, por lo que el efecto 3-D debido a la profundidad de campo del SEM, parece haber disminuido. En la figura 8-c se ha introducido un efecto especial, cuyo resultado es el de diferenciar ampliamente las zonas bajo análisis, mediante la aplicación del rojo a las hojuelas de cuasi-clivaje y un tono azul oscuro a las facetas de clivaje. Los límites entre estas zonas aparecen resaltados en amarillo/verde. Un análisis detallado de esta figura, revela que los colores representan las diferentes profundidades de la topografía; azul oscuro: las zonas más profundas (facetas de clivaje); límites verde/amarillo: zonas delgadas de menor profundidad (separando las facetas de clivaje y las hojuelas de cuasi-clivaje), y rojo: las zonas más altas de la topografía (hojuelas de cuasi-clivaje). Puede notarse que el contraste entre las dos zonas descritas se ha incrementado con la introducción de los tonos de azul, como se muestra en la figura 8-b, por lo que el efecto 3-D debido a la profundidad de campo del SEM, parece haber disminuido. En la figura 8-c se ha introducido un efecto especial, cuyo resultado es el de diferenciar ampliamente las zonas bajo análisis, mediante la aplicación del rojo a las hojuelas de cuasi-clivaje y un

tono azul oscuro a las facetas de clivaje. Los límites entre estas zonas aparecen resaltados en amarillo/verde. Un análisis detallado de esta figura, revela que los colores representan las diferentes profundidades de la topografía; azul oscuro: las zonas más profundas (facetas de clivaje); límites verde/amarillo: zonas delgadas de menor profundidad (separando las facetas de clivaje y las hojuelas de cuasi-clivaje), y rojo: las zonas más altas de la topografía (hojuelas de cuasi-clivaje). Esta figura se asemeja a una sección metalográfica plana, aunque todavía es posible observar cierto efecto de la profundidad de campo. Finalmente, en la figura 8-d se ha eliminado totalmente el efecto 3-D de la fractografía original, mostrándose la misma como una microestructura 2-D, lo cual puede favorecer la percepción de las formas y el análisis detallado de las hojuelas de cuasi-clivaje. Los colores de ésta figura poseen un buen contraste, facilitándose con ello cualquier medición cuantitativa, aunque aún deberá tenerse en cuenta la rugosidad, para efectos del cálculo de parámetros tales como el área real ocupada por alguna zona en particular.

Tecnología y percepción: El patrón común del color

Existe en la actualidad una búsqueda permanente de las características y propiedades de los objetos naturales, que de alguna forma puedan ser aprovechadas para el desarrollo de la tecnología de los materiales [114, 115]. Por ejemplo, el estudio de las relaciones estructura-función en materiales biológicos, no solamente provee información relativa a los mecanismos físicos que explican sus propiedades superiores, sino que también beneficia al diseño, fabricación y posterior uso de materiales avanzados [116, 117]. De la misma manera; la morfología, color, distribución espacial y características físicas de los objetos naturales, no solamente han influenciado de forma definitiva a la tecnología de la investigación de materiales, al adaptarla al estudio de aquéllos, sino que también han influido en la forma en la cual percibimos, y por lo tanto, recibimos, esta tecnolo-

gía [49, 118]. Recientemente se han realizado importantes avances que han cambiado nuestra comprensión de los mecanismos que explican la transformación de un estímulo en una percepción. Estos mecanismos tienen que ver con la computación de los colores a nivel de la retina, de las zonas de visión primaria del córtex y de las áreas superiores de visualización del cerebro. La comprensión como proceso se relaciona con la percepción del color, por el hecho de que la primera es el producto de una compleja maquinaria neurológica que transforma las señales físicas luminosas (color), en comportamiento, experiencia y emoción [119].

El conocimiento de la influencia del color en las diversas formas de representar las imágenes y por lo tanto, en los procesos cognoscitivos de la comprensión, ha tenido actualmente un impacto que incluye todas las áreas de la ciencia y la técnica, lo cual se manifiesta en asuntos de gran trascendencia a mediano y largo plazo, como la evolución cosmológica de las galaxias [120], así como en tópicos tan cotidianos como el impacto de los sitios Web [121]. El estudio del color y la tecnología de la presentación e información visual, ha sido bien establecido en varios de los mayores grupos editoriales de la actualidad, a través (entre otras), de las publicaciones periódicas: *Displays* [122], *Journal of Visual Communication and Image Representation* [123] y *Color Research & Application* [124], en cuyos objetivos y alcances se establece la importancia de estas áreas de estudio. Las nuevas formas y sistemas de representación de imágenes, indudablemente han sido de gran ayuda en los más diversos aspectos de la tecnología, porque redirigen la percepción hacia objetivos tan importantes como las propiedades de los objetos. Un ejemplo de ello es el modelo de reflectancia dicromática [125], el cual establece que los colores de un objeto lambertiano (aquél cuya superficie posee una luminosidad isotrópica, es decir; cuyo brillo no depende del ángulo de observación), se localizan alrededor de vectores que van del negro al

