

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**PARAMETROS AUTOAFINES EN LA PROPAGACION  
DE GRIETAS EN PAPEL.**

**POR:**

**MARCO ANTONIO CASTILLO VELAZQUEZ**

**TESIS**

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

**CD. UNIVERSITARIA**

**OCTUBRE DE 2003**



OCT

2003 PAPIAMENTOS AUTOAFINES EN LA PROPAAGACION M. A. C. V.

DE GRJETAS EN PAPER

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2003  
.C3



1020149257

1020149257

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



PARAMETROS AUTOAFINES EN LA PROPAGACION  
DE GRIETAS EN PAPEL

POR:

MARCO ANTONIO CASTILLO VELAZQUEZ

TESIS

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

CD. UNIVERSITARIA

OCTUBRE DE 2003

980838

TM  
Z5853  
.M2  
FINE  
2003  
.C3

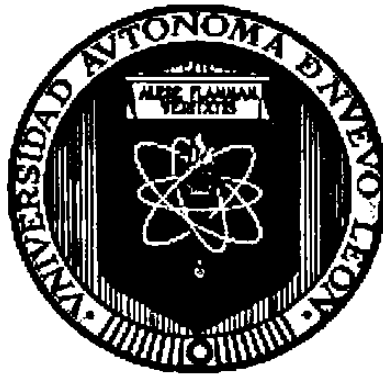


FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**PARÁMETROS AUTOAFINES EN LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS  
EN PAPEL**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**PRESENTA**

**MARCO ANTONIO CASTILLO VELÁZQUEZ**

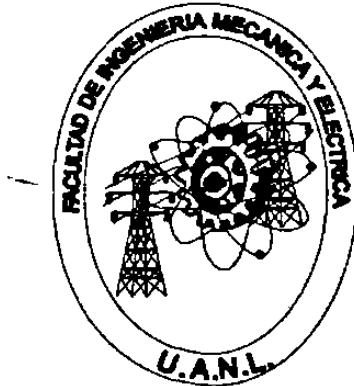
**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**OCTUBRE DE 2003**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**PARÁMETROS AUTOAFINES EN LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS  
EN PAPEL**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**PRESENTA**

**MARCO ANTONIO CASTILLO VELÁZQUEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**OCTUBRE DE 2003**


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 "Parámetros autoafines en la propagación de grietas en papel", realizada por el alumno Marco Antonio Castillo Velázquez, matrícula 0899158, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

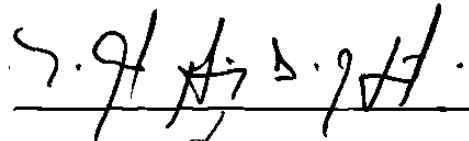
El Comité de Tesis



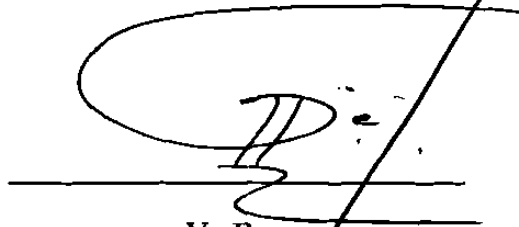
Asesor  
Dr. Moisés Hinojosa Rivera



Coasesor  
Dr. Virgilio A. González González



Coasesor  
Dra. Ma. Idalia Gómez de la Fuente



Vo.Bo.  
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N. L., octubre de 2003



## **DEDICATORIAS**

A Dios por ser el guía en el camino de nuestra vida ya que siempre tengo mi confianza depositada en ti y nunca me has fallado, te dedico esta meta más que he alcanzado con mucho amor y cariño.

A mi madre Juany, por su gran apoyo durante todos mis estudios, por su gran amor hacia mí y porque es una parte fundamental en mi vida.

A mi padre Marcos porque siempre me brindo apoyo económico y por sus valiosos consejos, en esta escuela de la vida.

A mis hermanos Osvaldo y Mayra así como a mi amigo Jesús ya que siempre me han apoyado en cada etapa de mis estudios y animarme para continuar estudiando.

A mi novia Adela por todo su cariño, comprensión y paciencia, ya que es una parte importante en mi vida, gracias por siempre decirme que siga adelante y que nunca me rinda.

