



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

"ANÁLISIS DE LA VECINDAD DE LA RUTA DE PROPAGACIÓN DE FRACTURA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

Ing. Alejandro Casquera Domínguez

DIRECTOR: Dr. Israel Saucedo Meza

Mexicali B.C.

Enero - 2010

**“ ANÁLISIS DE LA VECINDAD DE LA RUTA DE PROPAGACIÓN
DE FRACTURA ”**

Índice de Figuras.....	1
Índice de tablas	3
Simbología	4
Agradecimientos	7
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Objetivo.....	10
Hipótesis	11
Metas	12
Justificación	13
Introducción	14
Referencias	15

CAPÍTULO I

DESARROLLO HISTÓRICO DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

1.1	Antecedentes Históricos.....	17
1.2	Fundamentos de la Mecánica de Fractura.....	18
1.3	Contribuciones importantes a la Mecánica de Fractura.....	28
1.4	Evaluación de la propagación direccional de grietas en campos de esfuerzos biaxiales	29
1.5	Referencias.....	33

CAPÍTULO II

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

2.1	Campo de aplicación.....	40
2.2	Mecánica de sólidos.....	42
2.3	Tipos de falla.....	45
2.4	Consideraciones de la mecánica de fractura para el diseño.....	47
2.5	Consecuencia de las grietas	51
2.6	Introducción a la Mecánica de fractura.....	52
2.6.1	Modos de fractura	55
2.7	Teoría de falla de Griffith	56
2.8	Tasa de Liberación de energía	58
2.9	Factor de Intensidad de Esfuerzos	59
2.10	Plasticidad en la punta de la grieta.....	63

2.11	Parámetros de fractura en régimen elastoplástico	65
2.11.1	La integral J.....	65
2.11.2	Uso de J en análisis de Fractura.....	69
2.11.3	Limitaciones de J	71
2.11.4	Desplazamiento de apertura de grieta (COD).....	72
2.12	Relación entre los parámetros G, K y J.....	74
2.13	Referencias	75

CAPÍTULO III

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE LA TRAYECTORIA DE PROPAGACIÓN DE GRIETAS.

3.1	Técnica experimental	79
3.2	Galgas Extensiométricas	81
3.2.1	Principio de funcionamiento de las galgas.....	82
3.3	Procedimiento para la instalación de galgas extensiométricas	85
3.3.1	Preparación de superficie	85
3.3.2	Adhesión de las galgas.....	88
3.4	Procedimiento para soldar.....	93
3.4.1	Herramienta y técnica para soldar.....	93
3.4.2	Soldado de galgas	94
3.4.3	Barniz de recubrimiento.....	95
3.5	Consideraciones Experimentales	95
3.6	Análisis numérico de propagación de grietas	98
3.6.1	Descripción del trabajo numérico	99
3.6.2	Planteamiento de la metodología para análisis numérico.....	100
3.6.3	Desarrollo del análisis experimental.....	101
3.6.4	Análisis numérico de los especímenes en cargas de apertura.....	103
3.7	Conclusiones	110
3.8	Recomendaciones para trabajo futuro.....	111
3.9	Referencias.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1.1	Tipos de modos de carga.....	26
2.1	Escala de aplicación de la Mecánica de fractura y fractografía.....	41
2.2	Componentes del esfuerzo	44
2.3	Matriz de esfuerzos	45
2.4	Clasificación de la fractura, desde el punto de vista de Ingeniería	47
2.5	Comportamiento típico esfuerzo-deformación de un material en tensión uniaxial	48
2.6	Variables de diseño por mecánica del medio continuo.....	50
2.7	Definición de los niveles de esfuerzo en el diseño	50
2.8	Categorías de fractura	54
2.9	Esquema de los modos de carga de fractura	55
2.10	Placa de espesor t con una grieta en su centro de longitud $2a$	56
2.11	Estado tensional en las proximidades del fondo de fisura	61
2.12	Representación gráfica de la zona plástica en la punta de la grieta en condiciones de tensión y deformación plana	64
2.13	Contorno alrededor de la punta de la grieta	66
2.14	Comportamiento elastoplástico. Representación esquemática de la Integral J	67
2.15	Comportamiento elastoplástico. Representación de la energía debajo de la curva P-d y separación en un componente elástico y una componente plástica	68
2.16	Etapas de la fractura dúctil relacionadas con J.	70
2.17	Curva típica de resistencia a la fractura (J-R)	70
2.18	Definición del parámetro COD	72
3.1	Marco de prueba experimental.....	79
3.2	Arreglo de pernos en cada bloque.....	80
3.3	Arreglo de galgas extensiométricas	81
3.4	Relación de esfuerzo-deformación	83
3.5	Esquema de puente Wheatstone.....	85
3.6	Desengrasante CSM-2	85
3.7	Papel de lija SCP-3 400 GRIT	86
3.8	Gasas	87
3.9	M-PREP Conditioner A	87
3.10	Tweezers	87
3.11	M-PREP Neutralizer 5A	88
3.12	Galga y terminal adherida con cinta	88
3.13	Galga y terminal alineadas en el espécimen	89
3.14	Levantar la cinta en un ángulo agudo	89
3.15	Posicionar la cinta	90

3.16 Catalyst-C	90
3.17 Adhesivo	90
3.18 Aplicación del adhesivo	91
3.19 Adhesión	91
3.20 Aplicación de presión	92
3.21 Retirar cinta adhesiva	92
3.22 Solvente	93
3.23 Formas de la punta del cautín	93
3.24 Maneras para aplicar la soldadura	93
3.25 Forma correcta del montículo de soldadura	94
3.26 Colocación del cautín y la soldadura	94
3.27 M-COAT A Air drying	95
3.28 Análisis de la influencia de las condiciones locales en la propagación de una grieta	96
3.29 Resultado experimental del espécimen A para una longitud de grieta de 40 mm	97
3.30 Especimen de prueba	99
3.31 Trayectoria de grieta con carga de apertura de 1388 N (Método experimental).....	101
3.32 Trayectoria de grieta con carga de apertura de 1388 N y transversal de 63 N/mm (Método experimental)	102
3.33 Trayectoria de grieta con carga de apertura de 1317 N (Método experimental).....	102
3.34 Trayectoria de grieta con carga de apertura de 1317 N y transversal de 28 N/mm. (Método experimental)	102
3.35 Condiciones de frontera en el espécimen de prueba	103
3.36 Campo de esfuerzos en una grieta de 20 mm por ANSYS (Análisis Numérico).....	104
3.37 Trayectoria de grieta en un espécimen de 205x100x6mm con carga de apertura (Análisis Numérico)	104
3.38 Trayectorias reales con carga de apertura (Método experimental).....	105
3.39 Trayectoria de grieta con carga de apertura de 1388 N y transversal de 63 N/mm. (Análisis Numérico)	105
3.40 Trayectorias obtenidas con carga de apertura y transversal (Método experimental)	106
3.41 Trayectoria de grieta en un espécimen de 205x100x6mm con carga de apertura (Análisis Numérico)	107
3.42 Trayectoria de grieta con carga de apertura de 786 N (Análisis Numérico).....	107
3.43 Resultados del análisis experimental	108
3.44 Trayectoria de grieta con carga de apertura de 786 N y transversal de 28 N/mm. (Análisis Numérico)	108
3.45 Resultados del análisis experimental con carga de apertura y transversal	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
2.1	Unidades típicas del esfuerzo.....	43
3.1	Componentes del marco de prueba	80
3.2	Resultados experimentales para un espécimen de PMMA 152mm x 102m x 6mm	98

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Definición
σ_f	Esfuerzo de fractura.
E	Modulo de Young.
g	Energía de superficie.
a	Longitud de la grieta.
r	Radio.
∞	Infinito.
K	Factor de Intensidad de Esfuerzos.
G_C	Criterio de tenacidad a la fractura crítica.
MFLE	Mecánica de Fractura Lineal Elástica.
K_I	Factor de Intensidad de Esfuerzos en Modo I.
K_{II}	Factor de Intensidad de Esfuerzos en Modo II.
K_{III}	Factor de Intensidad de Esfuerzos en Modo III.
ASTM	American Society of Testing Materials.
STC	Special Technicians C.
CTOD	Crack Tip Opening Displacement.
J	Integral J.
η	Factor “ η ”.
σ	Esfuerzo.
A	Área.
F	Fuerza.
(+)	Signo Positivo.
(-)	Signo Negativo.
x, y, z	Sistema de coordenadas cartesianas.
dx, dy, dz	Elementos unitarios de Volumen.
σ_{ij}	Componente de un esfuerzo.
i	Dirección perpendicular donde se aplica una componente.
j	Dirección de la componente.
σ_o	Esfuerzo de cedencia.
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Resistencia Máxima.

P	Carga.
EMP	Esfuerzo Máximo Permissible.
K_{IC}	Factor de Intensidad de Esfuerzos Crítico en Modo I.
G_{IC}	Razón de Energía Liberada Crítica en Modo I.
COD_{IC}	Desplazamiento de apertura en la punta de la grieta crítica en modo I.
J_{IC}	Integral de Línea de Ruta independiente Crítica en Modo I.
<i>MFEP</i>	Mecánica de Fractura Elastoplástica.
π	3.1416 (pi).
γ_s	Energía Especifica de Superficie.
σ_c	Tensión de Fractura de Griffith.
<i>G</i>	Tasa de liberación de energía.
<i>R</i>	Fuerza resistente al agrietamiento.
FIE	Factor de Intensidad de Esfuerzos.
ZPF	Zona de Proceso de fractura.
Ψ	Función de Airy.
$\cos \theta$	Coseno de ángulo.
$\sen \theta$	Seno de ángulo.
$f_{ij}(\theta)$	Función conocida de θ .
β	Factor Adimensional.
<i>L</i>	Longitud.
K_{IC}	Factor de intensidad de tensión crítico.
ν	Relación de Poisson.
σ_Y	Límite elástico de un material.
r_p	Zona plastificada.
Γ	Contorno cerrado en un sólido sometido a un esfuerzo.
<i>T</i>	Vector de tensión perpendicular a Γ .
<i>U</i>	Desplazamiento en la dirección x.
W_s	Energía de deformación por unidad de volumen.
∂p	Diferencial de carga.
∂a	Diferencial de la extensión de la grieta.
∂v	Diferencial del desplazamiento.

Δa	Extensión de longitud.
J_{el}	Componente elástica.
C	Flexibilidad.
P_L	Carga límite.
U_T	Energía total debajo de la curva fuerza-desplazamiento.
B	Espesor.
λ	Constante adimensional.
ρ	Resistividad.
ε	Deformación unitaria.
D	Diámetro del hilo.
μ	Coefficiente de Poisson.
GF	Factor de galga.
V	Voltaje.
R	Resistencia Eléctrica.
dR	Diferencial de resistencia eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a la:

Universidad Autónoma de Baja California

Por haberme permitido pertenecer a esta honorable institución y desarrollarme dentro de sus instalaciones donde pude adquirir verdaderos conocimientos.

A mi asesor y director de tesis:

Dr. Israel Saucedo Meza,

Por todo el apoyo y confianza que me brindo para la realización de este trabajo y darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

A mis compañeros y amigos de Maestría: Geovanni, Ana Fu, Saúl, Gloria, Rafael, Guadalupe Bojórquez y Denise, por haber hecho más placentero el estudio y darme sus consejos que han adquirido a lo largo de su experiencia,

De una manera muy especial quiero agradecer a mis padres:

Mariano Casquera Corte

Maria Laura Domínguez Zúñiga

Por apoyarme incondicionalmente y creer en mí siempre, por ser un vivo ejemplo de que con esfuerzo, dedicación y constancia, todo se puede lograr.

A mis hermanos, por estar a mi lado siempre que los necesito.

Por todo esto, ***GRACIAS***.

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla una metodología basada en los conceptos de la Mecánica de Fractura, aplicando el Método del Elemento Finito y utilizando los programas de análisis ANSYS y FRANC2D/L, para determinar el comportamiento de una grieta en un espécimen de PMMA (Polimetil-Metacrilato) compacta, simétrica y de diferentes dimensiones, bajo condiciones de carga de apertura y transversal (carga biaxial). Estos Programas, determinan el campo de esfuerzos en la punta de la grieta, así como los Factores de Intensidad de Esfuerzos, de ésta forma se puede determinar el ángulo de propagación de la grieta, variando las dimensiones del espécimen y la geometría de la grieta; por lo que el objetivo de este trabajo es obtener el comportamiento de una grieta con el efecto de la aplicación de fuerzas externas bajo condiciones de carga en Modo I y Modo II (modo mixto).

Para tal efecto, se hace la revisión del estado del arte de los análisis de fractura aplicados al caso de estructuras que se han desarrollado a través de los años y se establecen los conceptos básicos de la Mecánica de Fractura.

Se describe la metodología utilizada para la evaluación de propagación direccional de una grieta, bajo condiciones de carga biaxial en un espécimen compacto con dimensiones simétricas.

Finalmente, se realiza la validación de la metodología propuesta, comparando los resultados numéricos obtenidos de los programas, contra resultados experimentales.

ABSTRACT

In this piece of work a methodology based in the Fracture Mechanics has been Developer applying the Finite Element Method, used in software ANSYS and FRANC2D/L, to obtain the crack behaviour under biaxial conditions of loading. Hence the software, calculate the stresses on the crack tip and the stress intensity factor to determine the crack propagations angle, this is applied to a specimen of symmetric and compact test, using an acrylic cement PMMA (Polymethyl methacrylate), changing dimensions from the specimen and the crack geometry, owing to the fact that the aim of this work is to predict the behaviour of the crack in this kind of material for the application of loads under conditions of mixed mode (Mode I and Mode II) as the crack angle value.

The study begins with a check up of estate of art of fracture analysis which is applied to the structures where the basic concepts of Fracture Mechanics and Finite Element Methods are present.

We will describe the methodology used for the evaluation of the directional propagation of a crack, under biaxial loading conditions in a compact specimen with symmetry dimensions.

Finally, we perform the validation of the methodology proposed, comparing the numerical results from software programs against the experimental results.

OBJETIVO

Utilizando los conceptos básicos de la Mecánica de Fractura y del Método del Elemento Finito, en conjunto con los programas ANSYS y FRANC2D/L aplicándolos a un caso particular de un componente agrietado. El objetivo es obtener el comportamiento de una grieta con el efecto de la aplicación de fuerzas externas bajo condiciones de modo mixto (Modo I y Modo II), obteniendo el campo de esfuerzos y deformaciones en la zona crítica del componente agrietado, haciendo una evaluación de esta zona, se obtienen los Factores de Intensidad de Esfuerzos y con estos datos se calcula el ángulo de propagación de la grieta.

Además, se puede demostrar que tan confiables son los programas de análisis utilizados en este trabajo, para resolver problemas relacionados con la Mecánica de Fractura aplicando el Método del Elemento, haciendo una comparación de resultados obtenidos numéricamente con resultados experimentales.

HIPÓTESIS

Con la Mecánica de la Fractura y el Método de Elemento Finito se obtendrá el comportamiento de una grieta en un material sometido a condiciones de carga, de manera que se pueden conocer las condiciones bajo las cuales una grieta se propaga y se torne eventualmente inestable.

METAS

- Conocer las bases y aplicaciones de la Mecánica de Fractura.
- Capacitación de los equipos que se utilizarán en el laboratorio.
- Elaboración de los especímenes de prueba experimental.
- Diseño de un marco de prueba experimental para los análisis experimentales.
- Experimentación y propagación de grietas en los especímenes elaborados.
- Planteamiento de la metodología de análisis numérico por el elemento finito, donde se reproducirán los resultados experimentales.
- Evaluación de los resultados experimentales y numéricos preliminares.
- Análisis numérico – experimental con sus respectivas variaciones.
- Evaluación de resultados finales.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente en Ingeniería, es necesario desarrollar diseños y análisis aplicando la Mecánica de Fractura, para generar componentes seguros, ligeros y económicos. Así se evitan daños y accidentes fuertes en las áreas de trabajo y la comunidad. Es importante realizar trabajos de inspección, revisando los componentes estructurales agrietados y de ser necesario, aplicar la metodología de la Mecánica de Fractura, realizando un trabajo completo y una supervisión adecuada, para saber las causas que ocasionaron el agrietamiento de dicha estructura y así poder repararla o reemplazarla, evitando pérdidas materiales, económicas y humanas. Por lo tanto, el trabajo realizado para el estudio de un componente estructural agrietado bajo condiciones de carga específica y con la geometría de la grieta conocida, es de gran importancia ya que con esto, se obtiene el comportamiento de la estructura y pueden evaluarse los parámetros de fractura y así dar solución ha dicho defecto.

INTRODUCCIÓN

Uno de los requerimientos fundamentales de una estructura en ingeniería es que ésta no falle en servicio. El problema de resistencia y fractura de materiales es conocido como uno de los más importantes para el progreso de la ciencia y la tecnología. Las estructuras antiguas que están en pie hoy día, tales como las estructuras de Egipto o los edificios y puentes construidos durante el periodo Renacentista, son ejemplos obvios de diseños exitosos. Sin embargo, dichos diseños fueron conseguidos principalmente a prueba y error, por lo tanto indudablemente mucho más diseños sin éxito resistieron un periodo de vida mucho más corto.

Las teorías de diseño en ingeniería se han desarrollado a menudo como un resultado de aprender de fallas catastróficas. La imagen de una falla catastrófica en ingeniería es de algo (usualmente grande) que falla de manera inesperada y dramática. Como ejemplos, podemos citar la torre Ronan Point cuyos ladrillos fallaron por colapso progresivo, fallas de grandes barcos y recipientes a presión por fractura frágil, estructuras construidas con cascarones metálicos fallando por pandeo, por ejemplo, el Centro de Exhibición de Bucarest bajo carga de nieve, el puente Tacoma Narrows bajo cargas inducidas por el viento, y así sucesivamente.

Un ejemplo más reciente de una catástrofe trágica, que pudo haber sido prevista, fue la explosión del Transbordador Espacial Challenger el 28 de Enero de 1986, el cual explotó debido a que un sello en uno de los propulsores principales no respondió bien al ambiente frío. Los ingenieros de la compañía que fabricaron el propulsor sospecharon del problema potencial con respecto al sello y habían recomendando retrasar el lanzamiento del Challenger, pero no pudieron convencer a los gerentes y oficiales de la NASA. Los resultados trágicos de la decisión del lanzamiento son bien conocidos [1].

Aunque no tenemos estadísticas de eventos catastróficos, es obvio, que hoy en día el problema de fractura es más drástico.

En los últimos años, la Mecánica de Fractura [2] se ha dado a conocer desde sus bases teóricas hasta las aplicaciones en la industria. Esta ciencia tiene como objetivo analizar y determinar el comportamiento mecánico de los elementos estructurales considerando la existencia de defectos en el material del que están constituidos, hasta definir las condiciones o criterios de fractura; la Mecánica de Fractura también es útil para los componentes ya

fabricados e incluso hasta los que fallaron, para proveer los criterios de aceptación o rechazo, frecuencia de inspección y para los límites de operación. En definitiva, sus aplicaciones prácticas redundan en mayor seguridad, economía en la operación, inspección, mantenimiento de estructuras, componentes en servicio y a reducir el problema de fallas inesperadas y catastróficas.

