

NATURALEZA FRACTAL DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN UN ACERO INOXIDABLE DÚPLEX ENVEJECIDO

Sáenz, P. Laura, A.

Centro de Investigaciones en Mecánica (CIMEC). Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería.
Universidad de Carabobo. Valencia. Estado Carabobo. Venezuela
email: lsaenz29@gmail.com

Resumen: En la investigación se utilizó un acero inoxidable Dúplex SAF 2205 de alto Nitrógeno. Se realizaron ensayos de tracción, impacto y microscopía óptica y electrónica de barrido, desarrollándose un modelo mecánico-fractal que describe la contribución de algunas propiedades mecánicas y características microestructurales a la determinación de la Dimensión Fractal de superficies de fractura por tensión en el acero. Se demostró que la intensidad de envejecimiento en éste material genera cambios importantes en las propiedades mecánicas, aunque las superficies de fractura por tensión correspondientes permanecen morfológicamente muy similares. El cálculo de la Dimensión Fractal D se basó en la determinación experimental del tamaño de cavidad en una sub-red de percolación en las superficies de fracturas obtenidas y su comparación con el tamaño teórico de las mismas. Ambas magnitudes, junto al tamaño de grano, constituyeron la base para definir tres factores: el estructural, el de ajuste y el equivalente, los cuales permitieron modular los valores calculados de la Dimensión Fractal. Estos últimos se ajustaron razonablemente bien a los determinados mediante el conocido "Método de las Islas". Los aceros inoxidables dúplex, denominados aceros de última generación, son de reciente incorporación en el mercado internacional. Los resultados obtenidos permitirán profundizar en el estudio de sus propiedades mecánicas y ampliar la aplicación de estos aceros, ya que actualmente solo son utilizados en las empresas petroleras y automotrices y, la idea en bioingeniería es dirigir estudios hacia su uso en prótesis.

Palabras Clave: Acero inoxidable dúplex, envejecimiento, dimensión fractal, tamaño de cavidad experimental

FRACTAL NATURE OF PLASTIC DEFORMATION IN OLD DUPLEX STAINLESS STEEL

Abstract: In this investigation, a high Nitrogen duplex stainless steel SAF 2205 was used. Tension, impact, Vickers hardness, optical microscopy and scanning electron microscopy tests were carried out. A mechanical-fractal model was developed. It describes the contribution of some mechanical properties and structural characteristics to the determination of the fractal dimension on tension fracture surfaces of the steel. It was shown that aging intensity of this material generates important changes in the mechanical properties, although the corresponding tension fracture surfaces remain morphologically very similar. The calculation of the fractal dimension (D) was based on the experimental determination of the voids size in the percolation lattice of the fracture surfaces that were obtained and its comparison with the theoretical size. Both magnitudes, along with grain size, were the basis for defining three factors: structural, adjustment and equivalence, which helped shape the calculated values of the fractal dimension. The latter were adjusted reasonably well to the ones determined by the well-known "island method". The Duplex stainless steels are referred to as last generation steels. They were recently incorporated into the international market. The results from this research will allow further study of their mechanical properties and extend the application of these steels, since they are currently used in refineries and automotive companies, and bioengineering intends to conduct studies aimed at their use in prosthetic.

Key words: Duplex stainless steel, fractal dimension, plastic instability, fracture toughness, voids size, lattice percolation.

INTRODUCCIÓN

En las estructuras construidas por el hombre aparecen defectos a escalas nanos, micro y macro, los cuales evolucionan durante la vida en servicio, originando fallas a veces catastróficas. Los fenómenos de ruptura

que ocurren a microescala gobiernan los procesos de fractura en sólidos deformados (Izotov et. al., 1993, Lazarev et. al., 1993; Balankin, 1990), por lo que una predicción confiable de la respuesta de un sólido a fuerzas externas deberá basarse en una buena comprensión de la mecánica de fractura a microescala,

así como en las relaciones entre los fenómenos que ocurren a este nivel y los correspondientes al nivel macroscópico. Sin embargo, en la actualidad ha sido probado más allá de toda duda (Cherepanov et. al., 1997; Balankin, 1997), que la aproximación del medio continuo resulta a menudo insatisfactoria para su uso en materiales reales, ya que los patrones de fractura correspondientes son de naturaleza no euclídea (Cherepanov et. al., 1997), lo cual provee la razón para introducir la geometría fractal en el desarrollo de la mecánica de fractura (Meakin, 1991; Carpinteri, 1994).

Este nuevo tipo de geometría, el cual constituye una rama de las matemáticas aplicadas desarrollada por Mandelbrot en 1984, permite la descripción cuantitativa de formas irregulares más complejas que las formas euclídeas, muchas de las cuales pueden observarse en los distintos materiales ingenieriles a nivel microestructural. La importancia de la obtención de valores confiables de parámetros microestructurales, descansa en la búsqueda de correlaciones con las propiedades finales a través del parámetro denominado " Dimensión Fractal " D , cuyo valor, (no entero), es mayor que el valor correspondiente, (entero), de la Dimensión Euclídea d . En éste sentido, se ha establecido claramente que los patrones de fractura pueden ser tratados desde el punto de vista de la geometría fractal (Caldarelli et. al., 1994; Juang et.al., 1995; Mandelbrot et. al., 1984; Xie & Sanderson, 1995; Hilders et. al., 2002; Stach et. al., 2003), lo que implica una mayor comprensión de la naturaleza de las propiedades en los materiales de ingeniería.

El objetivo general de la presente investigación, es el de desarrollar un modelo mecánico-fractal que describa la contribución de algunas propiedades mecánicas y características microestructurales a la determinación de la Dimensión Fractal de superficies de fractura por tensión, en el acero inoxidable dúplex de alto nitrógeno SAF 2205. Específicamente se pretende describir los cambios en un conjunto de propiedades mecánicas de este material, cuando el mismo es sometido a procesos de envejecimiento a 475 °C por intervalos cortos de tiempo, en términos de los valores de la Dimensión Fractal obtenidos mediante el modelo propuesto. Se ha demostrado que la intensidad de envejecimiento en éste material, genera cambios importantes en las propiedades mecánicas, aunque las superficies de fractura por tensión correspondientes permanecen morfológicamente muy similares (Fahmy et. al., 1991; Michell, 1990).