## **AGRADECIMIENTOS**

**Agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en mis estudios de postgrado. Así mismo agradezco los apoyos económicos brindados por el CONACYT para realizar la presente investigación.**

**A la empresa COPAMEX por las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación, principalmente al Ing. Agustín López y al Ing. Eduardo Duarte.**

**Al personal del departamento de madera, celulosa y papel de la Universidad de Guadalajara, principalmente al Dr. José Turrado, al M.C. Salvador Pérez Ramos, a la M.C. Alma Rosa Saucedo y al M.C. Raúl Rodríguez Anda.**

**Al Dr. Virgilio González por el entusiasmo, paciencia y apoyo recibido durante la realización de este trabajo.**

**Al Dr. Moisés Hinojosa, por sus valiosos comentarios y por la atención prestada a este trabajo.**

**Al Dra. Ma. Idalia Gómez de la Fuente por la revisión de este trabajo.**

**A los Profesores del DIMAT: Martha, Carlos, Ubaldo, Alan, Alberto, Rafael, Juan Antonio, Virgilio y Moisés por haber participado indirectamente en la realización de esta investigación.**

**A todos mis compañeros del DIMAT: Adela, Eduardo, Luis, Moya, Jorge, Efrén, Roberto, Leonardo, Jonathan, Ezequiel, Nieto, Nelson, Salvador, Álvaro, Julián, Rodrigo, Marco, Manuel, Alejandro, Francisco y J. Aldaco.**

**A la Dra. Dora Irma Martínez Delgado por su hospitalidad en Guadalajara.**

# Índice

**Dedicatorias**

**Agradecimientos**

**Resumen**

i

**Capítulo**

**Página**

<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Mecánica de la fractura y fractografía</b>	<b>4</b>
2.1	Introducción.	4
2.2	Mecánica de la fractura	5
2.2.1	Antecedentes históricos.	5
2.2.2	Definición.	6
2.2.3	Concentración de esfuerzos.	7
2.2.4	Factor de concentración de esfuerzos.	9
2.2.5	El criterio de Griffith.	10
2.2.6	El factor de intensidad de esfuerzos.	13
2.2.7	Modos de desplazamiento de las superficies de una grieta.	14
2.2.8	Mecánica de fractura lineal elástica.	15
2.2.9	Tenacidad a la fractura.	17
2.2.10	Hipótesis de la MFLE.	17
2.2.11	Campo de esfuerzos en la vecindad de la punta de la grieta (materiales isotrópicos).	18



2.3	Fractografía	19
2.3.1	Definición.	19
2.3.2	Tipos de fractura.	19
2.3.2.1	Fractura frágil.	20
2.3.2.2	Fractura dúctil.	21
2.3.3	Mecanismos básicos de crecimiento de grieta	21
2.3.3.1	Clivaje.	22
2.3.3.2	Cuasi clivaje.	23
2.3.3.3	Coalescencia de microcavidades.	23
2.3.3.4	Fractura intergranular.	24
2.4	Comentario	25
<b>3</b>	<b>Geometría fractal y estado del arte.</b>	<b>27</b>
3.1	Introducción.	27
3.2	Fractales autosimilares y autoafines.	28
3.2.1	Fractales autosimilares.	28
3.2.2	La dimensión fraccional o de Hausdorff-Besicovitch	30
3.2.3	Fractales autoafines.	33
3.3	Métodos para la determinación de la dimensión fractal o el exponente de Hurst.	34
3.3.1	Introducción.	34
3.3.2	Método de conteo de cajas.	35
3.3.3	Método de ancho de banda variable.	35
3.4	Estado del arte.	37
3.4.1	Antecedentes.	37
3.4.2	Modelo de líneas.	44
3.4.3	Modelo de fusibles aleatorios.	46

<b>4</b>	<b>El papel.</b>	<b>48</b>
4.1	Introducción.	48
4.2	Historia del papel.	49
4.3	Materias primas.	50
4.4	Cargas minerales y productos químicos.	55
4.5	Maquinaria.	56
4.6	Preparación de pasta y refinación.	59
4.7	Proceso de fabricación.	60
4.8	Propiedades del papel.	63
	4.8.1 Introducción.	63
	4.8.2 Características estructurales del papel.	64
	4.8.3 Lado tela y lado fieltro del papel.	65
	4.8.4 Sentidos del papel.	68
4.9	Formación	69
	4.9.1 Descripción.	69
	4.9.2 Determinación.	71
4.10	Pruebas de laboratorio para el papel.	72
	4.10.1 Introducción.	72
	4.10.2 Acondicionamiento de las muestras.	73
	4.10.3 Pruebas físicas.	74
<b>5</b>	<b>Experimentación.</b>	<b>76</b>
5.1	Introducción.	76
5.2	Caracterización del papel.	77
	5.2.1 Determinación de la "rugosidad".	77
	5.2.2 Determinación de la permeabilidad al aire.	79
	5.2.3 Determinación de las propiedades de tensión.	81