color del objeto, dependiendo de las propiedades específicas de éste. Este modelo, así como otros semejantes, tiene su origen en el concepto de los múltiples resultados cromáticos que pueden obtenerse, dependiendo de la orientación [126]. En cuanto al papel del color en la percepción de la estética y en la discriminación visual (también a tener en cuenta en las áreas técnicas), es importante el papel de la geometría fractal; herramienta que puede ser utilizada para determinar si es posible extraer un patrón específico de una imagen, en forma tal que sirva como medio de identificación de la misma. El método de la *reconstrucción fractal* ha sido aplicado en éste sentido, para la identificación de un determinado movimiento pictórico [127]. De igual forma, la dimensión fractal puede ser usada para medir la apreciación de la estética y la belleza en las artes visuales, particularmente en imágenes naturales y abstractas, sin embargo; en ausencia del color, disminuye apreciablemente la capacidad de realizar apreciaciones valaderas [128]. La conexión de estos aspectos con las áreas propias de la tecnología, no siempre parece obvia, sin embargo; esta duda desaparece, cuando se verifica que las mismas técnicas se han aplicado exitosamente a la solución de problemas de las ciencias y la tecnología, dado que el fundamento físico-matemático es el mismo.

La importancia de la percepción del color y su tratamiento matemático, se ha enfatizado en un estudio reciente [129], donde se revisan las características del proceso de percepción del color, así como también las bases matemáticas que permiten entender cómo el sistema visual es capaz de estabilizar la apariencia del color de los objetos. Una revisión muy completa y más avanzada de las bases matemáticas que sustentan la teoría de la visión a color, ha sido realizada por Brainard [130]. Es interesante notar que desde hace varias décadas se ha establecido que aún las características cualitativas de un sistema, en nuestro caso las relativas a la percepción del color, pueden ser igualmente susceptibles de tratamiento matemático

[131]. La primera relación a partir de la cual es posible estimar la intensidad o fuerza con la que percibimos un estímulo, fue propuesta por Stevens [132]. Esta relación empírica se describe mediante la ecuación:

$$\psi(I) = kI^a \quad (2)$$

donde I es la intensidad real del estímulo, $\psi(I)$ es la intensidad percibida del estímulo, k es una constante de proporcionalidad que depende de la naturaleza del estímulo y de las unidades utilizadas, y a es un exponente que depende del tipo de estímulo. Aunque esta ley no se relaciona directamente con el color, sin embargo; al tratar con estímulos tales como longitud, área o volumen (entre otros); podría verificarse mediante la misma, que utilizando la fractografía a color, estos estímulos serían percibidos con mayor intensidad, por lo que se obtendría una valoración más exacta de los accidentes topográficos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales; que cuando la fractografía se basa en una escala de grises. Como ejemplos de estos accidentes topográficos podrían mencionarse: patrones de río (1-d); facetas de clivaje (2-d) y granos (3-d). La intensidad percibida del estímulo, $\psi(I)$ para el caso de la fractografía a color, será mayor que la correspondiente al caso de la escala de grises, dado que esta misma relación se cumple para las intensidades reales, I , respectivas. En el caso de la longitud; a posee un valor usualmente comprendido entre 0,9 y 1,1; para el área, entre 0,6 y 0,9 y para el volumen, entre 0,5 y 0,8; de manera que las longitudes son típicamente mejor estimadas que las áreas o los volúmenes. Aunque esta relación ha sido criticada con frecuencia [133, 134], sigue siendo relativamente valiosa como primera aproximación al análisis cuantitativo de los procesos de percepción de los estímulos.

Debe insistirse de acuerdo a los objetivos planteados en el presente trabajo, en la ausencia observada en la literatura,