Dado que la Dimensión Fractal es una propiedad intensiva y su valor particular es una característica intrínseca del material (Mandelbrot, et. al., 1984; Cherepanov et. al., 1995), su utilización en el acero en cuestión bajo las condiciones descritas, deberá servir para diferenciar cuantitativamente pequeñas diferencias morfológicas en superficies de fractura que en apariencia son iguales. La bondad de los valores de Dimensión Fractal encontrados podrá determinarse por comparación con los derivados de la aplicación del Método de las Islas (Hilders, 1992), el cual resulta muy apropiado en el caso de las superficies de fractura por tensión. Aunque algunos modelos han sido propuestos con anterioridad para relacionar la variación de alguna propiedad mecánica con el incremento en la Dimensión Fractal (Ray y Mandal, 1992; Hilders et. al., 1996) los mismos están basados en correlaciones simples derivadas de resultados netamente experimentales.

Los cambios en las propiedades mecánicas asociadas al envejecimiento a 475 °C en el acero dúplex a estudiar, es una consecuencia de la descomposición de la ferrita (α) en una fase α' rica en cromo y otra fase α rica en hierro (Nystrom, 1990; Simmons, 1995, Sáenz, 2001, Sáenz et al 2007). La fase α' aumenta la tendencia al maclado y por lo tanto, la posibilidad de formación de microgrietas (Huang Wang, 1990), lo cual genera el fenómeno de la inestabilidad del flujo plástico, produciéndose defectos localizados que se pueden extender fácilmente. Esto es especialmente cierto para los procesos que involucran flujo plástico predominantemente unidireccional (Sowerby et. al., 1978; Jhonson y Lloyd, 2000) lo que ha sido objeto del modelaje de los procesos de deformación a través de las llamadas "Ecuaciones Mecánicas de Estado" (Bloom et. al., 1985; Kocks, 1975). A partir de una ecuación de éste tipo Hart (1967, 1970) propuso un criterio que ha servido de base para la comprensión de los procesos de inestabilidad durante el flujo plástico, el cual plantea este fenómeno como el resultado de la interacción de dos importantes características: la capacidad de distribución de la deformación plástica y la capacidad de endurecimiento.

Los aspectos a desarrollar en el presente trabajo, podrán contribuir al conocimiento general de la relación existente entre los parámetros de la Geometría Fractal y los principios de la Mecánica de Fractura, los cuales son complementarios en el estudio del fenómeno de agrietamiento. La unión conveniente de estos campos y su aplicación a un acero dúplex de alto nitrógeno resulta bastante novedosa, tanto desde el punto de vista de los métodos como del material. En la

actualidad los aceros inoxidable dúplex también denominados de "**Última Generación**" están siendo introducidos en el mercado y se está evaluando la posibilidad de que sustituyan a los aceros inoxidable convencionales, ya que pueden resultar más económicos por su bajo contenido de Níquel.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material sometido a estudio es un acero inoxidable dúplex de alto contenido de nitrógeno SAF 2205, cuya composición química (% en peso) se muestra en la Tabla Nº 1.

Tabla Nº 1. Composición química del acero dúplex SAF 2205 (% en peso)

C (máx.)	Si (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Cr	Ni	Mo	N
0,03	0,8	1,2	0,035	0,015	24-26	6-8	3-4	0,2-0,3

Fuente: Sandvik Steel C. A.

El material fue proporcionado por la empresa sueca Sandvik Steel C. A. en forma de barras cilíndricas calibradas de 20 mm de diámetro, provenientes de laminación en caliente.

El tratamiento térmico fue realizado en un horno marca THERMOLYNE, modelo 48000. Todas las probetas destinadas para los ensayos de tracción, Charpy y estudio metalográfico fueron calentadas en el mismo horno. Las muestras fueron "solubilizadas" a 1120 °C por dos horas, templadas en agua y seguidamente envejecidas a 475 °C por 1, 2, 6,5, 12, 24, 40 y, 120 horas. Se realizaron ensayos de tracción, impacto microdureza Vickers, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Las probetas de tracción y de impacto Charpy en V, fueron mecanizadas en un torno de control numérico (CNC).

Los ensayos de tracción se realizaron mediante el uso de la máquina universal marca Galdabini, modelo 2300 de 20 toneladas de capacidad. Se utilizaron probetas cilíndricas (sección reducida con diámetro de 6,35 mm y longitud calibrada de 25,4mm) según las especificaciones establecidas en la norma ASTM E 8M - 04 [6]. Se ensayaron doce (16) probetas (2 por cada condición) a temperatura ambiente hasta la ruptura, a una velocidad de cabezal de 0,5 cm/min. Para las probetas Charpy fue necesario maquinar la entalla en V por un proceso de electroerosión para garantizar que en todas las muestras el ángulo de 45° y la profundidad de la entalla de 2 mm fuesen idénticos.

Se utilizaron cuatro probetas por cada condición de ensayo de 55x10x10 (mm³) maquinadas de acuerdo a la Norma ASTM E 23-96.

Para la microscopía óptica se utilizó un microscopio marca *Versamet 2*, modelo *Union 7761*, con cámara incorporada de 35 mm, con el que se logró visualizar la microestructura de las muestras correspondientes a cada una de las de condiciones estudiadas, observando las fases ferrita y austenita. Antes de realizar las observaciones en el microscopio óptico, se procedió a embutir las muestras para posteriormente realizar la preparación metalográfica, sometiéndolas a técnicas estándar de desbaste y pulido. Luego fueron atacadas con una solución de 15 ml de ácido clorhídrico (HCl al 37%), 50 ml de agua destilada y 1 gramo de Na₂S₂O₂.

La microscopía electrónica de barrido se realizó utilizando un microscopio electrónico de barrido marca Phillips, modelo XL30, operado a 25 kv, acoplado a un microanalizador EDX (análisis de energía dispersiva de rayos X).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de cada una de las condiciones de ensayo evaluadas con los ensayos de tensión e impacto charpy en V, se muestran en las Tablas Nº 2 y 3. Debido a la precipitación de la fase α' , tanto el esfuerzo de fluencia, σ_{ys} , el esfuerzo real uniforme máximo, UTS, y el esfuerzo real de fractura, σ_f , aumentarán significativamente y de manera continua, con el incremento del tiempo de envejecimiento a 475 °C, tal como se observa en la Tabla Nº 2.

El esfuerzo de fluencia de la ferrita, la cual es mayor que el correspondiente a la austenita, deberá sufrir un aumento en su valor, debido a la precipitación selectiva de la fase α' . Físicamente este aumento se manifiesta como un retardo en el comienzo del deslizamiento en ferrita, es decir, en el inicio del movimiento de dislocaciones el cual se dificulta debido a la fina dispersión de α' (Pickering, 1970).