El análisis del comportamiento de una grieta en modo mixto es un problema complejo, se evalúa la estabilidad direccional de una grieta bajo estas condiciones y debido a esto se inicia presentando el capítulo I, que trata sobre el estado del arte de los análisis de fractura, además se mencionan los principales desarrollos que se han presentado durante el paso de los años, desde los inicios en las investigaciones de este campo.

En el capítulo II, se presentan los conceptos básicos de la Mecánica de Fractura, estos, son de importancia cuando se realiza un estudio y análisis de Mecánica de Fractura, ya que su aplicación a un componente agrietado, con geometría conocida y longitud establecida, se puede conocer el comportamiento de la grieta.

En el capítulo III, se desarrolla la metodología a seguir para el cálculo del comportamiento de una grieta.

Referencias

[1] Anderson A. (1995), “Fracture Mechanics: Foundations and Applications”, New York: CRC.

[2] González V. (1998), “Mecánica de Fractura. Bases y Aplicaciones”, Editorial Limusa, S.A. de C.V. Colección Textos Politécnicos, Serie Tecnologías Mecánicas, pp. 9-20.

Capítulo I

DESARROLLO HISTÓRICO DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

Se realiza una reseña histórica sobre la Mecánica de Fractura, exponiendo los alcances y limitaciones que se presentan al efectuar un análisis de Mecánica de fractura aplicado al caso de estructuras.

1.1. Antecedentes históricos

La mecánica de fractura ha sido usada desde la época Neolítica (se sitúa entre 7000 A.C. y 4000 A.C.) cuando el hombre invento y diseño las primeras herramientas sencillas de piedra. Es factible que estos primeros ancestros del hombre moderno no hayan entendido los mecanismos de fractura. En cualquier caso, desarrollaron técnicas muy hábiles de cómo moldear y formar cuchillos, lanzas y otras herramientas de piedra.

Varios incidentes relacionados con fractura, los cuales ocurrieron en los siglos XII y XIII en Europa; las primeras técnicas de control de calidad y ensayo de cañones de bronce se realizaban cargando y colocando el cañón boca abajo, permitiendo que el barril fuera disparado hacia el aire. Si después de la caída del tubo no había la presencia de grietas o no estaba completamente fracturado entonces se consideraba que el material era lo suficientemente tenaz y el cañón podía ser puesto en servicio de manera segura. De otra manera, este ensayo de fractura dinámica daba como resultado un tubo de cañón roto y el dispositivo militar necesitaba volver a ser fundido.

Las pruebas o ensayos, llevaron a los científicos a aproximarse a los problemas de resistencia y fractura, siendo la punta de lanza de pioneros tales como Leonardo da Vinci (1452-1519) y Galileo Galilei (1564-1642). Leonardo da Vinci [1.1] fue el primero en realizar experimentos para determinar la capacidad de carga de alambres de acero. Galileo Galilei [1.2] fue el primero en formular que la carga de fractura de una barra en tensión es directamente proporcional al área de su sección transversal e independiente de su longitud. La gran mayoría de los siguientes exploradores han aceptado la noción de Galileo de que la resistencia es una propiedad intrínseca del material.

La Revolución Industrial del Siglo XIX trajo consigo un incremento en la demanda de metales, particularmente de hierro y acero, para ser usados en ingeniería y la construcción a grandes escalas. Esta grande y feroz expansión del mundo de la ingeniería fue acompañada por una frecuencia mayor de fallas en estructuras de ingeniería, ocasionando accidentes que dieron como resultado pérdidas materiales, económicas y humanas. Algunos de esos accidentes se debieron a la falta de conocimiento en el diseño, descubriéndose también que los defectos de fabricación del material y deficiencias en la geometría del elemento pudieron ocasionar el inicio de un agrietamiento y posteriormente la fractura. De hecho, la fractura de vías de ferrocarril fue algo común, tanto que alrededor del año 1870 la revista de Ingeniería

Británica reportó estadísticas semanales acerca de accidentes ferroviarios. Posteriormente, en 1900 con la aparición del automóvil, seguido por los aeroplanos, se incrementó la provisión de factores de seguridad adecuados y la necesidad de entender de manera más clara el fenómeno de ruptura. Sin embargo, la respuesta fue dirigida principalmente a la mejora de materiales, perfeccionando los procesos de fabricación y de inspección. Con estas herramientas, la práctica del control de fractura se basó principalmente en la experiencia de fallas, factores de seguridad y de ensayos durante el periodo de 1900-1950. Como una medida contra el costo debido a las fallas, los seguros fueron una opción disponible. Sin embargo, durante este periodo fueron desarrolladas distintas investigaciones sobre fractura, las cuales ayudaron a la introducción de la mecánica de fractura, la cual, se utilizaría para determinar las posibles causas de fallas.

1.2. Fundamentos de la mecánica de fractura

Los primeros estudios de la fractura de componentes de uso en ingeniería fueron en el siglo XIX. Sin embargo, ha sido en los últimos 40 años que la mecánica de fractura se ha expandido rápidamente desde sus bases teóricas hasta sus aplicaciones en la industria. A pesar de que en la actualidad existe un número importante de componentes en aeronáutica, plantas nucleares, sistemas de tuberías, recipientes a presión, obra civil y plantas industriales diseñadas con base en la mecánica de fractura, aún persiste un gran número de interrogantes.

Los orígenes de la mecánica de fractura pueden remontarse a un artículo publicado por A.A. Griffith [1.3] en 1920, en el cual demostró por primera vez que la resistencia real a la tensión de materiales frágiles era significativamente menor que la resistencia predicha teóricamente debido a la presencia de grietas. El artículo fue esencialmente la tesis doctoral de Griffith, en el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge bajo la asesoría de su principal consejero G.I. Taylor. La contribución a menudo derivada del artículo de Griffith ha sido la ecuación que relaciona el esfuerzo de fractura σ_f con el tamaño de la grieta.

$$\sigma_f = \sqrt{[(2gE)/\pi a]} \quad (1.1)$$

donde:

E, es el módulo de Young.

g, es el término de la energía de superficie.

a es la mitad de la longitud de la grieta, normal a la tensión aplicada, en una placa grande.

Para derivar esta ecuación, Griffith utiliza la ecuación de esfuerzos de Inglis para un agujero elíptico en una placa grande sujeta a tensión. Inglis [1.4] proporcionó una expresión simple para el esfuerzo máximo para la punta de la muesca (modelada como la mitad de la elipse), la cual aún permanece en uso. El demostró que la ecuación del esfuerzo máximo presentaba la forma

$$\sigma_{\text{máx}} = [1+2 (\sqrt{a/r})] \quad (1.2)$$

donde:

σ , es el esfuerzo aplicado.

a, es la mitad de la longitud de la muesca.

r, es el radio de la raíz de la muesca.

Posteriormente, Wigglesworth [1.5] demostró que había necesidad de una corrección del borde libre la cual incrementaba el esfuerzo en la punta de la grieta en 10%. Griffith hizo una revisión a la ecuación de Inglis para representar una grieta plana en una placa, y luego calcular la rapidez de pérdida de campos de energía de deformación con el incremento del tamaño de la grieta asumiendo que las fronteras están fijas. Ésta aportación científica fue una tarea formidable con las herramientas de análisis disponibles en esa época.

Inglis [1.4] demostró que, como la elipse se aproximaba a una grieta lineal, los esfuerzos en la punta de la elipse, tienden al infinito. Observando este hecho, Griffith (1920-1924) concluyó que, en la presencia de una grieta, el valor del esfuerzo no puede ser usado como un criterio de falla, puesto que el esfuerzo en la punta de una grieta aguda, en un medio continuo y elástico, es infinito sin importar que tan pequeña sea la carga aplicada. Esto lo llevó a proponer un criterio de energía de falla.

La enorme contribución hecha por Griffith fue quitar la atención de la región altamente esforzada, a la punta de la grieta e instituir una condición necesaria y simple para la fractura en términos de un balance de energía.

A pesar de que la aproximación de Griffith estuvo apoyada por los estudios de clivaje en mica desarrollados por Obreimoff [1.6] en 1930, el trabajo de Griffith permaneció prácticamente inadvertido por algunas décadas.

En el periodo (1920-1940) los problemas relacionados con fractura y resistencia fueron de particular interés para la antigua Unión Soviética [1.7, 1.8]. Las escuelas matemáticas de elasticidad y plasticidad encabezadas por G.V. Kolosov, N.I. Muskhelishvili, A. Yu. Ishlinsky, G.N. Savin, S.G. Lekhnitsky y L.A. Galin contribuyeron intrínsecamente a la solución matemática de importantes problemas de fractura y resistencia. A.F. Joffe (1924), fue pionero en estudios de fractura frágil relacionados con la física de fractura de cristales. Por otra parte, N.N. Davidenkov (1928), realizó estudios en probetas con muesca en flexión, con la influencia de bajas temperaturas y el efecto de la velocidad inducida por impacto en metales; ésto con la finalidad de mejorar el entendimiento y evaluar la susceptibilidad de los metales a la fractura frágil. También realizó los primeros esfuerzos para tratar de caracterizar la resistencia de materiales a la fractura frágil debido a una temperatura crítica. Problemas asociados con la apertura de grietas por clivaje en micas fueron investigados por P.A. Rehbinder y Ya.I. Fraenkel (1930). Al mismo tiempo, A.P. Alexandrov y S.N. Zhurkov (1933) realizaron trabajos pioneros en el estudio de los efectos de escala en fracturas, así como los efectos del medio ambiente en conexión con la resistencia y fractura de fibras de vidrio.

Sin embargo, en los cuarenta, las ideas de Griffith se convirtieron en la piedra angular para el desarrollo de la mecánica de fractura lineal elástica (MFLE), estimulada por algunas fallas sin solución de estructuras metálicas, por ejemplo, la separación por fractura de los cascos en los barcos "Liberty" de la Armada de los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. Durante los primeros días de la guerra cuando la Armada Alemana estaba hundiendo barcos de carga enemigos a una velocidad tres veces más rápida de lo que los reemplazaban, la necesidad más grande de los Británicos eran buques de carga para transportar suministros.

Bajo la acción de préstamo-arrendamiento, los Estados Unidos suministraron barcos y aeroplanos al Reino Unido. El famoso constructor americano Kaiser dirigió una técnica rápida y revolucionaria para fabricar barcos, la cual fue implementada rápidamente. Con esta nueva técnica se construyeron, durante los años de la guerra, 2700 buques con el casco unido completamente con soldadura.

De este número enorme de buques, uno de cada siete presentaba fracturas, 90 en condiciones severas serias, 20 totalmente fracturados y alrededor de 10 se habían partido en dos [1.9].

Las investigaciones revelaron que las fallas de los barcos “Liberty” fueron causadas por la acción conjunta de tres causas: 1) Las soldaduras fueron producidas por un gran número de trabajadores inexpertos y presentaban imperfecciones tipo grietas; 2) La mayoría de las fracturas se iniciaron en las esquinas de las escotillas de la cubierta donde había concentración de esfuerzo; 3) El acero utilizado para la construcción tenía una tenacidad a la fractura pobre obtenida mediante pruebas de impacto Charpy; por lo tanto, algunos de los buques se rompieron aún antes de que fueran enviados a servicio en las aguas frías de la zona de combate.

Nuevamente, la disciplina de Mecánica de Fractura trato de explicar la causa de estos accidentes catastróficos. Aunque la teoría de Griffith estaba disponible, ésta fue considerada de una naturaleza más académica porque podía explicar solamente las fallas de materiales muy frágiles como el vidrio. Es claro que las probetas agrietadas de la mayoría de los materiales de ingeniería se rompían a esfuerzos de fractura mucho más altos que los que podía predecir la teoría de Griffith.

En el periodo comprendido de 1937-1954, Irwin estuvo al frente del “Naval Research Laboratory Ballistic Branch” (Washington D.C.). Como una guía para un nuevo estudio de fractura, supuso que la teoría de Griffith de 1920 podía ser modificada de alguna manera para predecir el inicio de la fractura debido al agrietamiento inicial en materiales de ingeniería. Los resultados de un estudio del espesor de la deformación plástica obtenidos usando dispersión de rayos X a partir del plano de clivaje en un acero estructural de baja resistencia (acero de bajo carbón), reportados por Orowan fueron de especial interés para este propósito.

Irwin observó que esta estimación de pérdida de energía debido a la deformación plástica por unidad de área de clivaje podía ser obtenida utilizando los resultados de Orowan. El resultado fue una indicación de que, incluso para la fractura frágil por clivaje, la pérdida de energía del campo de esfuerzos para ganar energía de superficie fue trivial en comparación a la rapidez de pérdida debida a la deformación plástica. De hecho, esos resultados corresponden a una rapidez de pérdida de energía en el campo de deformación muchas veces mayor que la energía de superficie de la ferrita.

Se concluyó que el concepto de usado por Griffith podía ser útil y conservado para cuestiones de análisis, al menos para el comportamiento de la fractura relativamente frágil, si en lugar de la energía de superficie de Griffith, se substituye por la pérdida de energía por trabajo debido a la deformación plástica ocurrida cerca de la punta de la grieta. Esta idea fue presentada por Irwin [1.10] en un Symposium de la ASM. Las ilustraciones experimentales disponibles fueron de limitado valor debido a la excesiva ductilidad del material de las probetas. Orowan [1.11] presentó la misma idea, pero considero poco probable de que fuera útil para materiales estructurales. Así, el artículo de Orowan alentó la selección de un concepto modificado de Griffith como un punto de inicio prometedor para nuevos programas de investigación de la fractura.

Aunque existe un acuerdo cuantitativo excepcional entre los datos teóricos y experimentales reportados por Griffith en 1920, parece ser algo fortuito, a la luz de algunas imprecisiones contenidas en el desarrollo teórico original (corregidos por él mismo en 1924), así como en los datos experimentales reportados (los cuales nunca fueron reproducidos en experimentos similares subsecuentes), deberá reconocerse que la famosa ecuación de Griffith y su premisa fundamental, son básicamente legítimos y representan la principal contribución a la literatura de la fractura. Actualmente, las citas de Griffith son superiores a las de Einstein.

El segundo logro más importante en los fundamentos de Mecánica de la Fractura fue en 1957 debido a Irwin [1.12], quien introdujo el concepto del factor de intensidad de esfuerzos K, como un parámetro para la intensidad de esfuerzos cerca de la punta de la grieta,

$$(\sigma^{\infty}) [(K / (\sqrt{r})] \quad (1.3)$$

donde r es la distancia desde la punta de la grieta. Posteriormente, Irwin [1.13] relaciono K con la rapidez de liberación de energía. Irwin supuso que la energía necesaria para la creación de nuevas superficies durante la extensión de la grieta provenía de la pérdida de energía de deformación del sólido elástico completo. Irwin definió esta rapidez de liberación de energía como G en honor a Griffith, y luego demostró que ésta podía ser determinada del campo de esfuerzos y desplazamientos en una región cercana a la punta de la grieta. Declaró que el simple parámetro G , fuerza de extensión de la grieta, media la intensidad del campo de esfuerzos en la punta de la grieta, mientras la deformación plástica esté limitada a una pequeña región cerca de la punta de la grieta. Irwin estableció el criterio de tenacidad a la fractura crítica (G_C), el cual especifica que la propagación de la grieta ocurre cuando G alcanza un valor igual a G_C . El también discutió el efecto del espesor (restricción) y la razón de deformación sobre G_C . Planteaba tres ideas fundamentales:

- 1) Un movimiento progresivo adelante del frente de la grieta (borde principal o punta de la grieta).
- 2) La fuerza de extensión de la grieta, G , era la rapidez de pérdida de energía del campo de esfuerzos en el frente de la grieta por incremento de extensión de grieta.
- 3) La resistencia a la extensión de la grieta era la rapidez de disipación de energía en la deformación no-elástica cerca al frente de la grieta. Estas ideas formaron las bases para la mecánica de fractura lineal elástica (MFLE).

El desarrollo de la teoría modificada de Griffith realizada por Irwin y Orowan, no fue completamente independiente ya que habían intercambiado ideas de investigación en 1946, cuando después de la famosa Conferencia de Mecánica Aplicada en París, Irwin visitó a Orowan en la Universidad de Cambridge. Sin embargo, tenían metas diferentes. Orowan tenía la idea de relacionar sus estudios utilizando rayos X con la teoría de Griffith, pero pensó que dicho trabajo sería sólo de interés académico y no aplicable a la fractura dúctil. En contraste con ésto, Irwin tenía mayor interés en aplicaciones prácticas, en particular al problema de fallas de los buques “Liberty”.

Con respecto a las fallas de los buques “Liberty”, se demostró que la tenacidad a la fractura del acero de los barcos fabricados con remaches era la adecuada, donde cualquier fractura podía ser detenida en el remache; sin embargo, en un buque soldado, una grieta no encontraba ninguna barrera que detuviera la propagación de la grieta y podía llegar a atravesar

el casco completo. Tan pronto fueron identificadas las razones que ocasionaban las fallas, pudieron diseñarse soluciones, placas de acero de alta tenacidad en las posiciones de peligro. Estas acciones prevenían fallas más serias en los barcos. El impacto a largo plazo de las fallas en los buques “Liberty” fue el desarrollo de acero estructural con una tenacidad a la fractura mejorada y estándares de control de calidad de la soldadura. Así, las fallas frágiles de los barcos “Liberty” popularizó de manera enorme a la mecánica de fractura, de tal manera que esta joven disciplina pasó de ser de una curiosidad científica a una disciplina de uso en la ingeniería.

Así, se puede considerar a Griffith como el abuelo de la mecánica de fractura, y a Irwin como el padre, quien fue capaz de transformar la elegancia conceptual, pero prácticamente incomoda, de la aproximación Griffith-Orowan en una forma tal que la hizo una herramienta de ingeniería de una gran aplicabilidad y frecuentemente, de importancia crítica. Su contribución no es solamente tan central como la hecha por Griffith, además comparte con la teoría original una simplicidad de enorme valor. La aproximación de Irwin presenta la enorme ventaja de que los factores de intensidad de esfuerzos son aditivos. Mientras que la rapidez de energía liberada de Griffith no lo es. Debe mencionarse que el enfoque de Irwin se basó en el análisis matemáticos de los esfuerzos y desplazamientos alrededor de la punta de grietas, análisis que proviene del trabajo llevado a cabo en presiones asociadas con superficies onduladas en contacto y modeladas como presiones en grietas por Westergaard (1939) [1.14].

En el artículo de 1957 Irwin [1.13] utilizó el método semi-inverso de Westergaard para relacionar G con el campo de esfuerzos en la punta de la grieta. Él estableció una simple relación entre la rapidez de energía liberada y el factor de intensidad de esfuerzos:

$$K^2 = GE \quad (1.4)$$

donde E es el módulo de Young. Irwin sugirió que fueran utilizados calibradores de deformación (strain gages) para medir G , pero el método no se usó en la práctica por 30 años hasta que se resolvieron las incertidumbres concernientes al efecto del gradiente y el tamaño de la región de dominio de K . De esta manera, fue desarrollado un método alternativo para medir G por la técnica de la deflexión.