de la fractografía a color, y en la posibilidad del uso y desarrollo futuro de ésta técnica; en este caso particular, en el área de la ciencia de los materiales. Un compendio de varios ejemplos recientes, puede servir para ilustrar el uso del color en muy variadas formas y con diferentes objetivos; en los estudios relacionados con los procesos de fractura en materiales. Sin embargo, como veremos, la fractografía a color en sí misma; aun cuando podría inferirse su utilidad evidente, no es empleada en ningún momento. En el primer caso, Tanaka *et al.* [135] realizaron simulaciones del proceso de fractura por fatiga en varios aceros inoxidable, analizando el avance del proceso de agrietamiento a través del mapeo simultáneo de la dimensión fractal; basado en un código de colores; en pequeñas zonas de las superficies de fractura. El resultado de las simulaciones fue comparado con el obtenido mediante el método del *teñido por calor* de las superficies de fractura. Un caso de aplicación práctica donde puede apreciarse el uso de variadas técnicas asociadas a la fractografía y que demuestra la utilidad del uso del color, es el realizado por Wanhill [136], en el análisis de la fragilización de objetos de plata de hasta 2000 años de antigüedad. Entre las técnicas utilizadas están la radiografía de rayos X, la metalografía óptica, la fractografía (SEM), EDS, EBSD, etc., entre otras. La variedad de causas encontradas para el proceso de fragilización incluyen: corrosión intergranular y transgranular, retención de trabajado en frío por la microestructura y precipitación discontinua de cobre. Las fractografías (SEM) en escala de grises presentadas en éste trabajo, demuestran las posibilidades que tendría el color, de resaltar los múltiples aspectos de importancia relacionados con los mecanismos de separación y los efectos de la corrosión. Finalmente mencionaremos el trabajo de Kang *et al.* [137], quienes estudiaron ciertos aspectos microestructurales del proceso de deformación y fractura por tensión y doblado de la aleación de magnesio AZ31, mediante una serie de técnicas de análisis superficial, así como de tomografía por rayos X en 3-D.

En éste último caso resulta notoria la presentación en color y 3-D, de una superficie de fractura por tensión, donde se ha resaltado la presencia de grietas, sobre y por la parte inferior de la misma. Es indudable que la combinación de esta técnica, con el análisis fractográfico a color a través del SEM, podría generar información adicional importante acerca del proceso de separación por tensión en el material mencionado.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la fractografía a color puede constituir una técnica útil en la descripción e interpretación de los accidentes de la topografía de fractura. Dado que el microscopio electrónico de barrido (SEM), es ampliamente utilizado en los estudios fractográficos y constituye una herramienta de trabajo muy conocida, la fractografía a color puede ser especialmente útil mediante el uso del mismo, mostrándose su implementación a partir de la edición de imágenes en blanco y negro tomadas previamente utilizando este instrumento. Para demostrar en perspectiva el uso del color como un factor a considerar, esta técnica también se aplicó al análisis de réplicas mediante el microscopio electrónico de transmisión (TEM).

Los editores actuales como el Microsoft Word 2010® utilizado en el presente trabajo; el cual es la herramienta principal del conjunto de aplicaciones denominado Microsoft Office 2010®; aunque tienen como función principal la de procesadores de textos, sin embargo incluyen frecuentemente la edición de imágenes, con numerosas opciones para el mejoramiento y coloreado de las mismas. En el presente trabajo se utilizó el mencionado editor debido a su accesibilidad, economía y versatilidad, obteniéndose buenos resultados al combinar las opciones de ajuste, corrección, efectos especiales, pre-visualización activa etc., entre otras.

La fractografía a color basada en el uso del SEM, es una técnica prácticamente ausente de la literatura. Las razones que justifican su uso, nos indican que puede tener un gran potencial de aplicación como herramienta útil y práctica y no como algo meramente estético. Esta técnica no solamente ayuda a mejorar la interpretación de los mecanismos de fractura observados en los materiales, sino también las mediciones que puedan realizarse posteriormente mediante fractografía cuantitativa. El concepto de *percepción* ha sido tomado en cuenta, dada su importancia en la interpretación de las imágenes fractográficas, ya que mediante el uso del color se observa una mejora en la discriminación de aspectos tales como: rugosidad, separación, profundidad etc., influenciando la objetividad del análisis fractográfico.

AGRADECIMIENTOS

Gran parte de lo expuesto en la presente investigación, ha sido el fruto de la experiencia adquirida a lo largo de años de trabajo en fractografía y áreas afines, tanto con mis colegas de la UCV, como con numerosos alumnos a través de sus tesis de grado. A todos ellos debo un especial agradecimiento.

REFERENCIAS

[1] Ryder D.A. (1971) "*The Elements of Fractography*" London, AGARD, pp. 59-79.

[2] Beachem C.D. (1963) "An electron fractographic study of the influence of plastic strain upon ductile rupture processes in metals" *Trans. ASM* 56:318-326.

[3] Beachem C.D., Pelloux R.M.N. (1965) "*Fracture Toughness Testing and its Applications*" Philadelphia, ASTM, pp. 210-245.

[4] Beachem C.D. (1967) "Microscopic fatigue fracture surface features in 2024-T3 aluminum and the influence of crack propagation angle upon their formation" *ASM Trans. Quart.* 60(3):324-343.