5.2.4	Determinación de la prueba de resistencia al rasgado.(método del tipo Elmendorf)	82
5.2.5	Determinación del espesor del papel.	83
5.2.6	Determinación del gramaje del papel.	85
5.2.7	Determinación del contenido de cenizas en el papel.	86
5.2.8	Determinación del porcentaje de humedad en el papel.	87
5.2.9	Determinación de la dirección máquina en el papel.	88
5.2.10	Determinación de la longitud de fibras por medio del clasificador Bauer Mc Net.	89
5.2.11	Microscopía óptica.	90
5.2.12	Microscopía electrónica de barrido.	91
5.3	Líneas de ruptura.	92
5.4	Análisis de autoafinidad.	93
<b>6</b>	<b>Resultados y discusión.</b>	<b>95</b>
6.1	Introducción.	95
6.2	Rugosidad.	96
6.3	Permeabilidad al aire.	97
6.4	Propiedades de tensión.	98
6.5	Resistencia al rasgado	99
6.6	Espesor.	100
6.7	Gramaje.	101
6.8	Densidad.	101
6.9	Cenizas.	102
6.10	Porcentaje de humedad.	102



6.11	Dirección máquina.	103
6.12	Longitud de fibras.	103
6.13	Imágenes de microscopía óptica.	105
6.14	Imágenes de microscopía electrónica de barrido.	107
6.15	Análisis autoafín de las líneas de ruptura.	109
<b>7</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.</b>	<b>113</b>
7.1	Conclusiones.	113
7.2	Recomendaciones.	115
	<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>116</b>
	<b>Apéndice A</b>	<b>121</b>
	<b>Apéndice B</b>	<b>127</b>
	<b>Apéndice C</b>	<b>132</b>
	<b>Índice de figuras</b>	<b>136</b>
	<b>Índice de tablas</b>	<b>141</b>

---

## RESUMEN

Si bien la mecánica de la fractura bidimensional es el caso más estudiado de propagación de grietas, a la fecha no existen modelos que expliquen o predigan con fidelidad el carácter autoafín, ni los valores de los parámetros autoafines de las "superficies" de fractura bidimensional. Más aún, el carácter "universal" que se discute en la actualidad plantea el problema de determinar el efecto de las heterogeneidades microestructurales a distintas escalas sobre el fenómeno de propagación de grieta.

Por tal motivo se plantea la siguiente hipótesis: el carácter autoafín del fenómeno de propagación de grietas en medios bidimensionales es el resultado de la interacción colectiva de las heterogeneidades estructurales de la materia con el frente de grieta y sus campos de esfuerzos. Existe por lo tanto, un efecto de la microestructura que puede elucidarse mediante el análisis multiescalar tanto de la microestructura como de las trayectorias de las grietas en estos medios.

El objetivo fundamental de este trabajo es determinar los parámetros autoafines asociados a las líneas de ruptura en dos tipos de papel considerados como medio bidimensional, mediante el análisis autoafín de las trayectorias de grietas propagadas en tensión. Se busca también explorar las relaciones entre la estructura del papel en distintas escalas de observación con los parámetros autoafines asociados al fenómeno de propagación, incluyendo en el análisis el posible efecto de la anisotropía.

En los capítulos 2 y 3 se presenta un marco teórico con el cual se respalda la hipótesis y el objetivo antes mencionados, en el capítulo 2 se presenta una base sobre la mecánica de fractura y la fractografía y en el 3 se presenta la geometría de fractales y el estado del arte.

En el capítulo 4 se describe la historia del papel y el proceso de fabricación (desde las materias primas, maquinaria, preparación de pasta hasta la formación de éste), se incluyen también las pruebas comúnmente realizadas al papel y propiedades como: características estructurales, lado tela y lado fieltro y sentidos del papel.

El desarrollo de la caracterización y análisis de las fracturas, presentado en el capítulo 5, se llevó a cabo en dos tipos de papel, el papel Couché y el papel BPL21 (que es un papel fabricado en la compañía Copamex de 21 gr/m<sup>2</sup> y se emplea, laminado con aluminio en 3 µm de espesor, para el empaque interior de cigarrillos).

El procedimiento que se siguió fue la caracterización de los dos tipos diferentes de papel, la cual consistió de las siguientes pruebas: la determinación de la "rugosidad", determinación de la permeabilidad al aire, porcentaje de humedad, longitud de las fibras por el método de Bauer-Mc Nett, cenizas, prueba de tensión utilizando un aparato de elongación de razón constante, gramaje, rasgado, espesor y la determinación de la dirección máquina.

Posteriormente se generaron los perfiles mediante ruptura, estos se realizaron en pruebas de tensión. Una vez obtenidas las líneas de ruptura se digitalizaron por medio de un escáner convencional. Finalmente, el análisis de éstas y la discusión de los resultados, así como las conclusiones se presentan en los capítulos 6 y 7.