Con el establecimiento de G y K como parámetros importantes de la punta de la grieta, se vuelve necesario relacionar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en la punta de la grieta con dichos parámetros. Durante el periodo de 1945-1952 aparecieron en la literatura distintos artículos, los cuales presentaron la distribución de esfuerzos para grietas tridimensionales en cuerpos infinitos sujetos a varias condiciones de carga. Las geometrías estudiadas fueron grietas penny-shaped (Sack 1946, Sneddon 1946, Sneddon & Elliot 1946, Willmore 1949, Segedin 1951), cavidad elipsoidal (Sadowsky & Sternberg 1949), y grietas elípticas (Green & Sneddon 1950). Debido a las condiciones de frontera relativamente simples, se obtuvieron soluciones exactas para estos problemas. Las soluciones del campo de esfuerzo fueron para la mayoría de los casos, una extensión de la teoría de elasticidad lineal derivada por el uso de técnicas complejas de funciones de esfuerzos. Mientras que los resultados del campo de esfuerzo antecedieron la mayoría de la literatura de la mecánica de fractura, el significado práctico de éstas soluciones fue realizada después de la introducción de los parámetros G y K . Un segundo grupo de soluciones del campo de esfuerzos apareció en la literatura durante el periodo de 1955–1960. Para este grupo de problemas, fueron empleados los métodos de variable compleja y funciones de mapeo para derivar los campos de esfuerzo bidimensionales en placas tanto de tamaño finito como infinito. Los problemas considerados fueron: una grieta en una placa de ancho finito, Isida (1956), grietas radiales originadas en la frontera de un agujero circular; Bowie (1956), una muesca en una placa semi-infinita; Wigglesworth (1957), y un arreglo de grietas colineales por Koiter (1959). Aunque estas soluciones fueron desarrolladas al mismo tiempo que los conceptos de K y G , parece que los autores tuvieron poco interés en los conceptos de mecánica de la fractura de Irwin.

Como fue mencionado anteriormente, Irwin (1957) empleó el método semi-inverso de Westergaard para relacionar G con el campo de esfuerzos en la punta de una grieta simple, en una placa infinita, bajo el modo de carga de apertura o de tensión. También en 1957, Williams [1.15] desarrollo un análisis del campo de esfuerzos alrededor de la punta de la grieta. Su análisis se centró en el comportamiento local en la punta de una grieta simple y fue independiente de la geometría de la probeta. Williams presento una solución en series para el campo de esfuerzos que rodeaba la punta de la grieta, la cual contenía términos singulares y de orden superior.

Las series, cuando se separaban en partes simétricas y asimétricas, dieron resultados para las cargas de apertura y cortante (conocidos como Modo I y Modo II) los cuales podían relacionarse con los factores de intensidad de esfuerzos K_I y K_{II} . Las soluciones se aplican a problemas en el plano y han sido utilizados ampliamente, aunque la integridad de las series aún se encuentra en debate. Específicamente, esta forma ha probado ser útil para la colocación de la frontera y en el análisis por elemento finito.

En 1958, Irwin publicó un resumen completo del estado de la mecánica de fractura [1.16]. En este artículo se encuentran incluidas expresiones convenientes para esfuerzos y desplazamientos cerca de la punta de la grieta, bajo los tres modos clásicos de carga (tensión, deslizamiento de corte, desgarramiento de corte) mostrados en la figura 1.1.

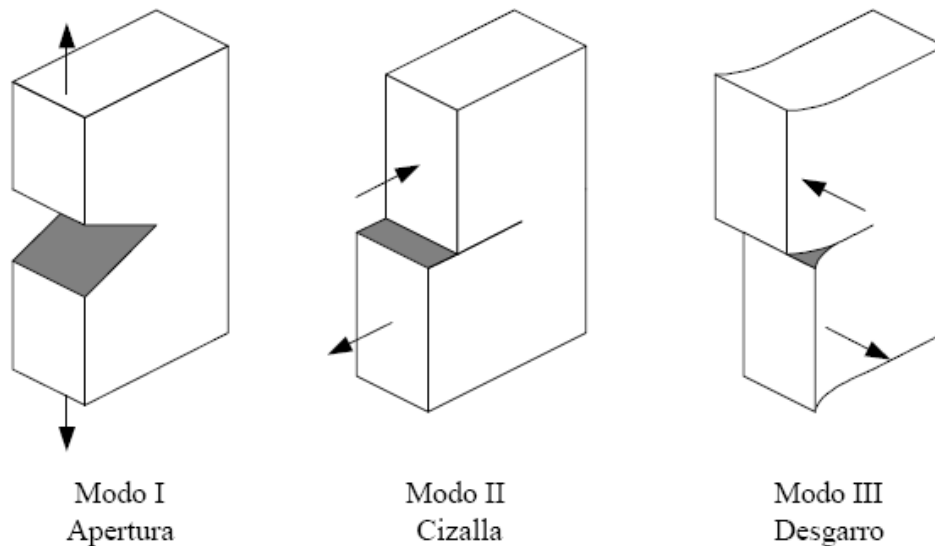


Figura 1.1.- Tipos de Modos de Carga.

Se discuten también tantos aspectos teóricos y experimentales de mecánica de fractura. El artículo fue tan comprensible que fue empleado, por algún tiempo, como libro de texto de los cursos de mecánica de fractura impartidos en Europa. El desarrollo de los objetivos logrados alrededor del año 1960 fue suficiente para garantizar la aceptación y continuidad del crecimiento de la tecnología de la mecánica de fractura. Los tres problemas principales de falla por fractura que ocurrieron durante los años 50's y la aplicación exitosa de los principios de mecánica de la fractura a dichos problemas, contribuyeron a la aceptación de la mecánica de fractura por la comunidad de ingeniería. Dichos eventos fueron la explosión a gran altitud del avión de reacción "Havilland Comet" en 1955; las fracturas de rotores de 3600 rpm en

grandes turbinas de vapor de generadores eléctricos en 1955-1956, y la falla de los motores del cohete de combustible sólido Polaris y Minuteman, en 1957. Todas estas fallas estuvieron relacionadas con la introducción de nuevos metales de alta resistencia a la cedencia en estructuras de alto desempeño [1.9]. Estos casos proporcionaron ejemplos de fallas donde la cobertura del seguro resultó ser demasiado costosa. Más importante que las sanciones impuestas debido a la falla, no resolver cada uno de estos problemas de una manera oportuna era inaceptable. Los nuevos métodos de análisis permitieron que la mecánica de fractura fuera un elemento importante en la solución de cada uno de los problemas. A cambio, cada una de estas investigaciones de fractura llevó consigo contribuciones en términos de nuevos avances con respecto al comportamiento de la fractura, métodos de análisis, y técnicas de ensayos.

La falla de misiles y cámaras de cohetes impulsó a Oficiales de la Secretaría de Defensa de los Estados Unidos a buscar ayuda de la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (ASTM, siglas en inglés). En respuesta en 1959, la ASTM formó Comités Técnicos Especiales (STC, siglas en inglés) para estudiar la aplicación de nuevos puntos de vista de la mecánica de fractura para materiales de alta resistencia en detalle y para desarrollar métodos de prueba para determinar la resistencia a la fractura frágil de dichos metales. El Presidente del Comité, J.R. Low, y sus miembros (alrededor de 15) eran respetados por su experiencia, conocimiento y entendimiento de la fractura. El trabajo de este comité proporcionó un ímpetu para el rápido desarrollo tecnológico en la mecánica de la fractura, en el cual la ASTM SCT y el siguiente comité ASTM Comité E-24, asumieron el papel de dirección.

El primer reporte realizado por Comité Técnico Especial de la ASTM en Enero de 1960 declaró que: "...los principios de mecánica de la fractura eran bien entendidos para permitir su uso tanto en ensayos de fractura, como en la interpretación de los resultados".

1.3. Contribuciones importantes a la mecánica de fractura

Winne y Wundt en 1958 [1.17] aplicaron la aproximación de la Razón de Energía Liberada de Irwin, a la falla de rotores largos para ejes de turbinas. Más adelante, en 1960, Paris [1.18] aplicó los principios de la mecánica de fractura al crecimiento de una grieta por fatiga.

Wells, en 1961 [1.19], propuso un desplazamiento en las caras de la grieta, como una alternativa al criterio de fractura donde una plasticidad significativa precede a la falla. Al mismo tiempo, aplicó la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) a estructuras de acero de baja y mediana resistencia; notando que las caras se separaban proporcionalmente con la deformación elasto-plástica, llevando al desarrollo de un nuevo parámetro conocido como el **Desplazamiento de Apertura en la Punta de la Grieta - CTOD (Crack Tip Opening Displacement)**.

Otra contribución muy importante a la mecánica de fractura fue realizada por F. Erdogan y G. C. Sih en 1963 [1.20]. Estos investigadores estudiaron el comportamiento de la grieta a 45 grados en un plano general de carga, donde realizaron análisis numérico y experimental. Debido a esto, encontraron que cuando $K_I = 0$, la extensión de la grieta crecía a una aproximación de 70 grados respecto al plano. Siendo esto muy cercano a la dirección perpendicular del esfuerzo tangencial máximo, el cual tiene una dirección de 70.5 grados. Así mismo, verificaron que el crecimiento era en dirección perpendicular a la tensión mayor en la punta de la grieta, bajo esfuerzos de tensión y corte.

Más tarde, Hutchinson [1.21], Rice [1.22] y Rosengren en 1968 [1.23] realizaron un análisis para determinar la energía de fractura en materiales no lineales en el que se define la integral J, caracterizándose como un parámetro no lineal que evalúa las condiciones de fractura. En 1972, Begley y Landes [24] caracterizaron la tenacidad de fractura con la integral J, proponiendo el procedimiento de pruebas para evaluar experimentalmente este parámetro. Más tarde, Shih C.F. y Hutchinson en 1976 [1.25], hicieron un análisis de diseño basado en la integral J, avalando el cuadro teórico. Otros investigadores como S. Chapuliot, T. Chaudat, V. Mineau y D. Moulin en 1996 [1.26], estudiaron y evaluaron J en grietas semi-elípticas.

Con la aplicación de los conceptos de la mecánica de la fractura, algunos investigadores como Laird y Smith (1962) [1.27], McClintock (1963) [1.28], Weertman (1966) [1.29], Laird (1967) [1.30], Rice (1967) [1.31], Neumann (1969) [1.32] y Pelloux (1969) [1.33], desarrollaron modelos cuantitativos para racionalizar lo observado en la experimentación en cuanto a resistencia del crecimiento de la grieta por fatiga en los materiales.

1.4. Evaluación de la propagación direccional de grietas en campos de esfuerzos biaxiales

Con respecto a la estabilidad direccional de propagación de grietas, Williams (1957) [1.34], mostró una función matemática que describe el campo de esfuerzos en la vecindad de la punta de la grieta. Dicha función, es conocida como la serie de Williams, y está constituida por una serie de términos. Para esto, los primeros describen la severidad del campo de esfuerzos y la estabilidad de propagación. Más tarde, Cotterell (1965) [1.35] analizó los términos simétricos del campo de esfuerzos para el modo I, definiendo dos clases de fractura: la primera, cuando se desvía una grieta de su ruta original y tiende a regresar y la segunda que continua desviándose.

Un año después, Cotterell (1966) [1.36] mostró que el primer término de la serie de Williams determina el Factor de Intensidad de Esfuerzos para un material frágil, mientras que el segundo controla la estabilidad direccional de la grieta, el tercero predice la estabilidad de propagación y el cuarto determina si el esfuerzo cortante máximo aumenta o disminuye con la longitud de la grieta.

P. D. Ewing, J. L. Swedlow y G. Williams (1976) [1.37], utilizaron placas de polimetilmetacrilato (PMMA), para hacer estudios experimentales sobre el crecimiento inicial de una grieta y de posibles fallas, las cuales estaban expuestas a cargas de tensión y flexión. Además, utilizaron las teorías del Esfuerzo Circunferencial Máximo y la Densidad de Energía de Deformación Mínima para predecir la falla. Con esto, encontraron que ambas teorías eran muy aproximadas al análisis experimental y por lo tanto, eran aceptadas para estudios de este tipo.

En cuanto al análisis de fractura direccional, se establece que en 1977 [1.38], Wu y colaboradores, estudiaron el comportamiento de una grieta elíptica a 45° en un polimetilmetacrilato bajo carga de tensión monotónica. Ellos muestran que cuando el

espécimen está bajo carga a tensión, la dirección de la grieta crece perpendicular a la carga aplicada, y cuando se encuentra a compresión se estabiliza la propagación de la misma. Este trabajo establece que en un campo de esfuerzos biaxiales, las cargas transversales tienen una fuerte influencia en la estabilidad de la propagación de la grieta.

Otros investigadores como R. Streit y Finnie I. (1980) [1.39], analizaron el crecimiento de micro grietas en un aluminio 7075-T651 expuesto a carga biaxial, llevando a cabo trabajo foto elástico y experimental. Además, se apoyaron en el criterio del Esfuerzos Circunferencial Máximo. Sus resultados mostraron que la estabilidad direccional de propagación de la grieta es gobernada por la dirección del inicio de la microgrieta.

Esto lleva a la conclusión de que una vez caracterizado el campo de esfuerzos biaxiales en la punta de la grieta, se pueden establecer parámetros que describan la estabilidad de propagación.

Más tarde, J. B. Sha, J. Sun, Z. J. Deng y H. J. Zhou (1999) [1.40], investigaron la deformación y la micro fractura en la vecindad de la punta de una micro grieta en un aluminio con largos tamaños de grano, bajo cargas biaxiales, donde observaron el campo de esfuerzos en la línea de propagación de la grieta, y calcularon el Factor de Intensidad de Esfuerzos, la Densidad de Energía de Deformación y el Desplazamiento de Apertura en la Punta de la Grieta, bajo modo mixto de carga. Además, observaron los efectos de la grieta cuando ésta tiene una punta aguda y una punta obtusa. Estos investigadores, asumieron que el deslizamiento depende de la orientación de los cristales que contienen micro grietas.

En otras palabras, la dirección de propagación de micro grietas bajo modo mixto de carga, crece a lo largo de la zona donde se encuentran los vacíos y depende de la orientación de la carga aplicada. Para esto, utilizaron un microscopio electrónico, encontrando que la punta de la grieta obtusa es atribuida al hecho de que se tiene tensión local, mientras que la punta aguda se manifiesta cuando se tiene compresión local.

Por otra parte, P. S. Theocaris y N. P. Andrianopoulos (1982) [1.41], hicieron una modificación al criterio de Densidad de energía de Deformación, para calcular el ángulo de propagación en casos simples y complejos. Para esto, agregaron más términos a la función compleja de Muskhelishvili [1.42], logrando obtener resultados de ángulos de propagación más aproximados a los experimentales.

Un año más tarde, S. K. Maiti y R.A. Smith (1983) [1.43], estudiaron grietas con frente elíptico y afilados (punta), orientadas a diferentes ángulos y con diversas longitudes, sometidas a carga de tensión uní axial. Para esto, utilizaron diferentes Criterios para determinar la dirección de propagación tales como, el Criterio del Esfuerzo Tangencial Máximo (MTS), la Deformación Tangencial Máxima (MTSN) y el Esfuerzo Principal Tangencial Máximo (MTPS), obteniendo las cargas críticas que podrían causar que una grieta se propague en forma direccionalmente inestable.

Un año después, Maiti y Smith [1.44] estudiaron el comportamiento de las grietas elípticas y en punta, bajo carga uní axial a compresión, donde utilizaron los criterios MTS, MTSN y MTPS para calcular el ángulo de propagación de la grieta y la carga máxima que ocasionaría una grieta inestable. Estos resultados los compararon con el análisis experimental realizado por Cotterell [1.45].

Más tarde, M. Grigoriu y colaboradores (1990) [1.46], desarrollaron un algoritmo probabilístico para fractura de modo mixto (FORM/SORM), donde estiman la iniciación de la grieta y predicen su trayectoria bajo esfuerzos aleatorios. Para esto, analizan dos placas: una con grieta en el centro y perpendicular a los esfuerzos de tensión aplicados, y la otra con un agujero en el centro que contiene una grieta a 45° . Además, utilizan el programa de computo FRANC para corroborar los resultados obtenidos del algoritmo.

G. Beer en 1993 [1.47], desarrolló un programa de cómputo para modelar la iniciación y propagación de grietas a lo largo de la interfase del material. Este programa está basado en el concepto de multiregiones, utilizando el Método de Elemento Frontera. Para esto, utilizó el teorema recíproco de Betti's [1.48].

Por otra parte, P. H. Geubelle y W. G. Knauss (1994) [1.49], estudiaron una grieta en la interfase de 2 materiales diferentes, donde utilizaron el criterio del Esfuerzo Circunferencial Máximo y el criterio de la Relación de Energía Máxima. Además, desarrollaron análisis numérico, análisis teórico y estudios experimentales. Con esto, encontraron que la variación del ángulo de propagación de la grieta a lo largo de la interfase era diferente a medida que esta crecía, y que sólo el criterio de la Energía Máxima coincidía con los estudios experimentales.

Urriolagoitia y Hernández (1996-1997) [1.50, 1.51, 1.52], analizaron el caso de placas agrietadas cargadas en forma biaxial, incluyendo tanto el análisis experimental como el numérico. Además, utilizaron el segundo coeficiente de la serie de Williams para evaluar la estabilidad de propagación de la grieta.

Otros investigadores como J. G. Swadener y K. M. Liechti (1998) [1.53], estudiaron la interfase de un material de vidrio y una resina bajo modo mixto de carga, pre-agrietándose 8 mm. a lo largo de la interfase, para determinar la tenacidad a la fractura, la deformación plástica y el desplazamiento de apertura de la grieta. Con los estudios aquí realizados, es posible predecir la variación de la tenacidad a la fractura para modo mixto de carga. Para realizarlo llevaron a cabo análisis experimental y numérico.

D. A. Zacharopoulos en 1999 [1.54], estudió el efecto que tenían las grietas que se encontraban en especímenes compactos de acero, al pegarle un parche de aluminio por ambos lados con un pegamento plexiglass, a una determinada distancia de la punta de la grieta; al hacerlo se observó que, de acuerdo a la distancia que se encontraba el parche, se podría predecir la trayectoria de la grieta, y que el grado de inestabilidad de ésta, está dado por la carga, la geometría y el tipo de material.

Y. Wang y J. Pan (1999) [1.55], calcularon un factor “ η ” para grietas en condiciones de carga de modo mixto en especímenes compactos. Para esto, utilizaron la curva de resistencia “J” en condiciones de carga de modo mixto I y III, y modo mixto I y II. Los resultados que se obtuvieron indican que el factor “ η ” está solamente en función de la longitud de la grieta bajo la combinación del modo I y III, y que para las condiciones de carga donde interviene el

modo I y II, el factor “ η ” además de estar en función de la longitud de la grieta, también influye el tipo de grieta que induce el momento de carga del modo II.

Más tarde Saucedo y Hernández (2002) [1.56] evaluaron la energía de propagación con condiciones de esfuerzos de modo mixto, variando la velocidad de carga, donde encontraron que a medida que se aumenta la velocidad de aplicación de carga, se necesitara menor energía para la propagación de la grieta.

1.5 Referencias

[1.1] Uccelli A. & Leonardo da Vinci (1956), New York: Reynal & Co.

[1.2] Galilei G. (1638), “Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Sopra due Nuove Sciebbe”, ed. Elsevini, Leiden.

[1.3] Griffith A.A. (1920) “The Phenomenon of Rupture and Flow in Solids”, Phil. Trans. Royal Society, London, A, Vol. 221, pp. 163-198.