[5] Beachem C.D. (1975) "The effects of crack tip plastic flow directions upon microscopic dimple shapes" *Met.*

Trans. A 6A(2):377-383.

[6] Broek D. (1974) "Some contributions of electron fractography to the theory of fracture" *Int. Mater. Rev.* 19(1):135-182.

[7] Hull D. (1999) "*Fractography: Observing, Measuring and Interpreting Fracture Surface Topography*" Cambridge, Cambridge University Press.

[8] Brooks C.R., McGill B.L. (1994) "The application of scanning electron microscopy to fractography" *Mater. Charac.* 33(3):195-243.

[9] Cazaux J. (2012) "From the physics of secondary electron emission to image contrast in scanning electron microscopy" *J. Elec. Microsc.* 61(5):261-284.

[10] Holton I. (2012) "Is energy-dispersive spectroscopy in the SEM a substitute for electron probe microanalysis?" *Microsc. and Anal.* 26(4):S4-S7.

[11] Hodoroaba V.D., Salge T., Terborg R., Rackwitz V. (2011) "Advanced elemental analysis with ED-EPMA, WD-EPMA and μ -XRF at a SEM" *Microsc. and Microanal.* 17(S2):600-601.

[12] Beraha E., Shpigler B. (1977) "*Color Metallography*" Metals Park, American Society for Metals.

[13] Vander Voort G.F. (2004) "*ASM Handbook, Vol. 9: Metallography and Microstructures*" Materials Park, pp. 493-512.

[14] Gahm H., Jeglitsch F. (1981) "Color methods and their application in metallography" *Metal Prog.* August: 48.

[15] Weck E., Leistner E. (1983) "*Metallographic Instructions for Colour Etchants by Immersion, Part II: Beraha Colour Etchants and their Different Variants*" Vol. 77/II, Düsseldorf, Verlag GmbH.

[16] Vander Voort G.F. (2005) "Color Metallography" *Microsc. Today* November: 22-27.

[17] Izotov V. I., Kireeva E. Y., Filippov G. A. (2005) "Study of slightly etched fracture surfaces of a pearlitic - ferritic steel by scanning electron microscopy" *Phys. Metal. Metallog.* 100:87-90.

[18] Kireeva E.Y., Izotov V.L. (2011) "Investigation of

- the specific features of brittle fracture of carbon steel in various structural states using scanning electron microscopy of a slightly etched fracture surfaces” *Phys. Metal. Metallog.* 112(3):301-308.
- [19] Maxwell P. C. (1976) “Fractography of several metastable Fe-Ni-C alloys” *Metallography*, 9(1): 9-31.
- [20] Sasaki G., Yokota M. J. (1975) “Fracture mode determinations by scanning electron microscopy” *Metallography* 8(3):265-268.
- [21] Shechtman D. (1976) “Fracture - microstructure observations in the SEM” *Met. Trans. A* 7A(1):151-152.
- [22] Chesnutt J. C., Spurling R. A. (1977) “Fracture topography-microstructure correlations in the SEM” *Met. Trans. A* 8A(1):216-218.
- [23] Thompson A.W., Chesnutt J.C. (1979) “Identification of a fracture mode: The tearing topography surface” *Met. Trans. A* 10A(8):1193-1196.
- [24] Schwartz A. J., Kumar M., Adams B. L., Field D.P. (2009) “*Electron Backscatter Diffraction in Materials Science*” New York, Springer.
- [25] Eaton P., West P. (2010) “*Atomic Force Microscopy*” Oxford, Oxford University Press.
- [26] Duda R.O., Hart P.E. (1972) “Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures” *Com. Assoc. Comp. Mach.* 15(1):11-15.
- [27] Davies P. A., Novovic M., Randle V., Bowen P. (2002) “Application of electron backscatter diffraction (EBSD) to fracture studies of ferritic steels” *J. Microsc.* 205(3):278-284.
- [28] Kumar A., Wilkinson A. J., Roberts S. G. (2007) “Quasi - cleavage fracture planes in spheroidized A533B steel” *J. Microsc.* 227(3):248-253.
- [29] Szczepanski C.J., Jha S.K., Larsen J.M., Jones J.W. (2008) “Microstructural influences on very - high -cycle fatigue - crack initiation in Ti-6246” *Met. Mater. Trans. A* 39A(12):2841-2851.
- [30] Koyama M., Sawaguchi T, Tsuzaki K. (2012) “Quasi-cleavage fracture along annealing twin boundaries in a Fe-Mn-C austenitic steel” *J. Iron Steel Inst. Japan Int.* 52(1):161-163.
- [31] Jafari M., Kimura Y., Tsuzaki K. (2012) “Enhancement of upper shelf energy through delamination fracture in 0.05 pct P doped high-strength steel” *Met. Mater. Trans. A* 43A(7):2453-2465.
- [32] Rettberg L.H., Jordon J.B., Horstemeyer M.F., Jones J.W. (2012) “Low-cycle fatigue behavior of die-cast Mg alloys AZ91 and AM60” *Met. Mater. Trans. A* 43A(7):2260-2274.
- [33] Haugstad G. (2012) “*Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*” Hoboken, John Wiley & Sons Inc.
- [34] Wilson R.A., Bullen H.A. (2006) “*Introduction to Scanning Probe Microscopy (SPM), Basic Theory: Atomic Force Microscopy (AFM)*” Highland Heights, Northern Kentucky University, p. 7.
- [35] Afzal A., Siddiqi H.M., Mujahid A., Saeed S. (2012) “AFM substantiation of the fracture behavior and mechanical properties of sol - gel derived silica packed epoxy networks” *J. Sol-Gel Sci. Tech.* 61(1): 44-48.
- [36] Smith R.L., Mecholsky Jr. J.J. (2011) “Application of atomic force microscopy in determining the fractal dimension of the mirror, mist and hackle region of silica glass” *Mater. Charac.* 62(5):457-462.
- [37] Joo W.S. (2008) “Failure analysis of turbine blade in atomic power plant” *J. Mech. Sci. Tech.* 22(5):864-870.
- [38] Nalladega V., Sathish S., Abburi S., Gigliotti M.F.X., Subramanian P. R. “Characterization of fatigue fracture in Ni-20 Pct Cr alloys using white light interference microscopy and scanning probe microscopy” *Met. Mater. Trans. A* 42A(4):1073-1088.
- [39] Roach M.D. (2011) “*Characterization of the Fatigue Failure Mechanisms in Austenitic and High Nitrogen Austenitic Stainless Steels*” PhD Thesis, The