Tabla N° 2. Propiedades Mecánicas promedio: Esfuerzo de Fluencia (σ_{ys}), Esfuerzo real uniforme máximo (UTS), esfuerzo real de ruptura (f), Deformación Real de Fractura, ϵ_f , energía absorbida por impacto, CVN y el factor de intensidad de esfuerzo, K_{IC}

Condición	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	σ_f (MPa)	Deformación Real de Fractura, ϵ_f	CVN (J)	K_{IC} (MPa m ^{1/2})
OR	634	1077	1382	1,176	312	341
1T	697	1067	1567	1,350	285	341
2T	730	1131	1136	1,072	272	340
6,5T	771	1240	1318	1,181	261	342
12T	809	1198	1460	1,165	205	302
24T	854	1240	1450	1,090	183	299
40T	853	1282	1303	1,073	168	285
120T	956	1428	1549	1,130	80	200

1T: Envejecido a 475°C por 1 hora; 2T: Envejecido a 475°C por 2 horas; 6,5T: Envejecido a 475°C por 6,5 horas; 12T: Envejecido a 475°C por 12 horas; 24T: Envejecido a 475°C por 24 horas; 40T: Envejecido a 475°C por 40 horas; y, 120T: Envejecido a 475°C por 120 horas.

Tabla N° 3. Coeficiente de Endurecimiento, n , Deformación real máxima, ϵ_{UTS} , el parámetro proporcional al coeficiente de endurecimiento, γ , γ , la sensibilidad a la velocidad de deformación, m .

Condición	n	ϵ_{UTS}	γ	m
OR	0,262	0,281	0,932	0,0301
1T	0,241	0,243	0,990	0,0232
2T	0,233	0,265	0,880	0,0253
6,5T	0,225	0,315	0,714	0,0259
12T	0,216	0,249	0,867	0,0257
24T	0,215	0,230	0,935	0,0250
40T	0,235	0,241	0,975	0,0213
120T	0,200	0,312	0,641	0,0450

Morfología de las superficies de fractura - muestras de tracción

En las Figuras 1 y 2, se muestran las macrografías por microscopía electrónica de barrido (MEB), correspondientes a las probetas fracturadas de la condición original y de los tratamientos de envejecimiento por 1, 2, 6,5, 12, 24, 40 y 120 horas. Las macrografías correspondientes a la condición original muestran las características morfológicas típicas de la fractura por tensión "copa-cono", la cual ha sido extensamente reportada y analizada (Rogers, 1960, French & Weinrich, 1975, Hilders et al, 1993).

Este tipo de fractura tiene su origen en la deformación localizada que ocurre en la región central de la probeta. A medida que el cuello se forma, se desarrollan tensiones hidrostáticas progresivamente mayores, por lo que el material se endurece y la carga necesaria para que continúe el flujo plástico disminuye. Como la carga no se mantiene al nivel mínimo necesario para que haya flujo, entonces ocurre la fractura.

Desde el punto de vista macroscópico, estas superficies de fractura son clasificadas como dúctiles de bajas temperaturas, fibrosas o copa cono. En este tipo de fractura se pueden distinguir tres zonas: una zona

fibrosa central, una de transición radial y una periférica de corte, la cual se orienta aproximadamente a 45° del eje de tensión. Las cavidades que se forman en la zona central, crecen y se unen, formando una grieta que al propagarse origina la zona radial. Esta propagación continúa mediante un mecanismo donde predominan los esfuerzos de corte, generando la zona periférica. La zona radial es difícil de detectar en

cualquiera de las condiciones, en todas las muestras se observa un agrietamiento central. Además, no hay cambios en los mecanismos de fractura, bajo cualquiera de las condiciones de tratamiento el material presenta un mecanismo de fractura dúctil, con ruptura de hoyuelos por la coalescencia de cavidades. Se observa inclusiones en las cavidades grandes donde ha habido coalescencia.

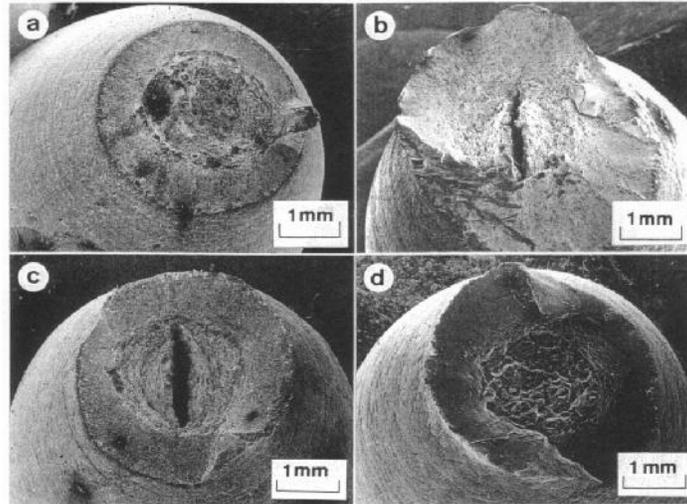


Figura 1. Macrografías por microscopía electrónica de barrido (MEB), correspondientes a las probetas fracturadas de tensión en a) Condición original y de los tratamientos de envejecimiento a 475 °C por b) 1 h, c) 2 h, y, d) 6,5h.

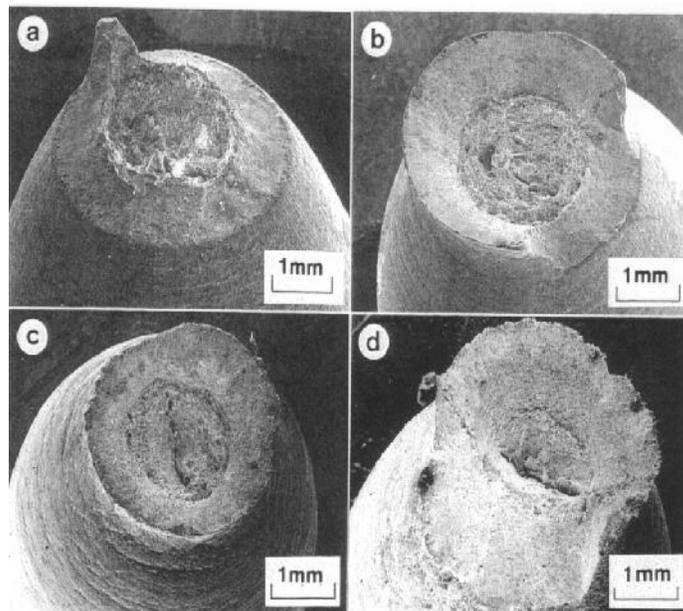


Figura 2. Macrografías por microscopía electrónica de barrido (MEB), correspondientes a las probetas fracturadas de tensión con tratamientos de envejecimiento a 475 °C por: b) 12 h, c) 24 h, c) 40h y, d) 120h.