[1.4] Inglis C.E. (1913), “Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners”, Proc. Inst. Naval Arch., V. 55, pp. 219-241.

[1.5] Wigglesworth L.A. (1957), “Stress distribution in a Notched Plate”, Mathematica, vol. 4, pp. 76-96.

[1.6] Obreimoff I.V. (1930), “The Splitting Strength of Mica”, Proc. Royal Society, A, vol. 127, pp. 290-297.

[1.7] Cherepanov G.P. (1978), “Brittle Fracture Mechanics”, New York, ed. McGraw Hill.

[1.8] Balankin A.S. (1990), “Kinetic Theory of Strength and Fracture”, Moscow, Ministry of Defense USSR.

[1.9] Panasyuk V.V. (1991), “Materials Quasi-Brittle Fracture”, Kiev, Naukova Dumka.

[1.10] Irwin G.R. (1948), "Fracture Dynamics", *Fracturing of Metals*, American Society for Metals, Cleveland, pp. 147-166.

[1.11] Orowan E. (1948), "Fracture and Strength of Solids", *Reports of Progress in Physics*, Vol. XII, pp. 185-232.

[1.12] Irwin G.R. (1957), "Relation of Stress Near a Crack to the Crack Extension Force", *Proc. 9th Int. Congr. Appl. Mech.*, vol. VIII, pp. 245-251.

[1.13] Irwin G.R. (1957), "Analysis of Stresses and Strains Near the end of a Crack Traversing a Plate", *Journal Applied Mechanics.*, vol. 24, pp. 361-364.

[1.14] Westergaard H. M. (1939), "Bearing Pressures and Cracks", *Journal of Applied Mechanics*, vol. VI, pp. 49-53.

[1.15] Williams M.L. (1957), "On the Stress Distribution on the Base of a Stationary Crack", *Journal Applied Mechanics*, *Trans. ASME*, vol. 24, pp. 109-114.

[1.16] Irwin G.R. (1958), "Fracture, in *Encyclopedia of Physics*, V. VI – Elasticity and Plasticity", Berlin: Springer Verlag, pp. 51-59

[1.17] Winne, D. H. And Wundt, B. M. (1958), "Application of the Griffith-Irwin Theory of Crack Propagation to the Bursting Behaviour of Disks, Including Analytical and Experimental Studies", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 80, pp. 1643-1655.

[1.18] Paris P. C., Gomez M. P. & Anderson W. P. (1961), "A Rational Analytic, Theory of Fatigue", *The Trend in Engineering*, Vol. 13, pp. 9-14.

[1.19] Wells A.A. (1961), "Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and Fast Fracture", *Proceedings of the Crack Propagation Symposium*, Vol. 1, paper 84, Cranfield, UK,.

[1.20] Erdogan F. & Sih, G.C. (1963), "On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear", *Journal of Basic Engineering*, Trans. ASME 85D, pp. 519-527.

[1.21] Hutchinson J. W. (1968), "Singular Behaviour at the End of a Tensile Crack Tip in a Hardening Material", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, pp. 13-31.

[1.22] Rice J.R. (1968), "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", *Journal of Applied Mechanics*, 35, pp. 379-386.

[1.23] Rosengren G. F. (1968), "Plane Strain Deformation near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, pp. 1-12.

[1.24] Begley J. A. & Landes J. D. (1972), "The J-Integral as a Fracture Criterion", ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 1-20.

[1.25] Shih C.F. & Hutchinson J.W. (1976), "Fully Plastic Solutions and Large-Scale Yielding Estimates for Plane Stress Crack Problems", *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 98, pp. 289-295.

[1.26] Chapuliot S., Chaudat T, Mineau V. & Moulin D. (1996), "Fatigue Growth of Semi-Elliptical Crack in Plates Subjected to Bending", *Fatigue and Fracture ASME*, vol. 1, pp. 291-296.

[1.27] Laird C. & Smith G.C. (1962), "Crack Propagation in High Stress Fatigue", *Philosophical Magazine* 8, pp. 847-857.

[1.28] McClintock F.A. (1963), "On the plasticity of the growth of fatigue crack", In *fracture of Solids* (eds. D.C. Drucker & J.J. Gilman), vol. 20, New York, Wiley, pp. 65-102.

[1.29] Weertman J. (1966), "Rate of growth of fatigue cracks calculated from the theory of infinitesimal dislocations distributed on a crack plane", *International Journal of Fracture* 2, pp. 460-7.

[1.30] Laird C. (1967), "The influence of metallurgical structure on the mechanisms of fatigue crack propagation". In *Fatigue Crack Propagation*. Special Technical Publication 415, Philadelphia: The American Society for Testing and Materials, pp. 131- 68.

[1.31] Rice J.R. (1967), "Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue. In *Fatigue Propagation*", Special Technical Publication 415 ASTM., pp. 247-309.

[1.32] Neuman P. (1969), "Coarse slip model of fatigue". *Acta Metalúrgica* 17, pp. 1219-1225.

[1.33] Pelloux R.M.N. (1969), "Mechanisms of formation of ductile fatigue striations". *Transactions of the American Society of Metals* 62, 1969, pp. 181-185.

[1.34] Williams M. L. (1957), "On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack", *Journal Applied Mechanics*. Trans. ASME 24, pp. 519-527.

[1.35] Cotterell B. (1965), "On Brittle Fracture Paths", *International Journal of Fracture Mechanics*. 1, pp. 96-103.

[1.36] Cotterell B. (1966), "Notes on the Paths and Stability of Cracks", *International Journal of Fracture Mechanics* 2, 1966, pp. 526-533.

[1.37] Ewing P.D., Swedlow J.L. & Williams J.G. (1976), "Further results on the angled crack problem", *International Journal of Fracture* vol 12, No. 1, pp. 85-93.

[1.38] Wu H.C., Yao R. F. & Yip M.C. (1977), "Experimental Investigation of the Angled Elliptic Notch Problem in Tension", *Journal of Applied Mechanics*, Trans. ASME 44, pp. 455-461.

[1.39] Streit R. & Finnie I. (1980), "An Experimental Investigation of Crack-path Directional Stability", *Journal Experimental Mechanics*, vol. 20 No. 1, pp. 17-23.

[1.40] Sha J. B., Sun Deng J.Z.J & Zhou H. J. (1999), "Micro-crack tip fracture of commercial grade aluminum under mixed mode loading". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 31, pp. 119-130.

[1.41] Theocaris P. S. and Andrianopoulos N. P. (1982), "A modified strain-energy Density Criterion Applied to Crack Propagation". *Journal of Applied Mechanics*, vol. 49, pp. 81- 86.

[1.42] Muskhelishvili (1953), "Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity". Noordhoff, Groningen.

[1.43] Maiti, S. K. and Smith, R. A. (1983), "Comparison of the Criteria for Mixed Mode Brittle Fracture Based on the Preinstability Stress-Strain Field", Part I: Slit and elliptical cracks under uniaxial loading *International Journal of Fracture* 23, pp. 281-294.

[1.44] Maiti, S. K. and Smith, R. A. (1984), "Comparison of the Criteria for Mixed Mode Brittle Fracture Based on the Pre instability Stress-Strain Field", Part II: Pure shear and uniaxial compressive loading, *International Journal of Fracture* 24, pp. 5-22.

[1.45] Cotterell B. (1977), "International Journal of Fracture Mechanics", 8, pp.195-208.

[1.46] Grigoriu M., Saif M.T.A., El Borgi S. and Ingrassia A.R. (1990), "Mixed Mode Fracture Initiation and Trajectory Prediction Under Random Stresses", *International Journal of Fracture* 45, pp.19-34.

[1.47] Beer G. (1993), "An Efficient Numerical Method for Modelling Initiation and Propagation of Cracks Along Material Interfaces", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 36, pp. 3579-3594.

[1.48] Beer G. and Watson J.O. (1992), "Introduction to Finite and Boundary Element Methods for Engineers", J. Wiley.

[1.49] Geubelle P.H. and Knauss W.G. (1994), "Crack propagation at and Near Bimaterial Interface: Lineal Analysis", Journal of Applied Mechanics, vol. 61, pp. 560-566.

[1.50] Urriolagoitia Calderón G. y Hernández Gómez L.H. (1996), "Evaluation of crack propagation stability with the Williams stress function part I." International Journal Computers and Structures. No. 61 (4), pp. 775-780.

[1.51] Urriolagoitia Calderón G. y Hernández Gómez L.H. (1997), "Evaluation of crack propagation stability part II." International Journal Computers and Structures. No. 63 (5), pp. 1007-1014.

[1.52] Urriolagoitia Calderón G. y Hernández L.H. (1997), "Experimental analysis of crack propagation stability in single edge notch specimens". Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 28, pp. 57-68.

[1.53] Swadener J.G. and Liechti K.M. (1998), "Asymmetric Shielding Mechanisms in the Mixed-mode Fracture of a Glass/Epoxy Interface", Journal of Applied Mechanics, vol. 65, pp. 25-29.

[1.54] Zacharopoulos D.A. (1999), "Arrestment of Crack in Plane Extension by Local Reinforcements", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 32, pp. 177-188.

[1.55] Wang Y. and Pan J. (1999), "Estimation of the η Factors for Mixed-Mode Crack in Compact Tension Specimens", Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 121, pp. 203-208.

[1.56] Hernández Gómez L.H., Saucedo Meza I., Urriolagoitia Calderón G., Balankin A.S. and Suseney O. (2004), "Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rates.", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 42, pp. 53-61.

Capítulo II

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA

En este trabajo se considera conocer los conceptos básicos de la Mecánica de Fractura, sus características y aplicaciones, para determinar la vida útil o resistencia de una estructura agrietada y diseñar componentes más tolerantes a los defectos.

2.1. Campo de aplicación

La fractura es un fenómeno que ha recibido atención constante desde que se comenzó a utilizar en gran escala máquinas y estructuras cuya función principal es la de resistir y transmitir una carga o presión. En particular, el uso de componentes metálicos siempre ha sido acompañado del riesgo de fractura, a su vez, la fractura de grandes estructuras ha sido acompañada de considerables pérdidas materiales, económicas y humanas. Es común también que aunque muchos casos de fallas ocurran una vez en toda una vida, una sola falla puede significar una gran catástrofe, como es el caso de los accidentes aeronáuticos, las explosiones en grandes ductos de gases o líquidos combustibles o las fallas de reactores nucleares. Las pérdidas por estas fallas usualmente no se limitan a la pérdida de la estructura y a los daños causados a las vidas humanas y propiedades cercanas; con frecuencia también hay grandes pérdidas por la demora de la producción y daños al medio ambiente, entre otros. La fractura prematura de pequeños componentes también es un problema insidioso que es asociado como una mala calidad del producto. Sería imposible cuantificar la magnitud de las pérdidas causadas por fallas asociadas con la fractura, en componentes grandes y pequeños, se puede decir: que la fractura ha significado en la mayoría de los casos un freno al desarrollo tecnológico.

A través del tiempo se ha demostrado que los criterios tradicionales de diseño de estructuras bajo la suposición de la ausencia de defectos para después considerar su efecto mediante factores de seguridad, son arriesgados y muchas veces carentes de todo fundamento. La mecánica de la fractura [2.1] es la disciplina que provee las bases y la metodología para el diseño y evaluación de componentes agrietados a fin de desarrollar estructuras más resistentes y tolerantes a los defectos. En el ámbito industrial, es extensamente empleada en las industrias aeroespacial, aeronáutica y nuclear y recientemente comienza a ser usada en la industria automotriz, en el diseño y mantenimiento de plantas de generación de potencia e industrias química y petrolera.

La mecánica de la fractura es también de gran utilidad en aquellos componentes que han sido construidos, fabricados o incluso que ya fallaron, para proveer los criterios de aceptación o rechazo, frecuencia de inspección y para definir los límites de operación.

Las aplicaciones prácticas de la mecánica de fractura tienen como objetivo mayor seguridad y economía en la operación, inspección, mantenimiento de estructuras y componentes de servicio y al reducir el problema de las fallas inesperadas, permite a los ingenieros una mayor atención a otros aspectos fundamentales como el desarrollo de nuevos materiales y la mejora en diseños.

Desde el punto de vista de la escala de estudio de la fractura, la mecánica de fractura se ubica dentro de las escalas mesoscópica y macroscópica, es decir, abarcando sistemas visibles al ojo humano (más de .01 mm). En este nivel, el uso de la mecánica de fractura se divide en dos escalas: en el tamaño del orden de centímetros, las aplicaciones usuales son a nivel de probetas de laboratorio para evaluación de propiedades y estudio de grietas cortas. El estudio de los fenómenos de fractura a escala microscópica y en particular su relación con la microestructura de los materiales corresponde, por otra parte, al campo de la fractografía, que usualmente se sitúa como una rama de la ciencia de materiales. Dentro de esta categoría se incluyen los estudios de plasticidad en punto de la grieta, el examen fractográfico y el estudio de los microorganismos de fractura. La figura 2.1 ilustra esta clasificación.

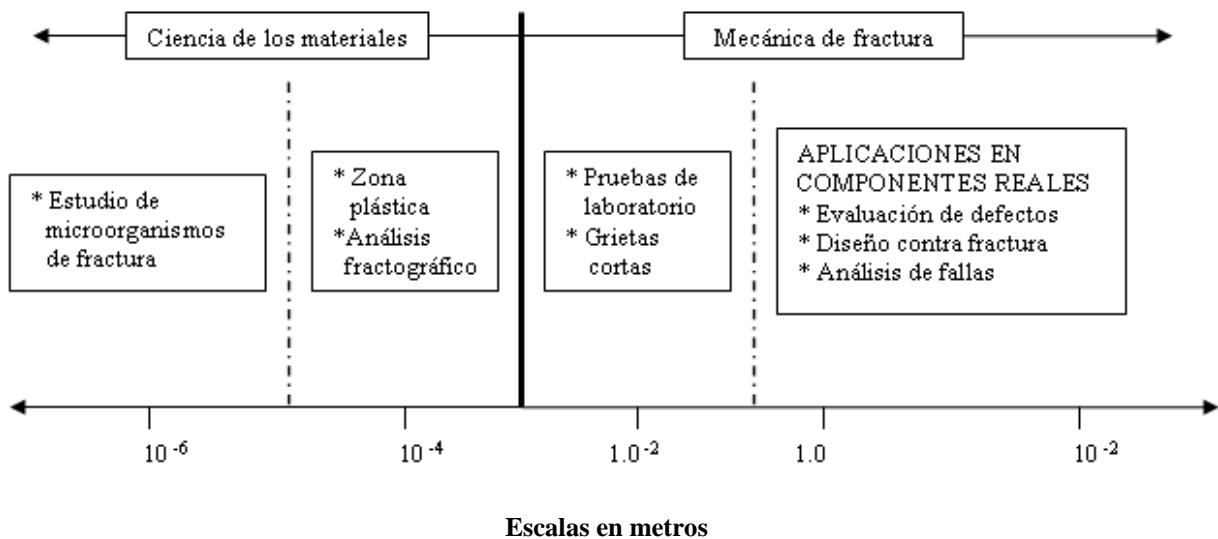


Figura 2.1.- Escala de aplicación de la mecánica de fractura y la fractografía.

2.2. Mecánica de sólidos

Se refiere al estudio de las fuerzas que actúan en un cuerpo y las reacciones que se producen como resultado de esta acción. El análisis de las fuerzas y sus reacciones se realiza sin importar las causas que las producen y sin alteración de la materia. De acuerdo con la 3ra Ley de Newton, a toda acción corresponde una reacción, de manera que cuando aplicamos una fuerza externa a un cuerpo sólido y este permanece estático, se produce una reacción interna que equilibra la fuerza externa. La magnitud de la reacción interna es el esfuerzo y la consecuencia inmediata de la existencia de un esfuerzo es la deformación. La mecánica de sólidos evalúa la magnitud de los esfuerzos y las deformaciones producidas en un sólido y determina si tiene la suficiente resistencia para soportar esas fuerzas sin deformarse excesivamente ni llegar a la fractura. Es muy común que la mecánica de sólidos también se le conozca como “resistencia de materiales“. El origen de la resistencia mecánica de los materiales y su comportamiento mecánico desde el punto de vista de los mecanismos de reforzamiento es tema de la Metalurgia Mecánica o Ciencia de los Materiales.

Al aplicar una carga a un sólido, inicialmente el cambio de dimensiones es proporcional a la magnitud de la carga aplicada y es reversible, es decir, al retirar la carga el cuerpo recupera su forma y dimensiones originales. A este comportamiento se le denomina *elasticidad*. En la mayoría de los materiales y en especial en los metales, cuando el esfuerzo producido por la carga rebasa un valor límite, el cambio de forma se vuelve permanente, y se denomina *plasticidad*. Finalmente, cuando el material no puede continuar deformándose mas sobreviene la fractura.

Para analizar el comportamiento mecánico de un sólido, es necesario simplificar el sistema, ya que los metales son arreglos complejos de átomos, defectos cristalinos, fases y heterogeneidades. Para simplificar el estudio de la mecánica de sólidos se considera que el cuerpo es:

- **Continuo.** La materia ocupa la totalidad del volumen y no hay huecos vacíos ni interrupciones. Se puede definir entonces un volumen infinitamente que tiende a cero y siempre existirá este límite.

- **Homogéneo.** Todo el volumen esta ocupado por la misma especie de materia.
- **Isotrópico.** Las propiedades no cambian en ninguna dirección.

Bajo estas consideraciones, un cuerpo estático cualquiera bajo la acción de una fuerza F permanece estático si la fuerza F es balanceada por una reacción interna F_i , de igual magnitud y sentido opuesto. La magnitud de la reacción interna en el sólido depende de la magnitud de la fuerza aplicada y de la cantidad de partículas que resisten la acción de esa fuerza, siendo la cantidad de partículas proporcional al área transversal a la dirección en que actúa la fuerza interna. Como conclusión, la magnitud del efecto interno que se produce al aplicar una fuerza externa es directamente proporcional a la fuerza inversamente proporcional al área sobre la que actúa, esto es F/A , a la relación F/A se le llama esfuerzo [2.2].

Al esfuerzo producido por una fuerza normal al área se le llama *esfuerzo normal* y se designa por σ , y al esfuerzo producido por una fuerza tangencial se le llama *esfuerzo cortante* y se designa por t [2.3]. Los esfuerzos normales a su vez, se dividen en dos tipos: cuando las fuerzas internas tienden a separar partículas, son esfuerzos de tensión y tienen signo positivo (+), y cuando las fuerzas juntan partículas, se producen esfuerzos de compresión y son de signo negativo (-). El signo de los esfuerzos cortantes se define por el sentido del momento que generarían si no estuvieran en equilibrio; así, el esfuerzo cortante es positivo si genera un momento en sentido contrario a las manecillas del reloj y viceversa. Las unidades típicas del esfuerzo (tabla 2.1) son:

Sistema	Unidad	Múltiplo común
Internacional	Pascal ($\text{Pa} = \text{Nw}/\text{m}^2$)	$\text{MPa} = 10^6 \text{ Pa}$
Inglés	psi ($\text{psi} = \text{lb}/\text{pulg}^2$)	$\text{ksi} = 1\,000 \text{ psi}$
MKS	kg/mm^2	$\text{kg}/\text{cm}^2 = 100 \text{ kg}/\text{mm}^2$
Los factores de conversión son:		$1 \text{ ksi} = 6.895 \text{ MPa}$ $1 \text{ kg}/\text{cm}^2 = 14.23 \text{ psi}$ $1 \text{ MPa} = 10.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$

Tabla 2.1. Unidades típicas del esfuerzo

La manera de describir el estado de esfuerzos en un punto es mediante el tensor de esfuerzos, que se define de la siguiente manera: sea un elemento de volumen de tamaño diferencial centrado en un sistema coordenado de ejes cartesianos x , y , z ; la acción de las fuerzas en el interior de un cuerpo constituido de elementos unitarios de volumen (dx , dy y dz) puede referirse a las componentes de la fuerza en cada cara del cubo; para las tres dimensiones x , y , z en cada cara del cubo habrá una componente normal y dos tangenciales, como se muestra en la figura 2.2 [2.4]. La notación para las componentes del tensor de esfuerzos usa dos índices, donde:

σ_{ij} es una componente del esfuerzo,

i es la dirección perpendicular a la cara donde se aplica la componente,

j es la dirección de la componente.