- University of Mississippi Medical Center, Jackson, USA.
- [40] Midgley P.A., Borkowski R.E.D. (2009) "Electron tomography and holography in materials science" *Nature Mater.* 8:271-280.
- [41] Banhart J. (2008) "*Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering*" New York, Oxford University Press.
- [42] Herbiga M., Kingb A., Reischigc P., Proudmond H., Lauridsene E.M., Marrowf J., Buffière J.Y., Ludwig W. (2012) "3-D growth of a short fatigue crack within a polycrystalline microstructure studied using combined diffraction and phase-contrast X-ray tomography." *Acta Mater.* 59(2):590-601.
- [43] Byrne A., Hilbert D.R. (2003) "Color realism and color science" *Behav. Brain Sci.* 26(1):3-64.
- [44] Li Y., Sawada T., Latecki L.J., Steinman R.M., Pizlo Z. (2012) "A tutorial explaining a machine vision model that emulates human performance when it recovers natural 3D scenes from 2D images" *J. Math. Psych.* 56(4):217-231.
- [45] Conway B. R. (2012) "Doing science making art" *Trends Cogn. Sci.* 16(6):310-312.
- [46] Conway B. R. (2012) "Color consilience: Color through the lens of art practice, history, philosophy and neuro-science" *Ann. New York Acad. Sci.* 1251: 77-94.
- [47] Abbott A. (2006) "Fractals and art in the hands of a master" *Nature* 439:648-650.
- [48] Frantz M., Crannell A. (2011) "*Viewpoints: Mathematical Perspective and Fractal Geometry in Art*" Princeton, Princeton University Press.
- [49] Wilson S. (2003) "*Information Arts: Intersections of Art Science and Technology*" Cambridge, The MIT Press.
- [50] Taylor R.P. (2011) "The art and science of foam bubbles" *Nonlin. Dyn. Psych. Life Sci.* 15(1):129-136.
- [51] Taylor R. P., Spear B., Wise J. A., Clifford C. W. G., Newell B.R., Hagerhall C.M., Purcell T., Martin T.P. (2005) "Perceptual and physiological responses to the visual complexity of fractal patterns" *Nonlin. Dyn. Psych. Life Sci.* 9(1):89-114.
- [52] Mureika J. R., Taylor R. P. (2013) "The abstract expressionists and les automatistes: A shared multi-fractal depth?" *Signal Proc.* 93(3):573-578.
- [53] Taylor R.P., Spehar B, Clifford C.W.G., Newell B.R. (2008) "*Unifying Themes in Complex Systems IV*" Berlín, Springer, pp. 175-182.
- [54] Mandelbrot B. B. (1981) "Scalebound or scaling shapes: A useful distinction in the visual arts and in the natural sciences" *Leonardo* 14(1):43-45.
- [55] Mandelbrot B. B. (1982) "*The Fractal Geometry of Nature*" New York, W.H. Freeman and Company.
- [56] Mandelbrojt J. (2011) "Benoit Mandelbrot and fractals in art, science and technology" *Leonardo* 44 (2):98.
- [57] Gordon N.L. (2010) "*The Colours of Infinity: The Beauty and Power of Fractals*" London, Springer.
- [58] Burger W., Burge M.J. (2008) "*Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction using Java*" New York, Springer.
- [59] Rosenfeld A. (1969) "*Picture Processing by Computer*" New York, Academic Press.
- [60] Morris T. (2004) "*Computer Vision and Image Processing*" New York, Palgrave Macmillan.
- [61] Winkler A., Fitzner A. (2001) "*Paintbox N° 1*" London, Prestel-Verlag Publishing.
- [62] Pennebaker W.B., Mitchell J.L. (1993) "*JPEG: Still Image Data Compression Standard*" Norwell, Kluwer Academic Publishers.
- [63] Miano J. (1999) "*Compressed Image File Formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP*" Reading, Addison-Wesley.
- [64] Salomon D. (2007) "*Data Compression: The Complete Reference*" London, Springer.
- [65] Sayood K. (2012) "*Introduction to Data Compression*" Boston, Morgan Kaufmann Publishers.
- [66] Salomon D. (2006) "*Curves and Surfaces for Com-*