En las Figuras 3 y 4 que muestran las fractografías obtenidas a través del MEB, de la región fibrosa central de las superficies de fractura correspondientes a las diferentes condiciones de las muestras rotas de tracción. Las cavidades que cubren ésta zona son las que están sometidas a esfuerzos normales durante el proceso de deformación, por lo que resultan con una morfología más o menos equiaxial. Particularmente en las Figuras que corresponden a regiones puntuales de la zona referida, se puede observar que la nucleación no es homogénea, que incluye una sub-red de pequeñas cavidades (comportamiento fractal) para todas las condiciones. En general, para todas las condiciones, en algunas regiones se observa la formación de cavidades dobles y triples producto de

la unión de varias cavidades. Estas cavidades fueron tomadas en consideración en la evaluación cuantitativa realizada, así como también las pequeñas cavidades que forman las sub-redes. Así mismo en las composiciones fractográficas, se observa la formación de algunas cavidades alrededor de inclusiones. La proporción de cavidades formadas de esta manera, fue realmente grande lo que permite definir el mecanismo de nucleación como heterogéneo motivo por el cual fue necesario el cálculo de la dimensión fractal basado en la determinación experimental del tamaño de cavidad en una sub-red de percolación en las superficies de fractura obtenidas y su comparación con el tamaño teórico de las mismas.

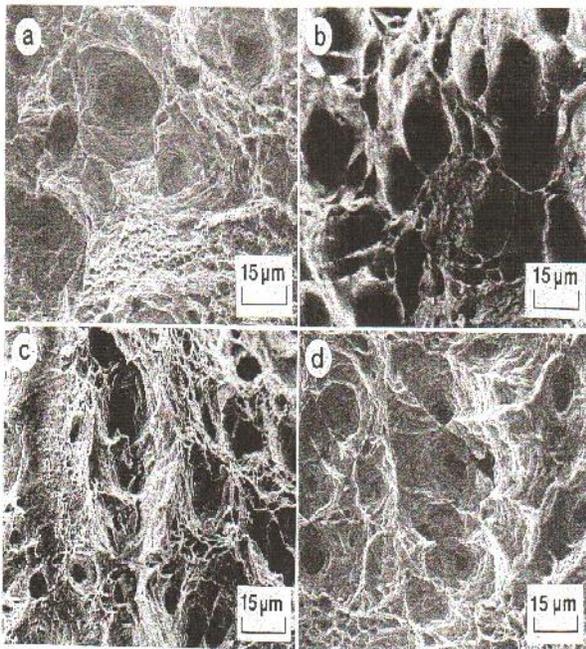


Figura 3. Estructura de cavidades de la zona central de las superficies de fractura correspondientes (MEB) a) Condición original y, envejecida a 475 °C por b) 1 hora, c) 2 horas y, d) 6,5 horas.

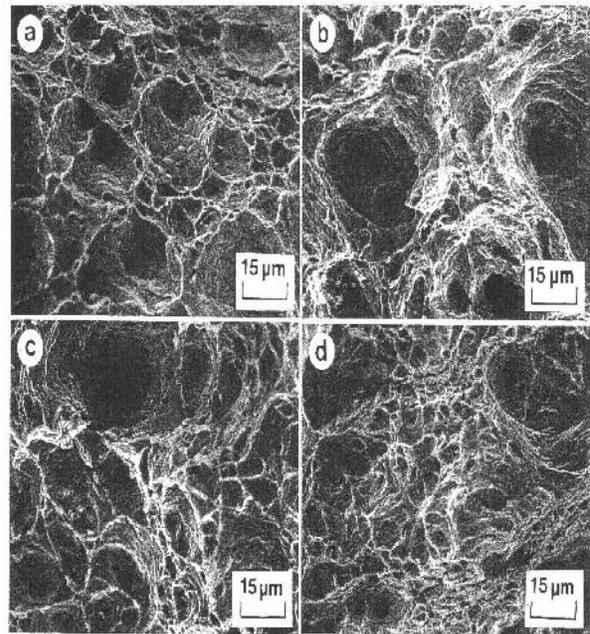


Figura 4. Estructura de cavidades de la zona central de las superficies de fractura correspondientes (MEB) envejecida a 475 °C por a) 12 horas, b) 24 horas c) 40 horas y, d) 120 horas.

Tamaño de cavidad fractográfico

La cuantificación del tamaño de cavidad fractográfico fue realizada en la zona fibrosa central de la superficie de fractura. En esta zona las cavidades presentan una morfología aproximadamente equiaxial, lo que permite la evaluación estadística del tamaño de éstas. Una población de cavidades suficientemente representativa

de la zona fibrosa central, se observa en las composiciones fractográficas de las Figuras 5 y 6, correspondientes a cada una de las condiciones extremas de tratamiento estudiadas. Estas composiciones fractográficas fueron utilizadas para la cuantificación del tamaño de cavidad máximo, d_{TEF} , utilizando la ecuación 1 y, los resultados son mostrados en la Tabla N° 2.

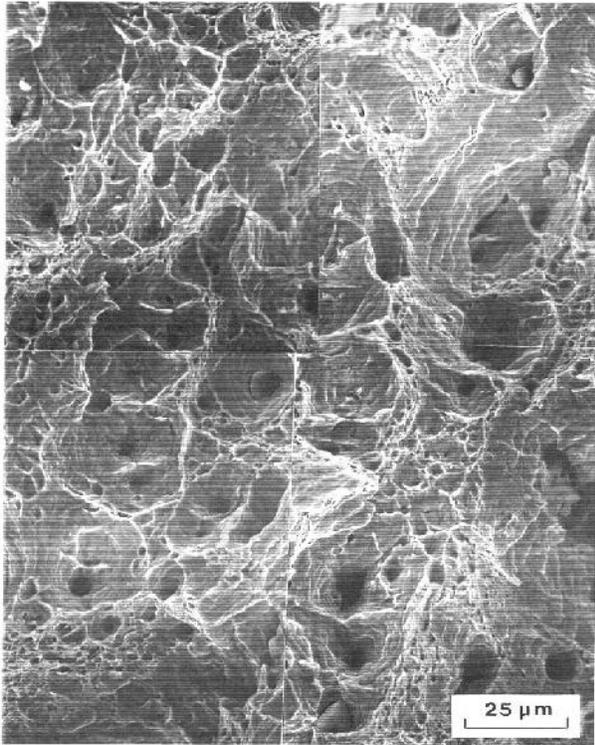


Figura 5. Composición fractográfica de la zona fibrosa central de la muestra de tensión correspondientes a la condición original.