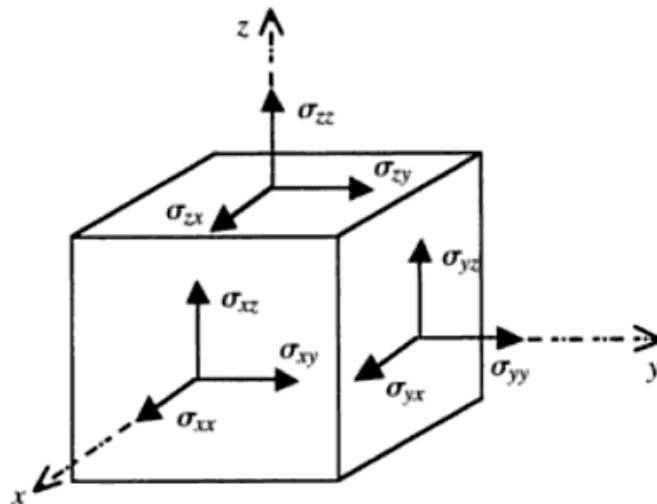


Figura 2.2.- Componentes del esfuerzo

Cualquier combinación de las fuerzas en el interior de un cuerpo puede reducirse a las nueve componentes del esfuerzo actuando en un elemento de volumen. Estas nueve componentes definen el estado de esfuerzos, o sea el total de las reacciones en el interior de un cuerpo sometido a una carga externa. Como cada componente es un vector, y el estado de esfuerzos es una colección de vectores, entonces el estado de esfuerzos es un tensor, representado por una matriz (figura 2.3) [2.4] como la siguiente:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

Figura 2.3.- Matriz de esfuerzos

El estado de esfuerzos depende de las cargas, la geometría del cuerpo y de la orientación de los ejes coordenados que se usan como referencia para definir los esfuerzos. Como los ejes coordenados son elegidos arbitrariamente, un estado de esfuerzos puede tener un sinnúmero de estados de esfuerzos equivalentes, uno para cualquier orientación posible. Esto significa que para un mismo cuerpo con las mismas cargas, el estado de esfuerzos cambia si se cambia la orientación de los ejes de referencia; por lo tanto, la matriz de esfuerzos cambia al cambiar la orientación, porque vemos diferentes componentes de las mismas fuerzas. El cambio de la matriz de esfuerzos puede ser tal que una o más componentes de esfuerzos pueden aparecer o desaparecer de acuerdo con la orientación [2.4].

2.3 Tipos de Falla

La fractura es la separación o fragmentación de un sólido bajo la acción de una carga externa, a través de un proceso de creación de nuevas superficies de fractura. Para fracturar un material se requiere incrementar la carga progresivamente hasta que un proceso de nucleación y propagación de grietas ocurra. Se puede fracturar un componente dependiendo de las condiciones de carga, geometría del cuerpo y de las propiedades del material, puede ser necesario sostener o incrementar la carga después de que se hayan iniciado las grietas; mientras que en otros casos basta solo con alcanzar el punto de iniciación de la grieta, misma que se propagara espontáneamente. La fractura se puede iniciar a partir de una grieta preexistente en el material, es ahí donde la etapa de nucleación es suprimida y el proceso se reduce a iniciar la propagación de la grieta [2.5].

Es importante señalar que para que la fractura ocurra no es necesario que el esfuerzo de iniciación y propagación de grietas este presente en todo el volumen del cuerpo, basta con que alcance una región estrecha para que la fractura ocurra; lo cual se conoce como principio de ruptura de una cadena que establece que: "para romper una cadena, basta romper un eslabón".

El hecho de que una fractura pueda iniciar en regiones pequeñas de un componente y también que pueda ocurrir con esfuerzos menores de los de diseño, le dan sus características de ser súbitas, inesperada y catastrófica. Estas características son las que la hacen hoy en día objeto de estudio; conocerla y comprenderla mejor podrá ayudar a prevenirla y predecirla con mayor exactitud, lo que beneficiara en mayor seguridad para la industria y la vida diaria.

Desde el punto de vista del comportamiento de los materiales, se reconocen dos tipos de fractura, dependiendo de la cantidad de deformación plástica previa, estas son:

Fractura frágil: Este tipo de falla, es asociada a la propagación rápida sin una deformación plástica excesiva a niveles de esfuerzos inmediatamente abajo del esfuerzo de fluencia del material. En la práctica, la mayoría de los casos de fractura frágil muestran una limitada deformación plástica en la punta de la grieta, cabe señalar que los metales que usualmente muestran un comportamiento dúctil, pueden llegar a comportarse de un modo frágil con una propagación de grieta rápida e inestable.

Fractura dúctil: Esta fractura viene precedida por una deformación plástica; es lenta y generalmente resulta de la formación y unión de vacíos, los cuales, son provocados por esfuerzos de tensión prolongados entre las partículas. El proceso de fractura de una grieta dúctil, es generalmente irregular y el gran número de pequeños huecos presentes da a la superficie de fractura una apariencia fibrosa.

La figura 2.4 presenta en forma esquemática dos cuerpos con fractura frágil y dúctil. La clasificación de las fracturas en frágiles y dúctiles es estrictamente ingenieril, ya que en algunas fracturas de aspecto frágil, puede existir una intensa deformación plástica, solo que está localizada en una región pequeña alrededor de la grieta y el resto del material permanece sin deformación plástica.

Es importante señalar que se le ha dado mayor atención a la fractura frágil por sus características de ser súbita, catastrófica y de ocurrir a esfuerzos por debajo de los esfuerzos de diseño, aunque en la actualidad, la fractura dúctil también a sido estudiada, en particular en aquellos casos en los que se utilizan materiales de baja resistencia y donde los niveles de esfuerzo son altos. En la práctica ambos tipos de fractura pueden llegar a presentarse en un mismo componente fallado [2.5].

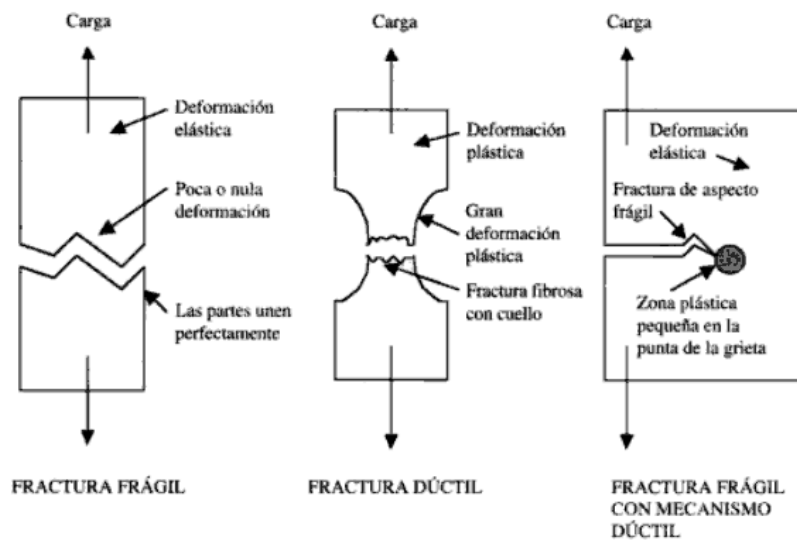


Figura 2.4.- Clasificación de la fractura, desde el punto de vista de ingeniería.

2.4. Consideraciones de la mecánica de fractura para el diseño

En el diseño generalmente se busca prevenir la deformación plástica, ya que una pieza deformada plásticamente no cumplirá su función eficientemente. Como la fractura es una etapa posterior a la deformación plástica, se supone que un diseño contra deformación plástica automáticamente es un diseño contra fractura. Este criterio está basado en el comportamiento típico esfuerzo-deformación de los materiales, cuya forma más simple es el ensayo de tensión uniaxial, el cual se muestra en la figura 2.5. En esta figura se observa que en un material sometido a un esfuerzo de tensión, primero ocurre una deformación elástica, cuya magnitud es proporcional al esfuerzo (la constante de proporcionalidad es el módulo elástico E), seguida de una deformación plástica, después de sobrepasar el *esfuerzo de cedencia* (σ_0).

Durante la deformación plástica, el esfuerzo para continuar la deformación se incrementa debido al endurecimiento por deformación, hasta alcanzar un valor máximo, llamado *resistencia máxima* ($\sigma_{m\acute{a}x}$). Después de este punto el esfuerzo decrece, porque se forma una constricción en la sección transversal de la pieza, llamada *cuello* hasta llegar al punto de fractura. La deformación máxima hasta el punto de fractura se conoce como *ductilidad* [2.5].

El análisis de esfuerzos en ingeniería normalmente es realizado considerando que el material es un continuo, esto es, que no existen huecos, grietas ni defectos en el material y por lo tanto los esfuerzos generados por las cargas externamente impuestas existen en el total del área de la sección donde son transmitidos. Este tipo de análisis es conocido como mecánica del medio continuo. De acuerdo con la mecánica del medio continuo, y considerando el comportamiento esfuerzo-deformación en tensión uniaxial (figura 2.5), el análisis del comportamiento mecánico sigue el siguiente procedimiento:

1. Definición de la geometría de la pieza o estructura.
2. Definición o cálculo de las cargas.
3. Cálculo o medición de los esfuerzos.
4. Cálculo de los desplazamientos y deformaciones resultado de los esfuerzos generados.

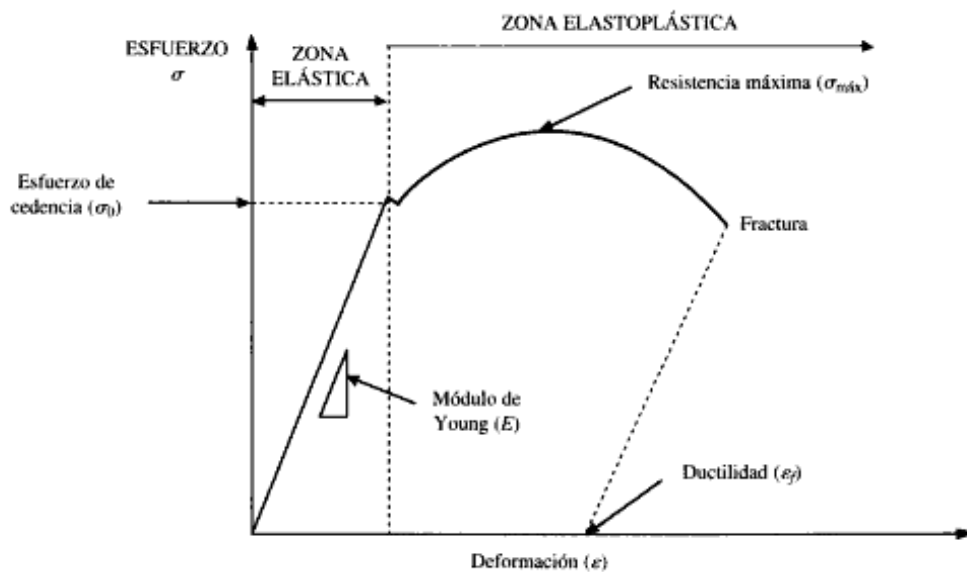


Figura 2.5.- Comportamiento típico esfuerzo-deformación de un material en tensión uniaxial.

La base del diseño de un componente con referencia a la mecánica del medio continuo es que el componente tenga la capacidad de soportar y transmitir cargas que generen esfuerzos menores a su resistencia mecánica. Para esto se considera el área de sección transversal, la carga aplicada y el esfuerzo generado. Estos tres factores están relacionados en forma general por la definición matemática del esfuerzo, que es:

$$\sigma = F/A \quad (2.1)$$

Donde σ es el esfuerzo, F es la carga externa que actúa sobre el componente y A es la magnitud del área de la sección transversal. El criterio general del diseño es usualmente:

Si $\sigma > EMP$, el componente es propenso a la falla

Donde EMP es el *esfuerzo máximo permisible*. En el diseño, por lo general se busca prevenir la deformación plástica, ya que una pieza deformada plásticamente no cumplirá su función de manera eficiente; por lo que el esfuerzo máximo permisible a considerar en la estructura es el límite de cedencia (σ_0). Así, en el diseño, se toma en cuenta tres variables que ilustra la figura 2.6, que son: la resistencia del material, definida por sus propiedades en tensión, la geometría, caracterizada por la forma y tamaño de la sección transversal que soporta los esfuerzos, y las cargas, para las cuales considera los valores normales de servicio y sobrecargas eventuales [2.1].

Para compensar la presencia de esfuerzos adicionales introducidos durante la fabricación, ensamble o servicio, el esfuerzo máximo permisible o esfuerzo de diseño se calcula dividiendo la resistencia máxima del material (límite elástico o resistencia máxima) entre un factor de seguridad, el cual típicamente varía de 1 hasta 10, dependiendo del tipo de aplicación, servicio, calidad del material, etc. Entre más desconfianza se tenga acerca de las cargas en servicio y calidad del material y entre más graves sean las posibles consecuencias de una falla, más alto es el factor de seguridad.



Figura 2.6.- Variables de diseño por mecánica del medio continuo.

En la práctica, al diseñar y poner en servicio un componente estructural o mecánico, se definen al menos tres niveles de esfuerzos, como se muestra en la figura 2.7. En casos muy especiales, el diseño se realiza contra colapso plástico, el cual, es la fractura precedida de la deformación plástica de la totalidad del componente: en este caso el esfuerzo alcanza la resistencia última a la tensión en la sección transversal del material y la falla ocurre cuando el material agota su capacidad de continuar deformándose plásticamente [2.1].

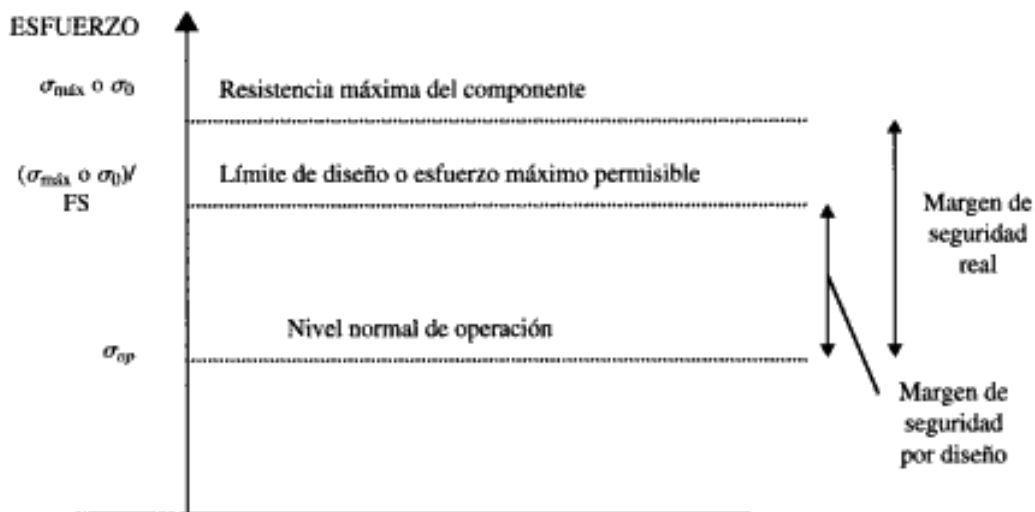


Figura 2.7.- Definición de los niveles de esfuerzo en el diseño.

2.5. Consecuencia de las grietas

Cuando se encuentra una grieta en una estructura los desplazamientos y las deformaciones serán mayores en la región de la grieta; habrá una concentración de esfuerzos en el extremo de la misma, lo cual producirá una deformación local muy superior a la deformación global y por último, las sustancias agresivas del ambiente encontrarán una trayectoria al interior del material. Esto trae consigo las siguientes consecuencias:

- Reducción de la capacidad de soportar cargas
- Desempeño inadecuado
- Reducción en la vida útil

Además de las consecuencias anteriores, que de por si son bastantes severas, la experiencia ha demostrado que el considerar la presencia de grietas en una estructura, es muy importante porque una grieta potencialmente conduce a una falla que por lo general es inesperada y catastrófica, y cuando las condiciones de servicio propician la propagación de grietas, el periodo de tiempo en que una grieta que se propaga hasta ocasionar una falla, constituye el límite de la vida útil del componente [2.1].

Como la grieta es una discontinuidad en el cuerpo, la mecánica del medio continuo no es aplicable para el análisis de un cuerpo agrietado, y por ello se desarrollo la mecánica de fractura. La mecánica de la fractura tiene por lo tanto dos objetivos principales:

1. La determinación de la resistencia mecánica de un cuerpo agrietado, denominada *resistencia residual*.
2. La predicción de la rapidez de propagación de grietas, con lo que se puede determinar la *vida residual*.

La principal aportación de la mecánica de fractura es el poder establecer si un componente estructural o mecánico que contiene grietas puede seguir trabajando bajo las condiciones de carga normales de operación y durante cuánto tiempo.

La inevitabilidad de la presencia de grietas en estructuras y componentes mecánicos por una parte y los desarrollos de la mecánica de fractura por otra, han permitido la reciente introducción del concepto de *integridad*, que puede definirse como la capacidad de un componente para desempeñar la función para la cual fue concebido en función de su contenido de defectos. La evaluación de la integridad requiere por lo tanto de un *análisis de integridad*, que es un procedimiento a través del cual se realiza la inspección no destructiva para determinar el contenido de defectos, la recopilación de los datos de diseño y condiciones de operación y el análisis del comportamiento de los defectos, para que, apoyado en la mecánica de fractura, se determine la aptitud para el servicio, en términos de la resistencia residual y la vida remanente [2.1].

2.6. Introducción a la Mecánica de fractura

El objetivo fundamental de la Mecánica de Fractura [2.6] puede definirse como la predicción de las condiciones con las cuales una grieta, en un cuerpo de configuración geométrica conocida y bajo la influencia de un determinado sistema de cargas, comienza a propagarse y se torna eventualmente inestable. La determinación de tales condiciones tiene como requisito el conocimiento de las propiedades fractomécnicas del material en cuestión a través de sus parámetros característicos K_{IC} , G_{IC} , COD_{IC} , J_{IC} , curvas J-R, entre otros. La mecánica de Fractura, establece los posibles modos de falla, cuantifica la importancia de los efectos y especifica los materiales apropiados para una aplicación dada, dicho en otras palabras, la Mecánica de Fractura proporciona las herramientas necesarias para determinar la resistencia de una estructura cuando en ella se ha detectado una grieta.