- puter Graphics” New York, Springer.
- [67] Reid G.C. (1990) “Thinking in PostScript” Reading, Addison-Wesley.
- [68] Parker J.R. (1988) “Extracting vectors from raster images” *Comp. Graph.* 12(1):75-79.
- [69] Lacroix V. (2009) “Proceedings of the Seventh International Conference on Advances in Pattern Recognition” Kolkata, IEEE, pp. 318-321.
- [70] Al-Douri B.A.T., Al-Khaffaf, H.S.M., Talib A.Z. (2011) “Empirical performance evaluation of raster to vector conversion with different scanning resolutions” *Lect. Notes Comp. Sci.* 7066:176-182.
- [71] Logvinenko A.D. (2012) “A theory of unique hues and colour categories in the human colour vision” *Color Res. Appl.* 37(2):109-116.
- [72] Nayatani Y., Komatsubara H. (2005) “Relationships among chromatic tone, perceived lightness, and degree of vividness” *Color Res. Appl.* 30(3):221-234.
- [73] Pridmore R. W. (2009) “Chroma, chromatic luminance, and luminous reflectance. Part I: Basic research and illustration of relations” *Color Res. Appl.* 34(1):45-54.
- [74] Ascensión P.J. Ruiz C. E. (1980) “Mecanismo de Fractura en un Acero 1045 Deformado” Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- [75] Zambrano N. (2012) “Dimensión Fractal, Parámetro de Configuración del Perfil de Fractura y Propiedades Mecánicas en el Acero Super Dúplex SAF 2507” Trabajo de Grado (MSc), Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- [76] Holguín A. (1997) “Características de la Zona de Transición Dúctil-Frágil en un Acero Estructural por Análisis Fractal” Trabajo de Grado (MSc), Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- [77] Gibbs W. J., Fewell P. J. (2012) “Microsoft Office 2010 for Teachers” London, Pearson Education.
- [78] Cahn J.W., Hagel W.C. (1962) “Decomposition of Austenite by Diffusional Processes” New York, Interscience Publishers, pp. 131-196.
- [79] Hillert M. (1962) “Decomposition of Austenite by Diffusional Processes” New York, Interscience Publishers, pp. 197-247.
- [80] Lewandowski J. J., Thompson A. W. (1986) “Microstructural effects on the cleavage fracture stress of fully pearlitic eutectoid steel” *Met. Trans. A* 17A(10):1769-1786.
- [81] Langford G. (1977) “Deformation of pearlite” *Met. Trans. A* 8A(6):861-875.
- [82] Wu K.M., Bhadeshia H.K.D.H. (2012) “Extremely fine pearlite by continuous cooling transformation” *Scrip. Mater.* 67(1):53-56.
- [83] Li Y.J., Choi P., Borchers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. (2011) “Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite” *Acta Mater.* 59(10):3965-3977.
- [84] Pandit A. S. (2011) “Theory of the Pearlite Transformation in steels” PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge, UK.
- [85] Honjo M., Kimura T., Suzuki S., Shikanai N. (2012) “High-Strength Pearlitic Steel Rail Having Excellent Delayed Fracture Properties” Patent Application Number 20120076685, JFE Steel Corporation, Japan.
- [86] Takahashi T., Ponge D., Raabe D. (2007) “Investigation of orientation gradients in pearlite in hypo- eutectoid steel by use of orientation imaging microscopy” *Steel Res.* 78(1):38-44.
- [87] Zhang X., Godfrey A., Hansen N., Huang X., Liu W., Liu Q. (2010) “Evolution of cementite morphology in pearlitic steel wire during wet wire drawing” *Mater. Charac.* 61(1):65-72.
- [88] Resmini R.G. (2009) “Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers: Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XV” Orlando, Shen S.S., Lewis P.E. (Ed.), Vol. 7334, pp. 1S-1—1S-9.
- [89] Tanaka M., Kato R., Sukegawa J. (2009) “Change in