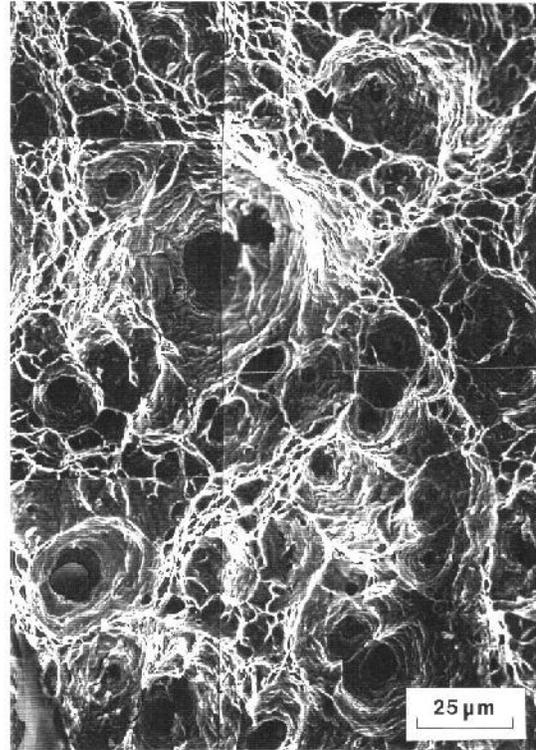


Figura 6. Composición fractográfica de la zona fibrosa central de la muestra de tensión envejecida a 475 °C por 120 horas.

El Tamaño de cavidad fractografico, d_{TEF} se obtiene de histogramas de frecuencia relativa, f_r versus intervalo de clase (i). La frecuencia relativa, es definida como el cociente entre el número de cavidades n_i de

un determinado intervalo, y el número total de cavidades considerado ($\sum n_i$). Estos valores son indicados en la Tabla N° 4

$$(d_{TEF}) = \frac{\sum N_{Gi} (d_{TEF'}^c)_i}{\sum N_{Gi}} \quad (1)$$

donde,

$\sum_{i=1}^n N_{Gi}$ = Sumatoria del número total de cavidades en el intervalo i

$(d_{TEF'}^c)_i$ = Diámetro promedio de cavidades en el intervalo i

d_{TEF} = Tamaño de cavidad fractografico.

Tabla N° 4. Tamaño de Cavidad Fractografico, d_{TEF}

Tiempo (h)	$\sum_{i=1}^n N_{Gi}$	$\sum_{i=1}^n N_{Gi}(d_{TEF}^C)_i$	d_{TEF} (μm)
0	181	2181	14,20
1	111	1557	16,23
2	240	2186	10,54
6,5	170	1550	10,55
12	206	1947	10,94
24	165	2010	14,10
40	302	3048	11,31
120	335	1845	6,15

Como primer paso se desarrollo un modelo mecánico-fractal que describe la contribución de algunas propiedades mecánicas y características microestructurales a la determinación de la Dimensión Fractal D_M en superficies de fractura por tensión.

Dimensión fractal

El cálculo de la dimensión fractal, D se basó en la determinación experimental del tamaño de cavidad d_{TE} en una sub-red de percolación en las superficies de fractura obtenidas de las muestras de tensión de un acero dúplex de alto nitrógeno SAF 2205 sometido a procesos de envejecimiento a 475 °C por períodos

de tiempo comprendidos entre 1 y 120 h y, su comparación con el tamaño teórico d_{TK} de las mismas. Ambas magnitudes, junto al tamaño de grano, constituyeron la base para definir los tres factores el estructural ($m=d/d_{TE}$) el de ajuste ($m' = d_{TE}/d_{TK}$) y, el equivalente ($w = d/d_{TK}$), los cuales determinaron la bondad de los valores calculados de la Dimensión Fractal.

El tamaño promedio de cavidad equivalente d_{TK} fue calculado con el uso de la ecuación 2 y, el tamaño promedio de cavidad experimental, d_{TE} fue calculado asumiendo una red de percolación, con el uso de la ecuación (3)

$$d_{TK} = \left\{ \frac{4 n^2 E \sigma_{ys} \epsilon_f}{3 \pi [2 (\sigma_{ys} + \sigma_{UTS}) + nE]^2} \right\} \left(\frac{\Phi_0}{2} \right) e^{-\epsilon_f/2} \quad (2)$$

Donde, d_{TK} el Tamaño promedio de cavidad equivalente, ϵ_f deformación real de fractura, σ_{ys} el Esfuerzo de fluencia, σ_{UTS} el Esfuerzo real uniforme

máximo (MPa), n el Coeficiente de endurecimiento, E el Modulo de Young (MPa) y, ϕ_0 el Diámetro inicial (mm).

$$d_{TE} = \left\{ \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sum \eta_{Mi}} \right) \right\} (A'_T - A'_{TNI}) - \left(\frac{\sum N_{TEFi}}{\sum \eta_{Mi}} \right) (d_{TEF})^2 \quad (3)$$

A'_{TNI} es el área total proyectada no identificada, N TEF es el número total de cavidades en el intervalo i, d_{TEF} tamaño promedio de cavidad fractografico, η_{Mi} es el número total de cavidades pequeñas, los resultados

de los cálculos de cada termino se encuentran en la Tabla N° 5.

Finalmente La Dimensión Fractal fue calculada utilizando la ecuación 4.

$$D = \lg \left(2 \frac{d}{d_{TE}} \right) / \lg \left(\sqrt{3} \frac{d}{d_{TK}} \right) \quad (4)$$

Al sustituir el d_{TK} de la ecuación 1, en la ecuación 4 D_M se expresa:

$$D_M = \lg \left(2 \frac{d}{d_{TE}} \right) / \lg \left\{ \left(\sqrt{3} \frac{d}{d_{TE}} \right) \frac{3 \pi \left[2 (\sigma_{ys} + \sigma_{UTS}) + n E \right]^2 d_{TE}}{2 \phi_0 (n^2 E \sigma_{ys} \varepsilon_f) \exp(-\varepsilon_f/2)} \right\} \quad (5)$$

Donde D_M es la Dimensión fractal calculada por el modelo propuesto por Sáenz (2009).