La exactitud y validez del análisis, dependen de la precisión con que han sido determinados los parámetros característicos, del valor y forma de aplicación de las cargas, por lo que estos deben de corresponder lo más aproximado posible a las condiciones que el material presentará en el elemento estructural real. Para efectuar un análisis completo y confiable de fractura, es necesario contar con los estudios siguientes [2.7]:

a)- Conocimiento de los elementos mecánicos aplicados, apoyándose en las expresiones de resistencia de materiales, y con algún método numérico computacional, como el Método del Elemento Finito, se analiza un modelo sometido a carga para obtener los esfuerzos en la localidad de interés.

b)- Conocimiento de las propiedades del material, es necesario conocer la resistencia a la fractura del material, para establecer el comportamiento real de la estructura.

c)- Conocimiento de la configuración geométrica (dimensiones y forma) del defecto, lo que se determina por medio de métodos de inspección.

d) Conocimiento de la Mecánica de Fractura, cuando se analiza un componente agrietado, se puede conocer el comportamiento de la grieta, obtener el campo de esfuerzos en el punto de interés y posteriormente calcular los parámetros de fractura.

Estos estudios se basan en la determinación del campo de esfuerzos alrededor de la grieta y en los cambios de energía almacenada que tienen lugar durante el proceso de agrietamiento y fractura. Cuando el análisis está fundamentado en un comportamiento elástico lineal, se aplica la *Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE)*, además, es válida cuando la deformación plástica está limitada a una pequeña región alrededor de la grieta, de lo contrario hay desviaciones en la linealidad y ya que el comportamiento plástico es no lineal, se aplica la *Mecánica de Fractura Elasto-Plástica (MFEP)*.

La mecánica de fractura es la parte de la mecánica de sólidos que relaciona el tamaño y forma de una grieta y las fuerzas o cargas que conducen a la fractura de un componente de forma y dimensiones definidas. Para esto, se apoya en el cálculo de la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos alrededor de una grieta y en el establecimiento de los balances de energía que tienen lugar durante la extensión de una grieta. Existen varias metodologías de análisis de fractura, dependiendo de la extensión de la deformación plástica que precede a la fractura. De acuerdo con la extensión de la deformación plástica, las categorías de la fractura (figura 2.8) [2.1] son:

1. Fractura lineal-elástica: Es cuando el tamaño de la zona plástica está limitada a una pequeña región frente a la punta de la grieta y la deformación del resto del cuerpo es elástica.

2. Fractura elasto plástica: Es cuando la zona plástica se extiende en el resto del ancho de la pieza, permaneciendo como una región relativamente estrecha alrededor del plano de la grieta.

3. Colapso plástico: Es la fractura precedida de la deformación plástica de la totalidad del componente; en este caso el esfuerzo rebasa la resistencia última a la tensión en la sección transversal del material y la falla ocurre cuando el material agota su capacidad de seguir deformándose plásticamente.

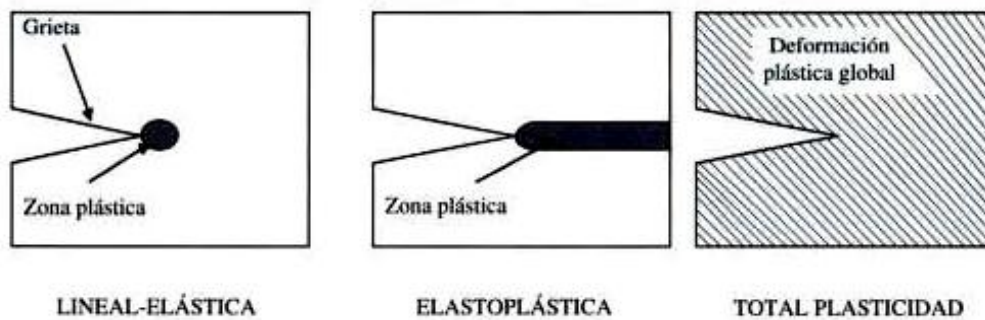


Figura 2.8.- Categorías de fractura.

La Mecánica de Fractura considera que el proceso de fractura inicia con una grieta que se propaga hasta la separación final o fragmentación de la pieza. La propagación se considera *estable* cuando la grieta puede detenerse al disminuir o desaparecer los esfuerzos y si la grieta se propaga de manera rápida, autoacelerada e imposible de detener, entonces la propagación es *inestable*.

La mecánica de fractura también clasifica la fractura en función de su dependencia del tiempo en:

Fractura estática: Es la fractura bajo una sola aplicación de carga, relativamente independiente del tiempo y con rapidez de propagación. Estos tipos de fractura incluyen la fractura frágil, la ruptura dúctil y el colapso plástico.

Fractura retardada o propagación de grietas: Es la fractura donde la propagación de las grietas transcurre a través del tiempo o por la acción de cargas fluctuantes o repetitivas. Es de carácter estable e incluye la fatiga, la propagación de grietas por termofluencia y el agrietamiento por corrosión y esfuerzos.

2.6.1 Modos de fractura

La mecánica de la fractura se basa en el cálculo del campo de esfuerzos y deformaciones alrededor de una grieta, los cuales provocan el desplazamiento relativo de las superficies de fractura en un cuerpo. La figura 2.9 muestra los tres modos de carga, mediante los cuales se pueden representar los estados de carga generales a los que esta sometido un cuerpo agrietado, incluyendo el estado tridimensional [2.8]:

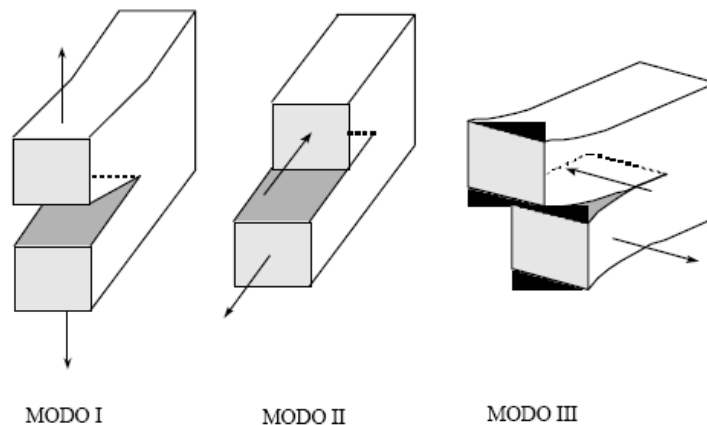


Figura 2.9.- Esquema de los modos de carga en fractura.

Modo I o modo de apertura, en el cual la grieta se abre debido a la aplicación de tensiones normales al plano de fractura.

Modo II o modo deslizante, en el que debido a la aplicación de tensión cortante en el plano de fractura, se producen desplazamientos longitudinales de las superficies en dicho plano.

Modo III o modo de rotura transversal que corresponde al desplazamiento de las superficies de fractura en sentidos opuestos, debido a la aplicación de tensión cortante en planos diferentes al plano de fractura.

La situación más compleja corresponde a una combinación de los tres modos de agrietamiento anteriores.

2.7. Teoría de falla de Griffith

El aspecto fundamental de la mecánica de fractura es poder definir si una grieta existente en un material de cierta estructura permanecerá estable o si por el contrario se prolongará bajo ciertas condiciones de tensión. Para poder predecir este comportamiento hay dos enfoques básicos, el primero en términos de balance de energía y el segundo en términos del campo de tensiones.

El criterio energético de propagación de grietas constituye la base de la mecánica de fractura y fue planteado por Griffith [2.9] y a partir de la solución de problema elástico de tensiones en el vértice de una cavidad elipsoidal en un medio semi-infinito. La solución elástica indica que a medida que los vértices de la elipse se hacen más agudos, las tensiones en este punto tienden a infinito independientemente de que el valor de la tensión aplicada sea muy bajo. Como el caso es similar al de una grieta en un modo semi-infinito, Griffith concluyó que debido a tal singularidad, no podría utilizarse la tensión como criterio de extensión de grietas sino que el problema debía plantearse en términos de balance de energía.

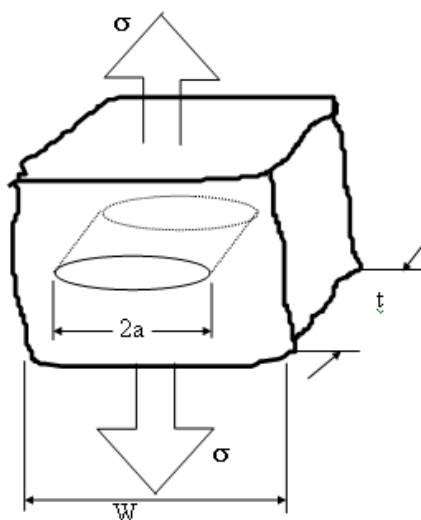


Figura 2.10.- Placa de espesor t con una grieta en su centro de longitud 2a.

Para analizar la formulación de Griffith considérese una placa semi-infinita homogénea e isotrópica, de módulo elástico E , con una grieta central de forma elíptica de longitud de $2a$, que es deformada elásticamente por tensiones de tracción (σ) como se muestra en la figura 2.10. En este caso, a partir de la solución de Inglis [2.10], Griffith encontró que la energía elástica (U) almacenada en la placa por unidad de espesor es:

$$U = \pi^2 \sigma^2 a^2 / E \quad (2.2)$$

Y definió la energía de superficie (W) como:

$$W = 4a\gamma_s \quad (2.3)$$

Donde:

γ_s , es la energía específica de superficie

$4a$, es al área de la superficie de agrietamiento.

Cuando la grieta comienza a incrementar su longitud, entra en un estado de equilibrio inestable bajo las tensiones aplicadas y el sistema mecánico transfiere energía de la zona no fracturada a la fractura, a través de un proceso de conversión de energía elástica en energía de superficie. Esta equivalencia de energía se puede expresar matemáticamente como:

$$dU/da = dW/da \quad (2.4)$$

Como se explica posteriormente mediante balance de energía, el término dU/da refleja implícitamente una reducción en la energía elástica almacenada por la placa, debida a la extensión de la grieta y por tal razón en la ecuación anterior no se incluye un menos en la igualdad.

Derivando (2.2) y (2.3) con respecto a la longitud de grieta se tiene:

$$dU/da = (2\pi\sigma^2 a) / E \quad (2.5)$$

$$dU/da= 4\gamma_s \quad (2.6)$$

Reemplazando (2.5) y (2.6) en (2.4) se puede despejar la tensión, que en este caso corresponde a una tensión para la cual se inicia la prolongación de la grieta y se conoce como tensión de fractura de Griffith (σ_c):

$$\sigma_c= 2\gamma_s E/\pi a \quad (2.7)$$

De manera general, se puede decir que de acuerdo con el criterio de Griffith, para que una grieta se prolongue una longitud da , es necesario que la energía elástica liberada por tal prolongación sea igual o mayor a la energía de superficie que se requiere para que la grieta se prolongue, si la energía liberada es inferior a la energía necesaria para la propagación, entonces la grieta permanecerá estable.

Para el caso de una sola punta de grieta (condición usualmente analizada) solo se tendría la mitad de la placa y por lo tanto las ecuaciones (2.5) y (2.6) quedan de la siguiente forma respectivamente:

$$dU/da= (2\pi\sigma^2 a)/E \quad (2.8)$$

$$dW/da= 2\gamma_s \quad (2.9)$$

La tensión de fractura de la ecuación (2.7) no se ve afectada, pues por simetría es igual analizar la placa completa o la mitad de ella.

2.8. Tasa de Liberación de energía

El criterio de extensión de grietas de Griffith puede generalizarse en términos de balance de energía disponible (suministrada fundamentalmente por las fuerzas externas) y energía requerida para que se presente la extensión.

La energía disponible para la extensión de grieta usualmente se denomina *tasa de liberación de energía (G)* y como lo estableció Griffith, es igual a dU/da , de tal manera que la ecuación (2.8) se puede expresar como:

$$dU/da = (\pi\sigma^2 a) / E = G \quad (2.10)$$

Por su parte, la energía requerida (dW/da), también conocida como energía de fractura o tasa crítica de liberación de energía (G_{IC}) es una propiedad del material que se puede considerar constante en comportamiento elástico. Por la forma como está expresada, tiene dimensiones de fuerza por unidad de extensión de grieta y por eso también se le denomina *fuerza resistente al agrietamiento (R)*.

La condición de G_{IC} se presenta cuando la tensión σ adquiere un valor crítico σ_c , para el cual $dU/da = dW/da$ y por lo tanto de (2.10):

$$dW/da = R = G_{IC} = (\pi\sigma_c^2 a) / E \quad \text{ó} \quad \sigma_c = (G_{IC} E) / \pi a \quad (2.11)$$

Así, el criterio de fractura es el siguiente:

$$\text{Si } G < G_{IC}, \text{ entonces } da=0, \text{ no hay extensión de grieta (estable)} \quad (2.12)$$

$$\text{Si } G_I = G_{IC}, \text{ entonces } da \text{ es mayor o igual, posible extensión cuasi-estática de grieta} \quad (2.13)$$

$$\text{Si } G_I > G_{IC}, \text{ entonces } da > 0, \text{ crecimiento dinámico de grieta (inestable)} \quad (2.14)$$

2.9. Factor de Intensidad de Esfuerzos

La base fundamental de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica [2.11] es que, para el análisis del comportamiento de la grieta basta con conocer el valor del Factor de Intensidad de Esfuerzos (FIE). Uno de los objetivos de la Mecánica de Fractura Lineal, es predecir el comportamiento de las grietas. Irwin [2.12] desarrolló uno de los más importantes avances de la MFLE al formular el problema de extensión de grietas en términos del estado de tensiones del material cerca de la punta y probó que este enfoque es en esencia igual al enfoque energético y que existe relación entre el uno y el otro.

Irwin dedujo que el proceso de fractura no podía concentrarse en un solo punto como lo plantea la teoría elástica, sino que se presenta en una zona pequeña próxima a la punta, que denomino zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF), la cual, por el efecto de la deformación, absorbe gran cantidad de energía y mantiene las tensiones dentro de un valor finito.

Con el fin de determinar la distribución de tensiones alrededor de la punta de la grieta, Irwin acudió a la función de tensión de Airy (Ψ), que es una función especial y que en este caso debe satisfacer simultáneamente las condiciones particulares de tensiones, deformaciones y de compatibilidad de tensión-deformación que se presentan en ese sector.

Para la solución de la función de tensión de Airy se pueden usar diferentes funciones complejas, Si el agrietamiento es del modo I, resulta conveniente usar la solución propuesta por Westergaard [2.13], en cuyo caso el campo de tensiones alrededor de la punta de la grieta (figura 2.11) está dado por:

$$\sigma_x = \sigma\sqrt{a/2r} \cos \theta/2 [1 - \text{sen } \theta/2 \text{ sen } 3 \theta/2] \quad (2.15)$$

$$\sigma_y = \sigma\sqrt{a/2r} \cos \theta/2 [1 + \text{sen } \theta/2 \text{ sen } 3 \theta/2] \quad (2.16)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma\sqrt{a/2r} \text{sen } \theta/2 \cos \theta/2 \cos 3 \theta/2 \quad (2.17)$$

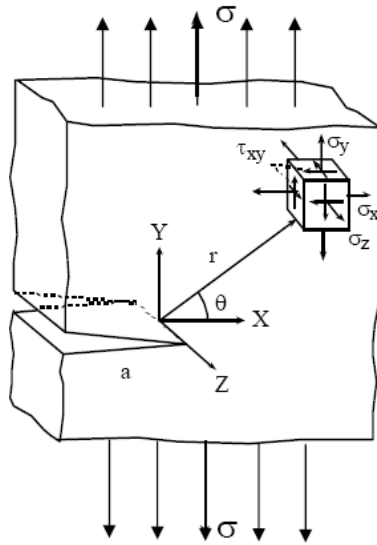


Figura 2.11.- Estado tensional en las proximidades del fondo de fisura.

O de forma general por:

$$\sigma_{ij} = (K_I / \sqrt{2\pi r}) f_{ij}(\theta) \quad (2.18)$$

Donde:

$f_{ij}(\theta)$, es una función conocida de θ .

K_I es el factor de intensidad de tensiones para el modo I.

Este factor puede expresarse como:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{a} \quad (2.19)$$

Donde:

a , es la longitud de la grieta inicial.

β , es un factor adimensional.

Para una placa infinita β corresponde a $(\sqrt{\pi})$ y en tal caso:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.20)$$

Para un elemento de tamaño finito, β depende de la longitud de la grieta y de la geometría del cuerpo sometido a tensión, que de manera general se expresa como la longitud (L) de una de sus dimensiones.

Usualmente los FIE de estos elementos se expresan en términos del FIE de la placa finita, de tal manera que el factor ($\sqrt{\pi}$) se saca de β y la ecuación (2.19) se expresa como:

$$K_I = \beta_{(a/L)} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.21)$$

La importancia del factor de intensidad de tensiones radica entonces en que al conocerse K_I , se puede determinar completamente el campo de tensiones alrededor de una grieta. Además K_I constituye un parámetro de similitud útil para poder comparar las características de agrietamiento de elementos de un mismo material pero con diferente geometría y diferente longitud de grieta, pues este principio indica que si dos grietas diferentes, en estructuras diferentes tienen una misma K_I y están sometidas al mismo modo de agrietamiento, se debe esperar un comportamiento similar en cuanto al avance o estabilidad de la grieta, debido a que el campo de tensiones es el mismo en ambos casos, por lo tanto, una grieta se propagará cuando el factor de intensidad de tensiones alcance un valor crítico, denominado factor de intensidad de tensión crítico (K_{IC}), también conocido como tenacidad a la fractura. El valor de K_{IC} puede obtenerse de ensayos de fractura para una condición en la cual la tensión es la crítica ($\sigma = \sigma_{cr}$) y se considera una propiedad del material, que de acuerdo con (2.21) está dada por:

$$K_{IC} = \beta_{(a/L)} \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (2.22)$$

De manera similar al enfoque de tasa de liberación de energía, el criterio de avance de una grieta en términos del factor de intensidad de tensiones está dado por las siguientes condiciones:

$$\text{Si } K_I < K_{IC}, \text{ entonces no hay extensión de grieta (estable)} \quad (2.23)$$

$$\text{Si } K_I = K_{IC}, \text{ entonces posible extensión cuasi-estática de grieta} \quad (2.24)$$

$$\text{Si } K_I > K_{IC}, \text{ entonces crecimiento dinámico de grieta (inestable)} \quad (2.25)$$

A partir de la ecuación (2.10) y (2.20), la relación entre la tasa de liberación de energía y factor de intensidad de tensiones en condición de tensión plana se puede expresar como:

$$G_{IC} = K_{IC}^2 / E \quad (2.26)$$

Y para el caso de deformación plana la relación es:

$$G_{IC} = (1-\nu^2) K_{IC}^2 / E \quad (2.27)$$

Donde ν es la relación de Poisson. Las relaciones (2.26) y (2.27) se conocen como las ecuaciones de Irwin, las cuales no solamente se cumplen para la condición crítica sino para cualquier otra condición inferior a la crítica, es decir, se trata de relaciones generales entre G_I y K_I .