- the fracture surface pattern in the fracture process of SUS631 stainless steel fatigued by repeated bending” *J. Iron Steel Inst. Japan Int.* 47(9):1372-1374.
- [90] Li J., Du Q., Sun C. (2009) “An improved box-counting method for image fractal dimension estimation” *Pattern Recog.* 42(11):2460-2469.
- [91] Miller L.E., Smith G.C. (1970) “Tensile fracture in carbon steels” *J. Iron Steel Inst.* 208:998-1005.
- [92] Kaiser P.K. (1984) “Psychological response to color: A cultural review” *Color Res. Appl.* 9(1):29-36.
- [93] Elliot A.J. Maier M.A., Moller A.C., Friedman R., Meinhardt J. (2007) “Color and psychological functioning: The effect of red on performance attainment” *J. Exp. Psych.: General*, 136(1):154-168.
- [94] Hatta T., Yoshida H., Kawakami A., Okamoto M. (2002) “Color of computer display frame in work performance mood and physiological response” *Percep. Motor Skills*, 94(1):39-46.
- [95] Alexander D. J., Bernstein I. M. (1989) “Cleavage fracture in pearlitic eutectoid steel” *Met. Trans. A* 20A(11):2321-2335.
- [96] Alexander D.J., Bernstein I.M. (1982) “The cleavage plane of pearlite” *Met. Trans. A* 13A(10):1865-1867.
- [97] Li S., Yip T.H., Ramanujan R.V., Liang H.M. (2003) “In situ TEM studies of the mechanisms of crack nucleation and propagation in fully lamellar microstructures” *Mater. Sci. Tech.* 19(7): 902-906.
- [98] Gurland J., Plateau J. (1963) “The mechanism of ductile rupture of metals containing inclusions” *Trans. ASM*, 56:442-454.
- [99] Bates R. C. (1984) “*Fracture, Interactions of Microstructure Mechanisms and Mechanics*” New York, The Metallurgical Society of AIME, pp. 117-155.
- [100] Gao X., Kim J. (2006) “Modeling of ductile fracture: Significance of void coalescence” *Int. J. Sol. Struct.* 43(20):6277-6293.
- [101] Benzerga A. A., Leblond J. P. (2010) “Ductile fracture by void growth to coalescence” *Adv. Appl. Mech.* 4:169-305.
- [102] Hilders O.A., Pilo D., Ogura M., Mora A.E. (1993) “Stereology of dimple fracture and mechanical properties correlations in an austenitic alloy with few inclusions” *Acta Microsc.* 2(1):15-27.
- [103] Broek D. (1973) “The role of inclusions in ductile fracture and fracture toughness” *Eng. Fract. Mech.* 5(1):55-56.
- [104] Maropoulos S., Ridley N. (2004) “Inclusions and fracture characteristics of HSLA steels forgings” *Mater. Sci. Eng. A* 384(1):64-69.
- [105] Garrison Jr. W.M., Wojcieszynski A.L. (2009) “A discussion of the spacing of inclusions in the volume and of the spacing of inclusions nucleated voids on fracture surfaces of steels” *Mater. Sci. Eng. A* 505(1-2):52-61.
- [106] Pranay C. (2010) “Effect of fine scale microstructure and Inclusions on the Toughness of Ultra High Strength Low Alloy Medium Carbon Steels” PhD Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA.
- [107] Hilders O.A., Ramos M., Peña N.D., Sáenz L. (2006) “Fractal geometry of fracture surfaces of a duplex stainless steel” *J. Mater. Sci.* 41(17):5739-5742.
- [108] Tarafder M., Das S.K., Chatteraj I., Nasipuri M., Tarafder S. (2010) “Fractal-based quantification of cracks paths for determination of effective microstructural length scales and fracture toughness” *Scrip. Mater.* 62(2):109-112.
- [109] Poljacek S.M., Risovic D., Furic K., Gojo M. (2008) “Comparison of fractal and profilometric methods for surface topography characterization” *Appl. Surf. Sci.* 254(11):3449-3458.
- [110] El-Soudani S.M. (1978) “Profilometric analysis of fracture” *Metallography*, 11(3):247-336.
- [111] El-Soudani S.M. (1974) “Theoretical basis for the quantitative analysis of fracture surfaces” *Metallography*, 7(4):271-360.
- [112] Thomason P. F. (1993) “Ductile fracture by the