Para el cálculo de d_{TE} se hizo necesario el cálculo de $A'_{T'}$, $A'_{TNI'}$, $d_{TEF'}$, $\eta_{MI'}$, para cada una de las

composiciones fractográfica de la zona fibrosa central (Figura. 5 y Figura. 6) de las muestras de tensión en cada una de las condiciones de ensayo.

Tabla N° 5. Valores del área total proyectada no identificada, $A'_{TNI'}$ número total de cavidades en el intervalo i , N_{TEFi} y, el número total de cavidades pequeñas, η_{MI}

CONDICION	$A_{TNI} (\mu m)$	$\eta_{MI} i$	N_{MA}	$A_T (\mu m)^2$
OR	29221,25	1351	181	59270,42
1	31844,42	3625	111	66682,27
2	33000,50	4730	240	71769,40
6,5	23211,48	4125	170	50770,80
12	23318,37	1820	206	46314,29
24	33402,65	2625	165	67868,94
40	37692,26	828	302	63078,48
120	46819,26	2814	335	76921,38

En la Tabla N° 6 se reportan los resultados obtenidos del cálculo de la Dimensión Fractal, se confirma que están dentro del rango indicado ($1 < D < 2$) para todas las condiciones estudiadas. Investigadores como Xie y Sanderson (1995), Stachi et. al. (2003) y, Hilders

et. al. (2006), han encontrado que los perfiles de fractura no tienen carácter fractal y pueden ser caracterizados por su Dimensión Fractal lineal, D_L lo cual hace que sus valores no se encuentren entre 1 y 2.

Tabla N° 6. Dimensión Fractal, D_M Tamaño de cavidad equivalente, d_{TK} , Tamaño de cavidad estadístico experimental, d_{TE} y. el Tamaño de grano, d

Tiempo (h)	$d_{TK} (\mu m)$	D_M	$d_{TE} (\mu m)$	$d (\mu m)$
0	2,65	1,05	2,87	6
1	2,95	1,23	2,63	5
2	2,76	1,14	2,63	6
6,5	2,98	1,35	2,37	5
12	3,08	1,28	2,59	5,5
24	3,14	1,22	2,88	5
40	3,16	1,20	2,98	5
120	3,43	1,01	3,90	5

Por otra parte, en la Tabla N° 7 se muestran los resultados experimentales que demuestran que los factores propuestos en la presente investigación: Estructural (m), de ajuste (m') y equivalente (w), se encuentran dentro de los rangos indicados en el modelo propuesto, $m > 1$, $m' < 1$ y $mm' > 1$. La Dimensión Fractal calculada por el Modelo Mecánico Fractal D_M , y la Dimensión Fractal calculada a través

del uso del método de las islas, D_S reportado por Ramos, 2004 (ver Tabla N° 8), se puede observar que existe una relación lineal (Figura 7), lo que demuestra que los resultados obtenidos con el uso del modelo planteado son directamente proporcionales a los obtenidos a través de la aplicación de un método convencional como lo es el de las islas.

Tabla N° 7. Factores Estructural (m), de ajuste (m') y equivalente (w) para cada condición de trabajo

Tiempo (h)	m ($m > 1$)	m' ($m' < 1$)	$mm' = w$ ($mm' > 1$)
0	2,1	1,09	6
1	1,9	0,9	6
2	2,3	0,96	6
6,5	2,1	0,79	6
12	2,3	0,84	7
24	1,7	0,92	5
40	1,7	0,94	5
120	1,3	1,14	4

Tabla N° 8. Dimensión Fractal calculada por a) Método Perfilométrico, D_S (Ramos, 2004) y b) Modelo Mecánico Fractal, D_M

Tiempo (h)	D_S	D_M
	Método de las islas	Modelo Mecánico Fractal
0	1,09	1,05
1	1,18	1,23
2	1,15	1,14
6,5	1,11	1,35
12	1,11	1,28
24	1,10	1,22
40	1,07	1,20
120	1,05	1,01

Los resultados experimentales del modelo propuesto se observan en la Figura 8 donde se relaciona la dimensión fractal con el factor de equivalencia, w' (w' = relación del tamaño de cavidad con el tamaño de grano). Se observa que los resultados experimentales

se ubican en el campo donde el tamaño de grano es mayor que el tamaño de cavidad promedio equivalente, d_{TK} y el tamaño de cavidad promedio experimental, d_{TE} ($d > d_{TE} > d_{TK}$).

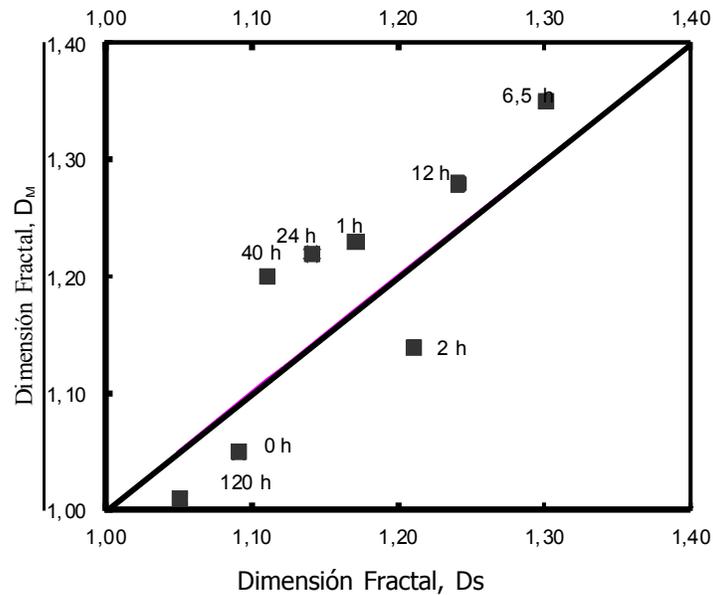


Figura 7. Correlación entre la Dimensión Fractal calculada por el método de las islas, D_s (Ramos, 2004) y a través del Modelo Mecánico - Fractal, D_m para el acero SAF 2205 envejecido a 475 °C.

Las muestras más dúctiles y más tenaces, correspondientes a la condición original, 1h, 2h y 6,5 h, muestran un tipo de superficie más accidentado, que el correspondiente a los materiales más rígidos y frágiles como el de las condiciones 12, 24 40 y 120 horas de tratamiento respectivamente.