2.10 Plasticidad en la punta de la grieta

La expresión obtenida para el estado tensional en la punta de la grieta solicitada en modo I es la siguiente:

$$\sigma_{ij} = K_I / \sqrt{2\pi} f_{ij}(\theta) \quad (2.28)$$

Esta debe ir acompañada de dos precisiones sobre su región de validez. Una es que representa el estado tensional sólo en la zona próxima a la punta de la grieta, de modo que en zonas más alejadas queda definido por las condiciones de contorno del problema. La segunda es que dicha expresión se singulariza en $r = 0$ y, en consecuencia, para distancias muy reducidas la tensión teórica toma un valor tendente a infinito que no es realista en materiales dúctiles, en los cuales aparece una notoria plastificación local.

En el plano de una grieta ($\theta = 0$) solicitada en modo I, al aplicar los criterios de plastificación al estado tensional dado por $\sigma_{ij} = K_I / \sqrt{2\pi} f_{ij}(\theta)$ se obtiene la extensión de la zona plastificada r_p que, en tensión plana, resulta:

$$r_p = 1 / 2\pi (K_I / \sigma_Y)^2 \quad (2.29)$$

Donde σ_Y , es el límite elástico del material.

En realidad, la zona plástica tiene una extensión superior a la obtenida por la aproximación previa, existiendo otras expresiones que se obtienen tras analizar el estado tensional en las proximidades de una grieta y a partir del equilibrio de esfuerzos. Todas ellas establecen el tamaño de la zona plástica como función del factor de intensidad de tensiones y del límite elástico. La más frecuentemente utilizada es la de Irwin, que en tensión plana viene dada por:

$$r_p = 2 r_p^* = 1/\pi (K_I/\sigma_Y)^2 \quad (2.30)$$

En deformación plana la diferente situación tensional conduce a un tamaño de zona plástica aproximadamente nueve veces más pequeño para materiales elasto-plásticos perfectos. Aplicando los criterios de plastificación a toda la región en torno a la punta de la grieta, se obtienen los contornos de las zonas plásticas como curvas cerradas. En coordenadas polares siguen funciones del tipo:

$$r_p(\theta) = K^2/\sigma_Y^2 f(\theta) \quad (2.31)$$

Siendo diferentes para los distintos modos de sollicitación. La representación gráfica en perspectiva de la zona plástica en la punta de la grieta en una placa solicitada en modo I y de suficiente espesor como para obtener deformación plana puede verse en la figura 2.12.

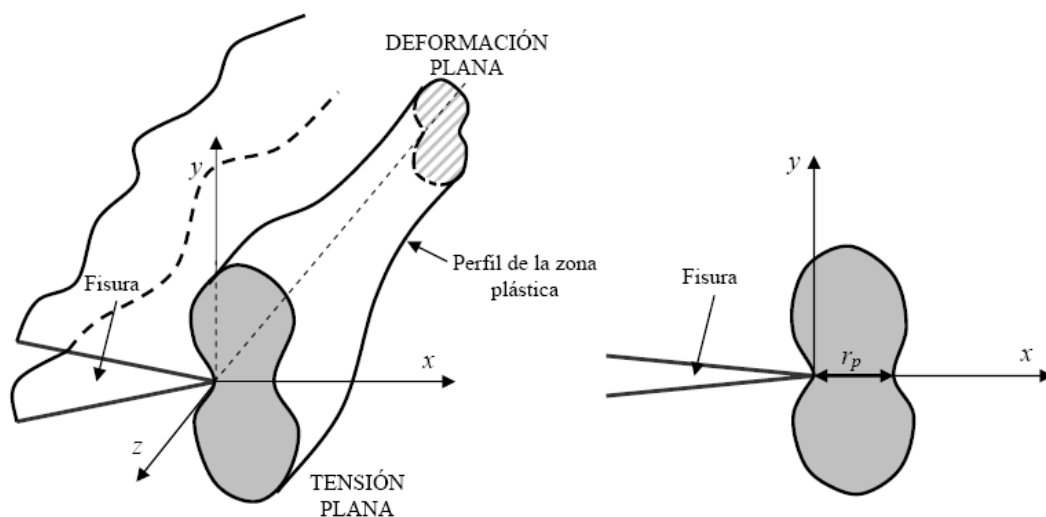


Figura 2.12.- Representación grafica de la zona plástica en la punta de la grieta en condición de tensión y deformación plana.

Si el tamaño de la zona plástica es pequeño ($r_p \ll a$) la aplicación de la MFLE en el establecimiento de criterios de rotura es suficientemente válida. Para extender el campo de validez de la MFLE se realiza una corrección a la longitud del defecto con objeto de tener en cuenta el efecto de la zona plástica. La longitud de la grieta ficticia es su valor real más la mitad de la extensión de la zona plástica en la dirección de avance de la grieta. Para condiciones de deformación plana, en la corrección de la longitud del defecto, r_p^* , se realiza una ponderación de tal manera que quede recogido el efecto de las dimensiones de la zona plástica en los extremos en tensión plana, resultando:

$$r_p^* = 1/6\pi (K_I/\sigma_Y)^2 \quad (2.32)$$

2.11. *Parámetros de fractura en régimen elastoplástico*

En aquellos materiales en que por su tenacidad y ductilidad la zona plástica se extiende de forma importante en torno al frente de la fisura, el crecimiento de la misma, y por tanto la fractura, ya no puede justificarse como un proceso que se produce cuando el factor de intensidad de esfuerzos alcanza un valor crítico, dado que este parámetro no representa las condiciones tensionales en el entorno del defecto.

Hacen falta nuevos parámetros que estén relacionados con los campos de esfuerzos y deformaciones de tal manera que la situación crítica de éstos, está definida por los micromecanismos de fractura. Los parámetros más empleados son la integral J y el COD (Desplazamiento de apertura de grieta).

2.11.1. *La integral J*

El proceso de fractura de materiales dúctiles, conlleva generalmente una deformación plástica que no es despreciable, sobre todo a temperatura ambiente y a baja velocidad de deformación. En este caso, la Mecánica de Fractura Elástico-Lineal no es aplicable por lo que se ha desarrollado un cuerpo teórico llamado Mecánica de la Fractura Elasto-plástica (MFEP), el cual está basado principalmente en el concepto de la Integral J [2.6].

Desde un punto de vista físico, es un balance de energía en la vecindad de la punta de la grieta [2.14], así, la integral “J” es la forma bidimensional de una de las integrales de contorno definidas por Eshelby [2.15]:

$$J = \int_{\Gamma} [W_s dy - T \cdot (dU / dx) ds] \quad (2.33)$$

Donde Γ es un contorno cerrado en un sólido sometido a un esfuerzo (en la figura 2.13, Γ es equivalente al contorno cerrado ABCDEF), T es el vector de tensión perpendicular a Γ , U es el desplazamiento en la dirección x, ds es un elemento de Γ y W_s es la energía de deformación por unidad de volumen.

Esta integral ha sido aplicada al estudio de grietas en cuerpos sólidos por Cheparanow [2.16] y Rice [2.17]. Se ha mostrado que en este caso, el valor de la integral J es independiente del contorno, $\Gamma_1 \circ \Gamma_2$.

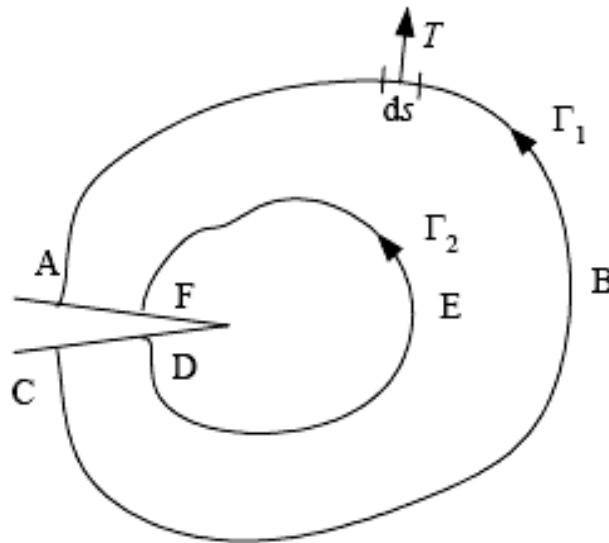


Figura 2.13.- Contorno alrededor de la punta de la grieta.

Rice derivó una forma de interpretación de la tasa de energía considerando que la integral J definida a lo largo de un contorno alrededor de la punta de la grieta es equivalente a la variación de energía asociada con la extensión de la grieta da:

$$J = \int_0^P (\partial v / \partial a)_p \partial p \quad (2.34)$$

Donde:

∂p diferencial de carga

∂a diferencial de la extensión de la grieta

∂v diferencial de desplazamiento

Y para condición de desplazamiento constante:

$$J = \int_0^P (\partial v / \partial a)_v \partial v \quad (2.35)$$

De la figura 2.14, puede deducirse que “J” equivale al área “A” entre las curvas carga-desplazamiento a las que esté sometida una pieza con una grieta de longitud “a” y una extensión Δa . Para un cuerpo de espesor B, “J” está dado por [2.17]:

$$J = 2A / B (W - a) \quad (2.36)$$

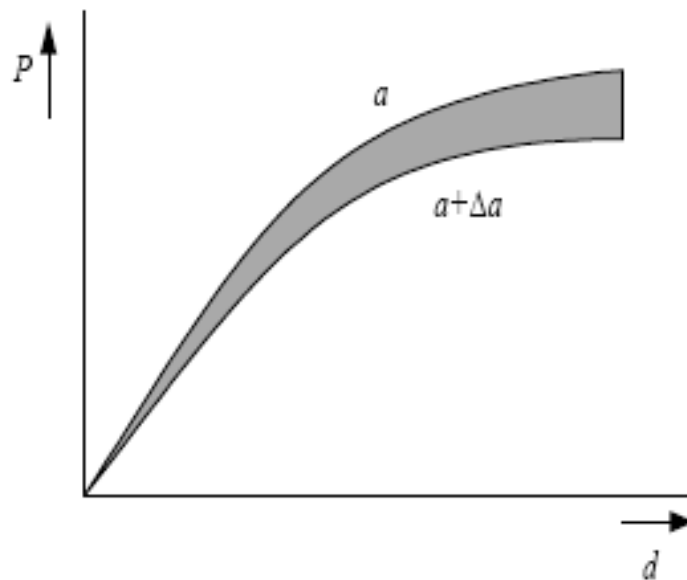


Figura 2.14.- Comportamiento elasto-plástico. Representación esquemática de la Integral J.

En realidad, “J” es la solución del problema elástico no lineal, por lo que el valor de la “ J_{IC} ”, determinado experimentalmente, depende del esfuerzo de cedencia y de la forma de la curva esfuerzo-deformación [2.18].

En su trabajo para generalizar una técnica de probeta única, Rice [2.19] separó la integral J en una componente elástica y una componente plástica:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (2.37)$$

Donde:

J_{el} es la componente elástica.

Sumpter y Turner [2.20] modificaron esta forma para dar:

$$J = \eta_{el}(U_{el}/B(W-a)) + \eta_{pl}(U_{pl}/B(W-a)) \quad (2.38)$$

Donde U_{el} y U_{pl} son, respectivamente las partes elásticas y plásticas del área debajo de la curva fuerza-desplazamiento (Figura 2.15) y n_{el} y n_{pl} son funciones de la relación entre longitud de grieta y anchura a/W . Se utilizaron las relaciones de la MFLE para determinar n_{el} mientras n_{pl} fue calculado mediante métodos numéricos.

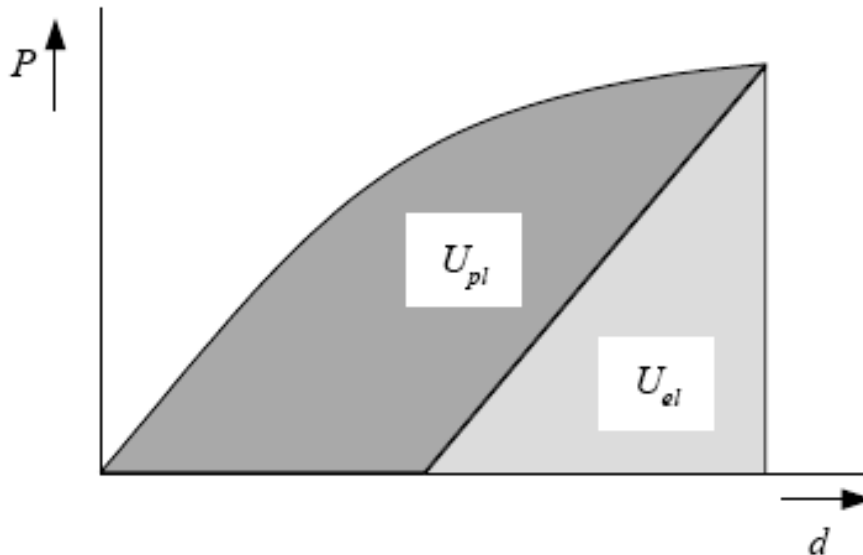


Figura 2.15.- Comportamiento elastoplástico. Representación de la energía debajo de la curva P-d y separación en un componente elástico y una componente plástica.

Para la región elástica, la Mecánica de Fractura Elástico Lineal asume la linealidad de la curva P-d:

$$P = [1/(C(a/W))] d \quad (2.39)$$

Donde C es la flexibilidad que es función únicamente de la longitud de grieta.

En este caso, se ha mostrado que:

$$\eta_{el} = (B/C) * (dC/da) \quad (2.40)$$

La expresión del factor de trabajo plástico se obtiene mediante el análisis de la carga límite P_L , que resulta en la expresión siguiente [2.21, 2.22]:

$$\eta_p = (W-a/WP_L) (\partial P_L / \partial (a/W)) \quad (2.41)$$

Turner [2.23] y Latzko [2.24] llevaron a cabo unos estudios analíticos y numéricos para evaluar n , n_{el} y n_{pl} para diferentes geometrías. Sus resultados sugieren utilizar un factor n global ($n = n_{pl} = n_{el}$) cuando el comportamiento no es ni elástico ni totalmente plástico.

En el caso de una probeta con una longitud de grieta igual a la mitad de la anchura de la probeta ($a/W=0.5$) y con un empalme de $S=4W$, se obtiene $n = n_{pl} = n_{el}$ [2.25, 2.26, 2.27], la ecuación (2.37) se simplifica:

$$J = J_{el} + J_{pl} = [(2U_T)/B(W-a)] \quad (2.42)$$

Donde U_T es la energía total debajo de la curva fuerza-desplazamiento.

2.11.2. Uso de J en análisis de Fractura

El uso de J en el análisis de fractura es ilustrado en la figura 2.16. Para un material elasto-plástico con una grieta de tamaño a_0 , es un principio si $P=0$, $J=0$ (punto O). Conforme la carga aumenta, J aumenta ($J>0$) y la punta de la grieta pierde su agudeza (punto A).

Al alcanzar un cierto valor de J , la grieta comienza a extenderse de modo estable (punto B). Este punto se refiere como J crítico J_C y puede ser usado como una medida conservadora de la tenacidad de fractura dúctil del material, pues se presenta antes de la inestabilidad. Al continuar aumentando la carga, la grieta continua creciendo, al igual que J . La variación de J con respecto a la cantidad de extensión de grieta se conoce como una curva J-R (figura 2.17).

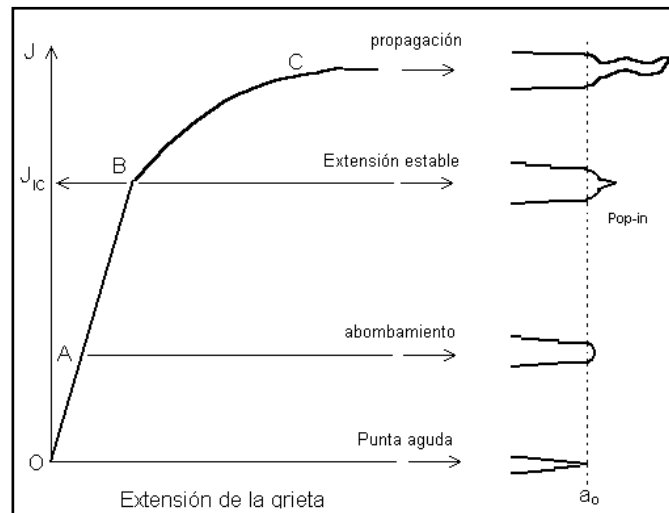


Figura 2.16.- Etapas de la fractura dúctil relacionadas con J .

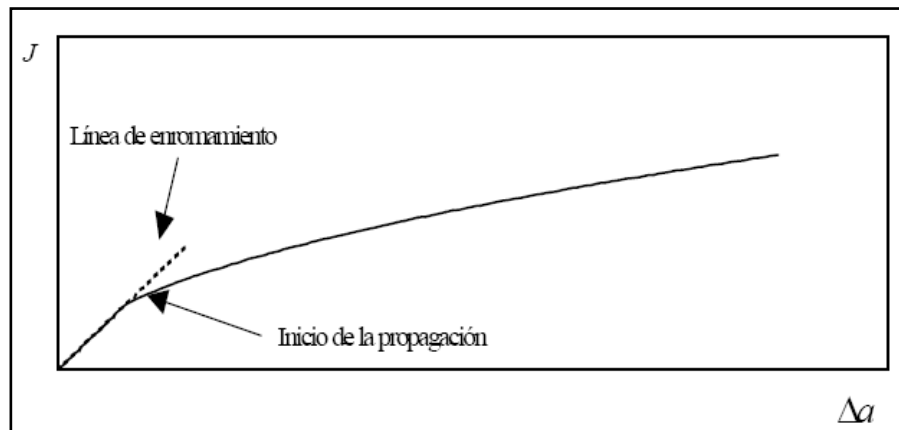


Figura 2.17.- Curva típica de resistencia a la fractura (J-R).

Como se puede observar en la figura 2.16. J_{IC} es el criterio de inicio de la propagación estable (pop-in), de manera que el criterio de iniciación de grietas con base en la integral J es cuando:

$$J > J_C \quad (2.43)$$

De acuerdo con el criterio de energía, la propagación inestable ocurrirá cuando la rapidez de conversión de energía disponible en la punta de la grieta supera la demanda de energía para extender la grieta, esto es expresado de forma matemática como:

$$dJ / da > dJ_R / da \quad (2.44)$$

Donde dJ_R es la J para una extensión dada de grieta tomada de la curva J-R. Paris propuso adimensionalizar el término dJ/da multiplicándolo por E/σ^2 para emplearlo como criterio de inestabilidad. A este término se definió como Modulo de Ruptura-Dúctil, T y se define por:

$$T = [\partial J / \partial a] [E/\sigma^2] \quad (2.45)$$

Donde σ puede ser el esfuerzo de cedencia o el esfuerzo de flujo, tomado como el promedio del esfuerzo de cedencia y el esfuerzo máximo a tensión, para materiales con considerable endurecimiento por deformación.

El análisis de la fractura puede realizarse usando J y T en forma combinada, ya que T es la pendiente de la curva J-R. El criterio de inestabilidad es que la variación de J con respecto al tamaño de la grieta en la estructura $(dJ/da)_{APL}$ no exceda la variación de J_C respecto al tamaño de grieta del material $(dJ/da)_{MAT}$ [2.18].

