

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



PROPAGACION DE GRIETAS AUTOAFINES
EN UNA ALEACION DE ALUMINIO: CASO
BIDIMENSIONAL

T E S I S

QUE PRESENTA:

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES

XAVIER ENRIQUE GUERRERO DIB

CIUDAD UNIVERSITARIA MARZO DEL AÑO 2001

TM
Z5853
.M2
FIME
2001
G8

PROPAGACION DE GRIBTAS AUTTOAFINES EN UNA
ALLEACION DE ALUMINIO: CASO BIDIMENSIONAL

X. GUERRERO

2000



1020145447

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**PROPAGACIÓN DE GRIETAS AUTOAFINES
EN UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO: CASO
BIDIMENSIONAL**

TESIS

QUE PRESENTA

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES

XAVIER ENRIQUE GUERRERO DIB

CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO DEL AÑO 2001

0150-04660

TM
25853
•Hz
FINE
2001
G₈

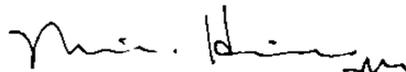


FONDO
TESIS

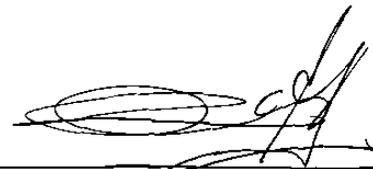
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

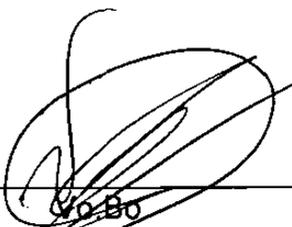
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **"Propagación de grietas autoafines en una aleación de aluminio: caso bidimensional"** realizada por el **Ing. Xavier Enrique Guerrero Dib** sea aceptada como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis


Asesor
Dr. Moisés Hinojosa Rivera


Revisor
Dr. Juan Antonio Aguilar Garib


Revisor
Dr. José Luis Cavazos García


Vo.Bo
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Marzo del año 2001.

DEDICATORIAS

- Antes que nada a Dios Nuestro Señor, por haberme dado la oportunidad de vivir y de alcanzar todo lo que he logrado hasta el día de hoy.
- A Nuestra Buena Madre, la Santísima Virgen María.
- A San Marcelino Champagnat por ser forjador de buenos cristianos y virtuosos ciudadanos.
- A mi adorada Familia, mis entrañables padres, Xavier Enrique y Maria Gabriela.
- A mis adorados hermanos, con los que he convivido a lo largo de toda mi vida, Jean Gabriel y Margoth, Poncho y Mari José.
- A mis adorados sobrinitos José María (Chemita) y Margotita (Gotita).
- A mis adorados abuelitos Alfonso (Poncho), María Luisa (Nena), José (Pepe)(†) y María del Carmen (Melita).
- A todos mis tíos, tías, primos y primas a quienes tengo siempre presentes.
- A todos mis amigos y amigas que siempre me han acompañado, en las buenas y en las malas. En especial a Marilú Rubio por siempre ser un ejemplo de entereza y de templanza.

AGRADECIMIENTOS

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa del PAICYT de la Universidad Autónoma de Nuevo León por su apoyo financiero brindado a lo largo de mis estudios de maestría y en esta investigación final.
- Al DIMAT de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL por todo el apoyo brindado durante y a lo largo de toda mi maestría y por supuesto en la elaboración de esta tesis.
- A mi amigo y asesor el Dr. Moisés Hinojosa Rivera por haberme motivado a cursar estos estudios de postgrado y por ser a lo largo de los mismos mi consejero.
- A la empresa Grupo Nacional de Cobre, S.A. de C.V. (NACOBRE) y ALMEXA Aluminio, S.A. de C.V. Así como también a los ingenieros Guillermo Nuñez Burgos, Carlos Granados y Enrique Díaz de ALMEXA, además del analista Luis Rey Negrete. De NACOBRE a los ingenieros Roberto Ramírez y Víctor Gutierrez, además del analista Rodolfo Juárez.
- A toda la gente de Reynolds Metals, por toda su colaboración, especialmente al Ing. Rodolfo González Navar.
- A todos mis maestros del Doctorado, Ubaldo Ortiz, Rafael Colás, Juan Antonio Aguilar Garib, Alberto Pérez, Tushar Kantí Das, Alán Castillo, Patricia Rodríguez, Martha Guerrero, Carlos Guerrero y Virgilio González por todos sus conocimientos y apoyos brindados a lo largo de mis estudios.
- A todos mis compañeros y amigos, Prax, Martín, Jorge A., Julián, Rodrigo, Fernando, Luis Enrique, Paco, Chuy Garza, Edgar Reyes, Edgar Iván, Zarel y Mayra, gracias por sus valiosísimos consejos.
- A todos los que me han ayudado a terminar estos estudios que son de gran importancia para mí.