Cabría esperar que si D caracteriza el grado de irregularidad de una superficie, entonces debería tener un valor superior para la muestra envejecida a 475 °C

por 120 h. No obstante, para este caso $D = 1,01$ y para la condición 6,5 h, $D = 1,35$.

Lo anterior es solo un ejemplo elemental de las dificultades iniciales para considerar a D como un parámetro simple de interpretar, cuando se le relaciona con las propiedades mecánicas, las cuales, a su vez no se reflejan necesariamente en un tipo específico de morfología de fractura.

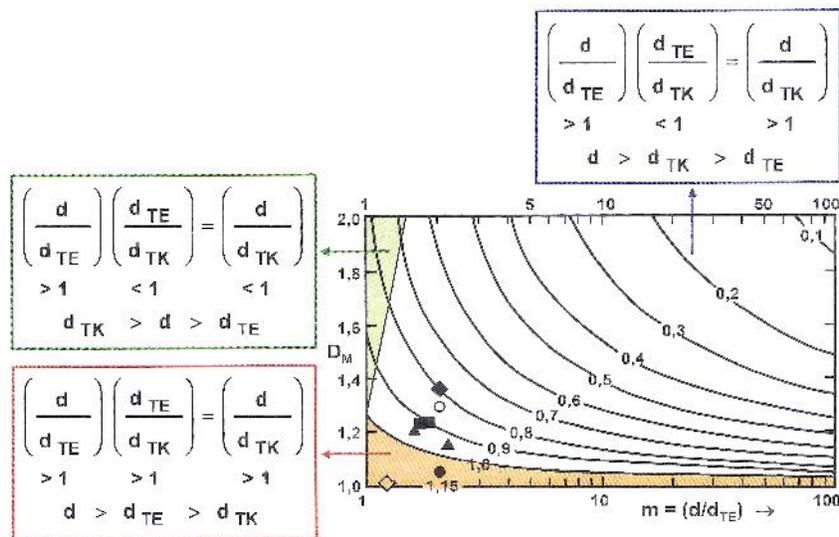


Figura 8. Dimensión Fractal con el factor de equivalencia, w' donde se ubican los resultados experimentales del envejecimiento realizado al acero SAF 2205.

Por otra parte, el grado de plasticidad, el cual es una propiedad del material, está relacionado con la superficie de fractura, ya que, en el presente caso, en general, a medida que el material es más dúctil, se observa mayor irregularidad en dichas superficies. Por lo tanto, la relación de D con propiedades como la ductilidad, permite establecer la posibilidad del uso de la Dimensión Fractal así como del tamaño de cavidad, como parámetros indicadores del grado de plasticidad del acero inoxidable dúplex 2205, bajo las condiciones de tratamiento térmico estudiadas. De esta forma se puede llegar a establecer relaciones útiles que conecten aspectos microestructurales y del mecanismo de fractura con ciertas propiedades del material en cuestión. En el presente trabajo esta conexión se logra a través de la relación general entre d_{TE} , D , y ϵ_f .

CONCLUSIONES

Se diseñó el modelo mecánico fractal y se validó al relacionar la dimensión fractal calculada por el Modelo D_s , y la dimensión fractal calculada por medio del método profilométrico D_M , donde se obtuvo una relación casi lineal lo cual validó los resultados obtenidos con el uso del modelo planteado.

Al evaluar el comportamiento de la energía absorbida por impacto, se observa que a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento isotérmico del material este se fragiliza, y disminuye el nivel de energía dúctil del material. El envejecimiento a 475 °C va acompañado de la descomposición de la ferrita de α' y conduce a una pronunciada reducción de la tenacidad de impacto.

Cuando el tiempo de tratamiento es máximo, 120 horas, en el comportamiento del material se observa la fragilización, este detalle es mostrado por MEB donde las facetas de clivaje son apreciables. Durante el envejecimiento a 475 °C, la fase ferrita comienza a fragilizar debido al proceso de descomposición previamente descrito. Naturalmente la fragilización de la ferrita afecta el comportamiento de fractura del material, en ambas muestras, tracción y charpy en V.

La deformación de fractura disminuye y la dimensión fractal se reduce para tiempos largos de envejecimiento, las superficies son menos rugosas menos dúctiles. Mientras que a tiempos cortos de tratamiento las deformaciones son grandes, el material es muy dúctil, incrementando la dimensión fractal (condición original y material tratado a 1 h de envejecimiento). Con 2h de tratamiento el comportamiento es frágil. Aparentemente la dimensión fractal no manifiesta relación con la ductilidad.

Las muestras más dúctiles y más tenaces son las correspondientes a la condición original, 1h, 2h y 6,5 h, muestran un tipo de superficie más accidentado, que el correspondiente a los materiales más rígidos y frágiles como el de las condiciones 12, 24 40 y 120 horas de tratamiento respectivamente.

Se observa que a medida que el material envejece hay menos tortuosidad en la superficie de fractura. El grado de irregularidad de una superficie de fractura, está relacionado con los diversos accidentes topográficos de la misma, los cuales originan un incremento en el valor de la dimensión fractal D . Puede afirmarse que valores más altos de D está asociados, en general, a una superficie más irregular. En este sentido, la superficie de fractura con mayor grado de irregularidad corresponde a la condición tratada a 6,5 h cuyo valor de D es el más alto ($D = 1,35$) correspondiendo el menor grado de irregularidad a la condición 120 h ($D = 1,01$).

Es evidente entonces que la dimensión fractal es función de las características microestructurales: tamaño de grano, tamaño de cavidad experimental, d_{TE} y el tamaño de cavidad estadístico, d_{TK} .

La capacidad que posee la dimensión fractal para la medida indirecta de la Tenacidad de fractura, puede confirmarse de manera adicional en base a los valores de K_{IC} y D_M que reencontraron para 6,5 y 12 h de tratamiento, es decir, para la variación registrada en K_{IC} respecto a estas dos condiciones (342 - 302) MPa $(m)^{1/2} = 40$ MPa $(m)^{1/2}$, que estadísticamente indica una variación nula de la Tenacidad de Fractura, se encontró que la dimensión fractal varía de 1,35 a 1,28.