- growth and coalescence of microvoids of non-uniform size and spacing” *Acta Metall. Mater.* 41(7):2127-2134.
- [113] Liu A.F. (2005) “*Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction*” Materials Park, ASM International.
- [114] Ritchie R.O. (2011) “The conflicts between strength and toughness” *Nature Mater.* 10:817-822.
- [115] Chawla K.K. (2012) “Foams, fibers, and composites: Where do we stand? *Mater. Sci. Eng. A* 557: 2-9.
- [116] Shao Y., Zhao H.P., Feng X.Q., Gao H. (2012) “Discontinuous crack-bridging model for fracture toughness analysis of nacre” *J. Mech. Phys. Sol.* 60(8):1400-1419.
- [117] Cranford S. W., Tarakanova A., Pugno N. M., Buehler M. J. “Nonlinear material behaviour of spider silk yields robust webs” *Nature* 482:72-78. Supplementary Information: pp. 1-18, doi: 10.1038/nature10739.
- [118] Field M., Golubitsky M. (2009) “*Symmetry in Chaos: A Search for Pattern in Mathematics, Art, and Nature*”, Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [119] Conway B.R., Chatterjee S., Field, G.D., Horwitz, G.D., Johnson E.N., Koida K., Mancuso K. (2010) “Advances in color science: from retina to behavior” *J. Neurosci.* 30(45):14955-14963.
- [120] Castellano M. (2008) “*The Cosmological Evolution of Galaxies and Large Scale Structures from Multy-Colour Surveys*” PhD Thesis, Università di Roma, Sapienza, Roma, Italy.
- [121] Bonnardel N., Piolat A., Le Bigot L. (2011) “The impact of colour on Website appeal and users’ cognitive processes” *Displays* 32(2):69-80.
- [122] <http://www.journals.elsevier.com/displays/> visitado: 11/11/2012.
- [123] <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-visual-communication-and-image-representation/> visitado: 11/11/2012.
- [124] [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1520-6378](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1520-6378) visitado: 11/11/2012.
- [125] Gouiffès M., Zavidovique B. (2011) “Body color sets: A compact and reliable representation of images. *J. Visual Comm. Imag. Represent.* 22(1):48-60.
- [126] Mackay V., Mackay D. M. (1977) “Multiple orientation - contingent chromatic after - effects” *Quart. J. Exp. Psychol.* 29(2):203-218.
- [127] Mureika J.R., Dyer C.C., Cupchik G.C. (2005) “On multifractal structure in non-representational art” *Phys. Rev. E* 72(4):046101.
- [128] Forsythe A., Nadal M., Sheehy N., Conde, C.J.C., Sawey M. (2011) “Predicting beauty: Fractal dimension and visual complexity in art” *Brit. J. Psychol.* 102(1):49-70.
- [129] Brainard D.H., Maloney L.T. (2011) “Surface color perception and equivalent illumination models” *J. Vision* 11(5):1-18.
- [130] Brainard D.H. (2001) “*International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*” Amsterdam, Elsevier Science, pp.2256-2263.
- [131] Burt C. (1950) “The factorial analysis of qualitative data” *Brit. J. Math. Statist. Psychol.* 3(3):166-185.
- [132] Stevens S.S. (1957) “On the psychophysical law” *Psychol. Rev.* 64(#):153-181.
- [133] Narens L. (1996) “A theory of ratio magnitude estimation” *J. Math. Psychol.* 40(2):109-129.
- [134] Sagi, E., Wong W., Norwich K.H. (2001) “Mathematical studies of the information in the stimulus-response matrix” *J. Math. Psychol.* 45(1):99-114.
- [135] Tanaka M., Kato R. (2012) “Fractal analysis of fracture surfaces and simulation of fracture process using fractal dimension maps in stainless steels fatigued by repeated bending” *Iron Steel Inst. Japan Int.* 52(9):1683-1692.
- [136] Wanhill R.J.H. (2011) “Case histories of ancient silver embrittlement” *J. Fail. Anal. Prevent.* 11(3): 178-185.

- [137] Kang J., Wilkinson D.S., Mishra R.K., Embury, J.D. Essadiqi E., Javaid A. (2012) "Microstructural Aspects of damage and fracture in AZ31 sheet materials" *JMEPEG*, DOI: 10.1007/s11665-012-0399-5.