PRÓLOGO

¿Cómo y por qué se rompen las cosas? Pareciera una cuestión trivial, pero renombrados científicos con décadas de experiencia aún se muestran más que perplejos al estudiar el fenómeno de la ruptura de los materiales. ¿Por qué algunas grietas son inocuas, como tumores “benignos” mientras que otras son causa de catástrofes? ¿Qué diferencia una minúscula grieta en un componente mecánico, de una falla geológica como la célebre de San Andrés? Bien mirado, hay muchas similitudes y las diferencias más bien se deben a factores de escala. Sí, escalamiento. Fenómenos de escalamiento en la ruptura, en la generación de superficies de fractura por el avance caprichoso y tortuoso de una grieta. ¿Qué es lo que gobierna el impulso y la trayectoria que sigue una grieta? ¿A qué escala queremos analizar el fenómeno? ¿En qué material? ¿Importa el material? ¿Cuánto?

“Fractales hasta en la sopa” dijo un ilustre personaje, traduciendo libremente el título de un libro posado sobre mi escritorio. Pues sí, por lo visto y por lo escuchado, están en todas partes. Lo que parecía una artística curiosidad con extravagantes bases matemáticas resulta que tiene utilidad para describir la fractura de ... la materia. No en balde fractura y fractales comparten la raíz *fractus*. Precisamente la primera aplicación de relevancia práctica de la geometría fractal fue en la descripción de las superficies de fractura. ¿Qué genera las superficies de fractura? El avance de grietas a través del medio, del material. El carácter fractal, o más bien, autoafín, queda determinado por la azarosa trayectoria de las grietas. *Alors!* ¡escudriñad las trayectorias de las grietas!

M. Hinojosa

San Nicolás de los Garza, N. L. 1^o de marzo del año 2001.

Í N D I C E

Pág.

Dedicatorias.....	
Agradecimientos.....	
Prólogo.....	
Índice General.....	
Resumen	1
Introducción.....	2
Capítulo 1 Conceptos Generales del Aluminio	
1.1 Propiedades Generales del Aluminio.....	4
1.2 Propiedades Mecánicas.....	8
1.2.1 Esfuerzo de prueba y resistencia a la tensión.....	9
1.2.2 Normas del aluminio y sus aleaciones.....	11
1.3 Tecnologías para la producción de Aluminio.....	12
1.3.1 Proceso de Laminación en Frío para láminas de Aluminio.....	12
Capítulo 2 Carácter Autoafín de las Grietas	
2.1 Introducción.....	16
2.2 Fractografía.....	16
2.2.1 Tipos de fractura.....	18
2.2.2 Tipos de propagación de grietas.....	20
2.3 Mecánica de la fractura.....	22
2.3.1 Introducción.....	22
2.3.2 Modos de carga.....	24
2.3.3 El modelo de Inglis y el criterio de Griffith.....	27
2.3.4 Campo de esfuerzo, modo I, 2 dimensiones.....	29
2.4 Carácter autoafín de las grietas y sus trayectorias.....	31
2.4.1 Autoafinidad.....	31

2.4.2 Método de ventanas de ancho variable.....	35
2.4.3 Modelos de Línea.....	37
2.4.4 Modelos bidimensionales.....	40
2.4.5 Estado del arte.....	42
Capítulo 3 Técnicas Experimentales y de Análisis	
3.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	44
3.2 Microscopía Óptica	49
3.3 Estereoscopia.....	55
3.4 Análisis de imágenes.....	56
3.5 Microscopía de Fuerza Atómica (MFA).....	57
Capítulo 4 Experimentación	
4.1 Introducción.....	61
4.2 Material	62
4.2.1 Caracterización metalográfica.....	63
4.3 Generación de las trayectorias de las grietas.....	66
4.4 Registro de las trayectorias de las grietas.....	69
4.5 Extracción de las trayectorias de las grietas y análisis de imágenes.....	72
4.6 Análisis de autoafinidad de las trayectorias de grietas.	74
Capítulo 5 Resultados y Discusión	
5.1 Introducción.....	76
5.2 Caracterización microestructural.....	77
5.3 Ensayos mecánicos de tensión modo I.....	80
5.4 Registro y extracción de las trayectorias de las grietas	83
5.4.1 Trayectorias registradas con el digitalizador convencional de documentos.....	83
5.4.2 Trayectorias registradas con el estereoscopio.....	84
5.4.3 Trayectorias registradas con el microscopio óptico...	85