REFERENCIAS

- Balankin A. S. (1997). Physics of fracture and mechanics of self-affine cracks. Eng. Fract. Mech., 57: 135-203.
- Bloom T. A., U. F. Kocks and P. Nash. (1985). "Deformation behavior of Ni-Mo Alloys". Acta metal., [33], pp 265- 272.
- Caldarelli G., C. Castellano & V. Vespignani (1994). Fractal and topological properties of directed fractures. Phys. Rev. E., 49:2673-2679.
- Carpinteri A. (1994). Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties. Mech. Mater., 18: 89-101.
- Cherepanov G. P., A. S. Balankin & V.S. Ivanova (1995). Fractal fracture mechanics. Eng. Fract. Mech., 51: 997-1033.

- Cherepanov G. P., A. S. Balankin & V.S. Ivanova (1997). *Fractals and Fracture. A topical encyclopedia of current knowledge dedicated to Alan Arnold Griffith*, G. P. Cherepanov Ed., Krieger, Melbourne, p. 104.
- Fahmy Y., J. C. Russ & C. C. Kotch. (1991). Application of fractal geometry measurements to the evaluation of fracture toughness of brittle intermetallics. *J. Mater. Res.*, 6: 1856-1861.
- Hart E. W. (1967). A Theory for Flow of polycrystals. *Acta metal.* [15], pp. 1545-1549.
- Hart E. W. (1970). A Phenomenological Theory for plastic deformation of polycrystalline metals. *Acta metal.*, [18], pp. 599-610.
- Hilders O. A. (1992). Fracture paths profilometric analysis, fracture toughness and mechanical properties in sensitized 304 stainless steel. *Applications of stainless steel 92*, Vol. 2, Pub. Fuori Commercio Roma, p. 357.
- Hilders O. A., N. Peza, & O.A. Roa (1996) A model to predict the fractal dimension of fractured surfaces of 7075 aluminium alloys based on Koch's fractal curve and mechanical properties. *Mater. Sci. Forum*, 217-222: 1485- 1490.
- Hilders O. A., Peza N.D., Ramos M., Sáenz L., Berrio L., Caballero R. A. , Quintero A. (2002). The fractal dimension-dependence of crack size tolerance index of 7000 series aluminium alloys. *Mater. Sci. Fórum*. Vols. 396-402:1411-1416.
- Hilders O., Ramos M., Peza N.D. Sáenz L. (2006). Fractal Geometry of fracture surfaces of a duplex stainless steel. *J. Mater Sci.* 41: 5739-574.
- Huang Z. H., J. F. Tian and Z. G. Wang. (1990). *Scripta Metall. Mater.* 24, p. 967.
- Jhonson C. and D. J. Lloyd (2000). "Property anisotropy in magnesium containing aluminum alloys". *Mater sci. forum* [331-337], pp. 715-726
- Izotov A. D., a. S. Balanquin & V. D. Lazarev. (1993). Synergetics and fractal thermomechanics of inorganic materials, II: fractal geometry of fracture in solids. *Inorg. Mater.* 29:883-893.
- Juang X. G., W. Y. Chu & J.M. Xiao. (1995). Fractal analysis of orientation effect on KIC and KISEC. *Eng. Fract. Mech.*, 51: 805-808.
- Kocks U.F. (1975). *Constitutive Equations of plasticity*. A. S. Argon Ed., MIT press, p. 81.
- Mandelbrot B. B., D. E. Passoja & A. J. Paullay. (1984). Fractal character of fracture surfaces in metals. *Nature*, 308: 721-722.
- Meakin P. (1991). Models for materials failure and deformation. *Science*, 252: 226-234.
- Mitchell M. W. and D. A. Bonell (1990). "Quantitative analysis of fractal surfaces by scanning tunneling microscopy". *J. Mater. Res.*, [5], pp. 2244-2254.
- Nyström M., Karlsson B. Wasén J. (1990). In: Nordberg H. Fernheden K. (eds) *Nordic symposium on mechanical properties of stainless steels*, Sigtuna, Sweden, October, Avesta Research Foundation, Stockholm, p 70.
- Ramos M. (2004). *Dinámica fractal de la formación de superficies de fractura en un acero dúplex*. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela
- Ray K. K. & G. Mandal (1992). Study of correlation between fractal dimension and impact energy in a high strength low alloy steel. *Acta Metall. Mater.*, 40; 463-469.
- Sáenz Laura (2001). *Evaluación del comportamiento mecánico de un acero inoxidable dúplex sometido a un tratamiento de envejecimiento*. Trabajo de ascenso presentado ante la Universidad de Carabobo.
- Sáenz L., L. Plaza, A. Ocando, L. Grippi (2007). Estudio de la fragilización del acero inoxidable dúplex SAF 2207 envejecido. *Revista Ingeniería UC* Vol. 14, No. 3, pp. 68-76.
- Sáenz, L. Oswaldo A. Hilders, R. Hergueta, R. Zabala (2007). Estudio de un acero inoxidable duplex SAF 2507 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 850 °c por tiempos entre 1 hora y 48 horas. *Revista Fac. Ing. UCV*. Vol. 22, No. 3, pp.37-46.
- Sáenz Laura (2009). *Naturaleza Fractal de la Deformación Plástica en un acero inoxidable duplex envejecido*. Tesis Doctoral presentado ante la Universidad de Carabobo, Valencia. Venezuela.
- Simmons, J. W. (1995). Mechanical Properties of isothermally aged high- nitrogen stainless steel. *Metall. Mater. Trans.*, [26A], pp. 2579-2595.
- Sowerby R. and B. K. Sareen. (1978). Formability and fracture of some higher strength aluminium alloys. In; *Formability topics metallics materials ASTM STP 647*, B.A. Niemeier, A. K. Schmieder and J. R. New by (Eds.) ASTM Philadelphia, pp. 49-64.

Stach S, Roskosz S, Cybo J, Cwajana J. (2003) Mater Charact 51:87.

Xie H., Sanderson DJ (1995). Eng. Fract. Mech 50: 529.

Síntesis Curricular

Laura Saenz Palencia

Ingeniero Metalúrgico (1979, UCV), Magister Scientiarum en Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales (1992, UCV) y Doctora en Ingeniería (2009, UC). Fundadora y Ex-directora, e Investigadora Activa del Centro de Investigaciones en Mecánica, CIMEC (2005 - actual). Premiada CONADES, PPI Nivel II, PEI nivel Investigador A. Miembro de la Red Nacional de Nanotecnología, Directora General de Postgrado UC (2010 - actual), Directora de Postgrado de la Facultad de Ingeniería UC (2003--2009), Directora de la Escuela de Ingeniería Mecánica UC (2000-2003).