5.4.4 Trayectorias de grieta registradas en el microscopio electrónico de barrido (MEB).....	86
5.5 Análisis de autoafinidad.....	87
5.6 Discusión	89
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones	
6.1 Conclusiones Generales.....	94
6.2 Recomendaciones para trabajos posteriores.....	96
Referencias bibliográficas.....	97
Apéndice A	
Prueba de Hipótesis para la comparación de la diferencia entre las resistencias a la tensión modo I, de las muestras cortadas en el sentido paralelo y perpendicular a la dirección de laminación.....	101
Apéndice B	
Figuras con las trayectorias de los perfiles de las grietas.....	103
Apéndice C	
Formaciones dendríticas en foil de aluminio.....	106
Apéndice D	
Publicación por presentar en el 10 th International Congress of Fracture, Reference Number: ICF0591.....	108
<i>“2D and 3D self-affine crack propagation on aluminium alloys”</i>	
Índice de Tablas.....	115
Índice de Figuras	116
Resumen Autobiográfico.....	122

R E S U M E N

En la presente investigación se estudia el carácter autoafín del fenómeno de propagación de grietas en la aleación de aluminio 1145, caso bidimensional; para esto se aplicó la técnica de topometría estadística autoafín conocida como “Ventanas de Ancho Variable ($Z_{máx}$)” para determinar los exponentes de rugosidad (Hurst) y la longitud de correlación. También se analizó el papel o efecto de la anisotropía microestructural con respecto a los parámetros de autoafinidad antes citados. Por último, los resultados se interpretaron a la luz de recientes modelos fenomenológicos para casos bidimensionales de propagación de grietas autoafines. Nuestros resultados concuerdan con las predicciones de modelos recientes y teorías reportadas en la literatura respecto al valor del exponente de Hurst encontrado con valor de ~ 0.67 . Estos resultados sugieren además que la longitud de correlación es sensible a la anisotropía microestructural.

I N T R O D U C C I Ó N

Benoit Mandelbrot, de origen polaco, en 1984 estudió las superficies de fractura de aceros Maraging, determinando su dimensión fractal, sugiriendo relaciones entre la tenacidad y la dimensión fractal.

En el Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales, de la FIME-UANL, se han estudiado superficies de fractura autoafines en metales, cerámicos y polímeros.

Las superficies de fractura se generan por el avance de los frentes de grieta, fenómeno sujeto a interacciones aleatorias, por lo que se puede afirmar que las trayectorias de las grietas son objetos autoafines.

En estudios recientes se documenta que el comportamiento de las superficies de fractura se puede describir como autoafín. Por ejemplo en el caso de la aleación de aluminio A319 se logró demostrar que el coeficiente de rugosidad o también llamado de Hurst tiene un valor aproximado a 0.8. En el caso de los polímeros también se han realizado estudios similares demostrando un comportamiento autoafín.

Para hablar de autosimilitud, se menciona que los objetos que presentan esta característica, tienen un escalamiento igual en todas direcciones, sin embargo los objetos en la naturaleza en general siguen un escalamiento desigual en diferentes direcciones, tales objetos se denominan autoafines o bien objetos

que presentan autosimilitud estadística (autoafinidad). La noción de autoafinidad fue aplicada por primera vez al movimiento fraccional Browniano (mfB), el cual es una particularización del movimiento Browniano descubierto por Robert Brown en 1828.

Con el objetivo de estudiar el carácter autoafín en la propagación de grietas, en este trabajo se seleccionó a la aleación de aluminio 1145, que se presenta en forma de láminas delgadas de aluminio, también conocidas como "foils". La elección se hizo debido a que el material en este tipo de presentación, está sometida a procesos que implican altas deformaciones mecánicas y esto favorece el análisis de la relación que guarda la anisotropía del material con el fenómeno de propagación de grietas.

Se utilizó la técnica de topometría estadística conocida como "Ventanas de Ancho Variable ($Z_{máx}$)" para obtener el exponente de Hurst y la longitud de correlación del material antes citado. Para lograr esto, primero se recurrió a varios procesos de análisis de imágenes; desde la digitalización convencional por medio de un escaner hasta el análisis de los perfiles de grieta por medio de microscopía electrónica de barrido. Posteriormente los datos obtenidos fueron procesados en un programa matemático que permite obtener los parámetros autoafines, obteniendo un exponente de rugosidad o de Hurst de 0.67 comprobando así la hipótesis que se planteó; la cual afirma que las trayectorias que siguen las grietas en las láminas delgadas de aluminio, muestran un carácter autoafín para el caso bidimensional.