2.11.3. Limitaciones de J

El valor de J depende del esfuerzo de cedencia y de la forma de la curva de esfuerzo deformación, y estos dos aspectos dependen de la condición del material, por lo que J no es tan general en su aplicación como el factor de intensidad de esfuerzos. La aplicación de J esta limitada por el tamaño de la zona de proceso de fractura, que debe ser menor que la zona circundante donde J es válido. El tamaño de la zona de proceso (L) debe ser pequeño comparado con las dimensiones del cuerpo, además de que las condiciones de deformación plana deben ser mantenidas, de manera que el espesor (B) sea lo suficientemente grande. Para que las dimensiones de un cuerpo agrietado cumplan con una J válida deben ser:

$$L = 2J / \sigma_0 \text{ (mucho menor que la dimensión en el plano de fractura)} \quad (2.46)$$

$$B > J / \sigma_0 \text{ (para condiciones de deformación plana)} \quad (2.47)$$

La limitación más severa de J es que depende de las características del comportamiento elasto-plástico del material, es decir, depende del material, a diferencia de K que solo depende del tamaño de grieta, la carga y la geometría.

2.11.4. Desplazamiento de apertura de grieta (COD)

En 1968, Wells [2.28], descubrió que el grado de achatamiento de la grieta se incrementaba en proporción a la tenacidad del material. Esto permitió proponer el criterio de apertura de la punta de la grieta **COD** (**Crack Opening Displacement**) como una medida de la resistencia a la fractura. El concepto **COD** apareció tras la observación de que durante el proceso de carga de materiales elastoplásticos agrietados se va generando una importante separación de las superficies de la grieta en el extremo de la zona de cedencia inmediatamente próxima a la punta de la misma, como se observa en la figura 2.18.

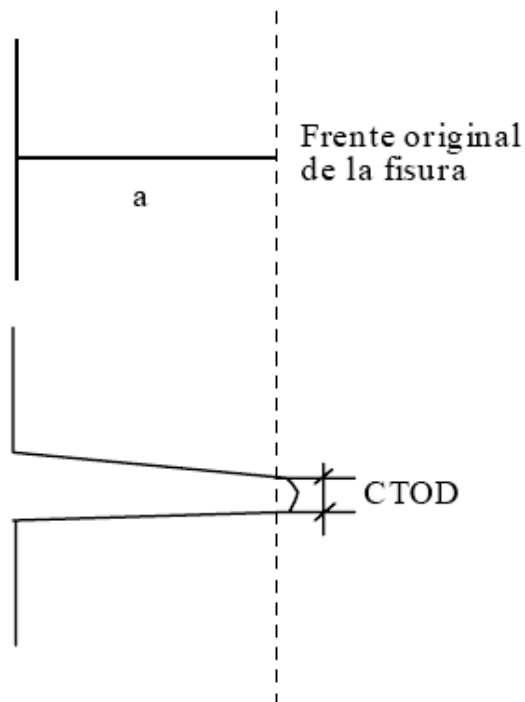


Figura 2.18.- Definición del parámetro COD.

El cálculo del COD se realiza mediante la expresión:

$$\text{COD} = \text{COD}_e + \text{COD}_p \quad (2.48)$$

El primer término es la componente elástica lineal del mismo, dada por:

$$\text{COD}_e = K_I^2 / \lambda E \sigma_Y \quad (2.49)$$

Donde λ es una constante adimensional que varía entre 1 y 2, dependiendo de la microestructura del material. El segundo, la componente plástica COD_p , se puede obtener por expresiones dependientes de la geometría, la longitud del defecto y la sollicitación.

Cuando el material agrietado alcanza un valor de **COD** crítico, COD_C , el material se rompe. Por ello se puede establecer un criterio de fractura en base al valor COD_C , que es característico del material y que se puede determinar mediante ensayos. El criterio de fractura basado en este concepto resulta útil en MFEP y puede ser enunciado en la forma general de otros criterios.

Existe fractura si:

$$\text{COD} \geq \text{COD}_C \quad (2.50)$$

El COD_C , como otros parámetros críticos, depende de la temperatura y de la velocidad de carga, y para su caracterización se requiere un espesor adecuado a partir del cual se convierte en variable propia del material:

$$B \geq 25 \text{COD}_C \quad (2.51)$$

2.12. Relación entre los parámetros G , K y J .

La razón de energía disipada (G) describe un comportamiento global, mientras que el Factor de Intensidad de esfuerzos (K) es un parámetro local. Las expresiones matemáticas de ambos criterios son:

$$K_I = Y \sigma (\pi a)^{1/2} \quad (2.52)$$

$$G_I = \pi \sigma^2 a / E \quad (2.53)$$

Posteriormente, Rice [2.13] generaliza el criterio energético para el caso elástico no lineal mediante la integral J definida como:

$$J = \int_{\Gamma} [W dy - T(dU / dx) ds] = 0 \quad (2.54)$$

Estos tres parámetros de fractura pueden relacionarse para el caso lineal elástico de la siguiente forma:

$$J_I = G_I = K_I^2 / E \text{ (Para esfuerzo plano)} \quad (2.55)$$

$$J_I = G_I = K_I^2 (1 - \nu^2) / E \text{ (Para deformación plana)} \quad (2.56)$$

Así J_{IC} puede relacionarse en deformación plana con G_{IC} y K_{IC} , mediante la siguiente ecuación:

$$J_{IC} = G_{IC} = K_{IC}^2 (1 - \nu^2) / E \quad (2.57)$$

También se pueden obtener relaciones similares para el modo II y III.

Esto es válido únicamente cuando el cuerpo se comporta de modo elástico y lineal, es necesario señalar que la ecuación anterior no es una igualdad, sino una equivalencia; es decir, indica que J_{IC} , G_{IC} y K_{IC} se presentan simultáneamente cuando va iniciarse la propagación de la grieta.

La ventaja de este enfoque consiste en que el parámetro “G”, queda expresado en función de los factores “K” que se encuentran calculados y tabulados para una gran cantidad de casos de importancia práctica. Bajo condiciones de plasticidad en pequeña escala, la extensión o propagación de la fisura se encuentra controlada por “K”.

2.13 Referencias

[2.1] González, V. (1998), "Mecánica de fractura, bases y aplicaciones", Editorial Limusa, S.A. de C.V. Colección Textos Politécnicos, Serie Tecnologías Mecánicas, pp. 9-20.

[2.2] Shigley J.E. and Mischke R.C. (1990), “Diseño en Ingeniería Mecánica”, Editorial Mc Graw Hill, S.A. de C.V., Quinta Edición, pp. 35-36.

[2.3] Beer P.F. and Johnston Jr. (1993), “Mecánica de Materiales”, Editorial Mc Graw Hill, S.A. de C.V., Segunda Edición, pp. 4-9.

[2.4] Velásquez González Jorge L. (1999), “Metalurgia Mecánica” Editorial Limusa, pp. 36-44.

[2.5] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, Gabriel Sánchez García, Ulises Figueroa López, Sandoval Palafox Francisco Javier (2002), “Manufactura, Ingeniería y Tecnología”, Editorial Pearson, Cuarta Edición, pp. 75-82.

[2.6] Urriolagoita, S.G. (1996), "Aplicación de la Mecánica de Fractura al caso de estructuras agrietadas sometida a carga de fatiga", Tesis de maestría mecánica, I.P.N. pp. 15-30.

[2.7] Riccardella, P.C. and Yukawa, S. (1991), "Twenty years of fracture mechanics and evaluation in the ASME nuclear code", Journal of pressure vessel technology, pp. 146.

[2.8] Edwals, H.L. and Wanhill, R.J. (1989), “Fracture Mechanics”, Edward Arnol Publication.

[2.9] Griffith, A. A. (1920), "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", Philosophical Transactions, Series A, Vol. 221, pp. 163-198.

[2.10] Inglis, C.E. (1913), "Stresses in plate due to presence of cracks and sharps corners". Transaction of the Institute of Naval Architects, 55, pp 219-241.

[2.11] Anderson, T.L., Ph.D. (1995), "Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications", Department of Mechanical Engineering, Texas A & M University College Station, Texas, Second Edition, CRC Press, pp. 3-27.

[2.12] Irwin G. R. (1958), Hanbduch dr Physik. vol. 6 Springer, Berlin, pp. 551.

[2.13] Westergaard H.M. (1939), "Bearing Pressures and Cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol. 6, pp. 49-53.

[2.14] Suresh S. (1991), "Fatigue of Materials" Published by the press Syndicate of the University of Cambridge, First Published pp. 165-173.

[2.15] Eshelby J.D. (1974), "Prospects of Fracture Mechanics", Sih, Van Helst, Broek, Ed., Noordhoff, pp. 69-84.

[2.16] Cheparanow G.P. (1967), "Journal of Applied Mathematics and Mechanics Translation", 31, pp. 504.

[2.17] Rice J.R. (1968), "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Journal of Applied Mechanics, 35, pp. 379-386.

[2.18] González, V. (1998), "Mecánica de fractura, bases y aplicaciones", Editorial Limusa, S.A. de C.V. Colección Textos Politécnicos, Serie Tecnologías Mecánicas, pp. 58-64.

[2.19] Rice J.R., Paris P.C. & Merkle J.G. (1973), "Flaw Growth and Fracture Toughness Testing", ASTM STP 536, pp. 231-245.

- [2.20] Sumpter J.D.G. & Turner C.E. (1976), "Cracks and Fracture", ASTM STP 601, pp.3-18.
- [2.21] Hashemi S. & Williams J.G. (1986), "Polymer Engineering and Science", 26, No. 11, pp.760-767.
- [2.22] Hashemi S. & Williams J.G. (1991), "Journal of Materials Science", 26, pp.621-630.
- [2.23] Turner C.E. (1980), "Fracture Mechanics", Twelfth Conference, ASTM STP 700, pp.314-337.
- [2.24] Latzko D.G.H., Turner C.E., Landes J.D., McCabe D.E. & Hellen T.L. (1984), "Post-Yield Fracture Mechanics", Second Ed., Elsevier Applied Science Publishers Ltd.
- [2.25] ASTM E813-81 (1981), "Standard Test Method for JIC, A Measure of Fracture Toughness", Annual Book of ASTM Standards, Part 10, ASTM, Philadelphia, pp.810.
- [2.26] ASTM E813-87 (1987), "Standard Test Method for JIC, A Measure of Fracture Toughness", Annual Book of ASTM Standards, Part 10, ASTM, Philadelphia, pp.968.
- [2.27] ASTM E1152 (1987), "Standard Test Method for JIC, A Measure of Fracture Toughness", Annual Book of ASTM Standards, Part 10, ASTM, Philadelphia, pp.825.
- [2.28] Wells A. A. (1968), "Unstable Crack Propagation in Metals Cleavage and Fast Fracture, Proceeding of the Crack Propagation Symposium" vol. 35, pp. 379-386.

Capítulo III

ANÁLISIS NUMÉRICO EXPERIMENTAL DE LA TRAYECTORIA DE PROPAGACIÓN DE GRIETAS.

Se plantea una metodología de análisis numérico para predecir la estabilidad direccional de propagación de grietas, utilizando los softwares ANSYS y FRANC. Además de esto, se lleva a cabo la construcción del marco de prueba experimental para validación de nuevos especímenes.

3.1. Técnica Experimental

En la figura 3.1 se muestra el arreglo del marco experimental y en la tabla 3.1. se presenta la descripción y función de los principales elementos señalados del arreglo. Este arreglo se consideró para la construcción del mismo y para el desarrollo del análisis numérico [3.1].

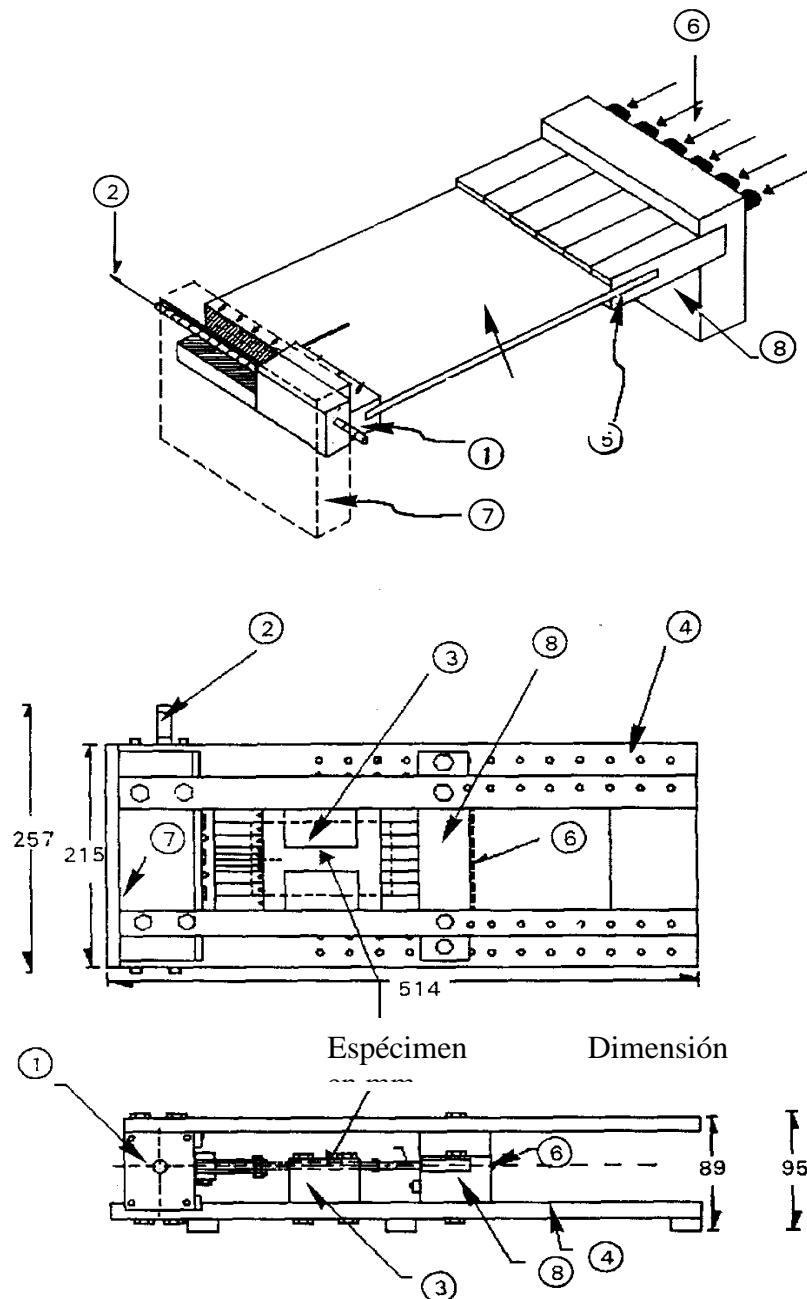


Figura 3.1.- Marco de prueba experimental.

No. de pieza	Nombre de componente	Función
1	Celda de carga de apertura	Placa que contiene un conjunto de cinco vigas a través del cual la carga es aplicada.
2	Perno de apertura	Tornillo con rosca derecha e izquierda por medio del cual se aplica la carga de apertura.
3	Bloques laterales	Bloques para evitar el pandeo en caso de especímenes delgados.
4	Base del marco	Marco para soportar el equipo completo.
5	Celda de carga transversal	Elementos para medir la carga transversal.
6	Pernos donde se aplica la carga	Tornillo para aplicar la carga transversal.
7	Marco de carga de apertura	Marco para sujetar las celdas de carga de apertura.
8	Marco de carga transversal	Marco para sujetar las celdas de carga transversal.

Tabla 3.1.- Componentes del marco de prueba.

La fuerza de apertura se transmite al espécimen por medio de un marco que asegura el sostenimiento de dos bloques, cada bloque contiene cinco vigas en cantiliver, además, la carga de apertura es transmitida al espécimen mediante cinco pernos en cada bloque como se muestra en la figura 3.2. Asimismo, la fuerza de compresión requerida para controlar la ruta de la grieta, es aplicada por medio de ocho dedos individuales, los cuales son conducidos por tornillos horizontales.

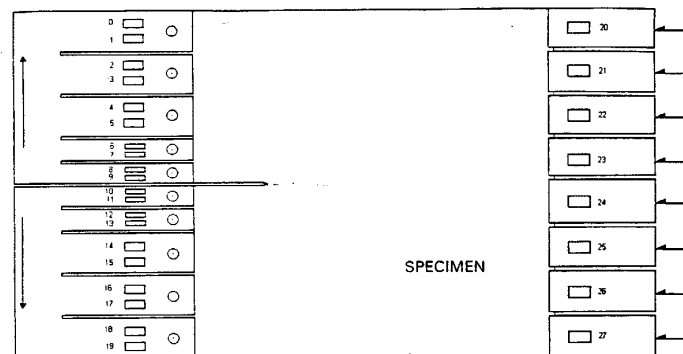


Figura 3.2.- Arreglo de pernos en cada bloque.

Para esto, las dimensiones de los especímenes más grandes que se pueden analizar en el marco de prueba son de 305 mm x 102mm x 6 mm y para los más pequeños 102 mm x 25 mm x 6 mm. Asimismo, la carga máxima que se puede aplicar en la dirección transversal es de 1500 N y una fuerza de 2700 N para la de apertura, ambas cargas se aplican independientemente.

En la figura 3.3 se muestra el marco de prueba experimental con el arreglo de las galgas extensiométricas, por medio de las cuales se calibra la aplicación de las cargas tanto de apertura como transversal.

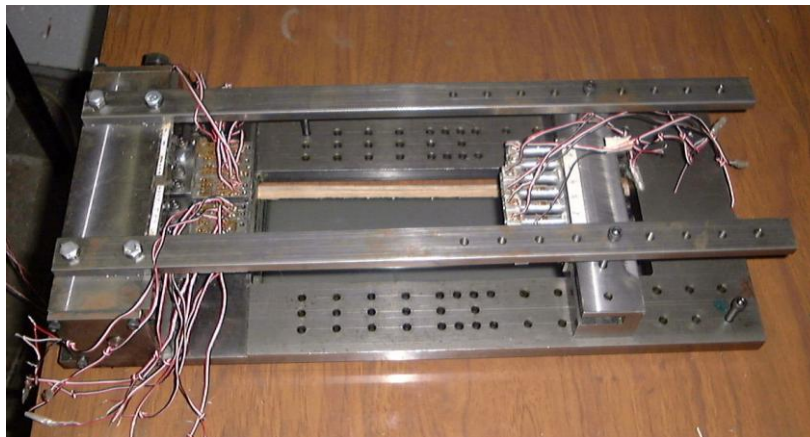


Figura 3.3.- Arreglo de galgas extensiométricas

3.2. Galgas Extensiométricas

Estos dispositivos son transductores pasivos, que aplicados sobre un espécimen, permiten medir la fuerza ejercida sobre él a partir de la deformación resultante. Así, fuerzas de compresión, tracción o torsión, aplicadas sobre materiales elásticos, generan deformaciones que son transmitidas a la galga, respondiendo ésta con una variación de su propia resistencia eléctrica.

Las galgas se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones a nivel industrial, de investigación en ingeniería y en todos los campos donde se requieran mediciones precisas de fuerza. Esas mediciones pueden ser de tres tipos:

- Estáticas: las referidas a soportes y estructuras resistentes sometidas a cargas fijas.
- Mixtas: cuando se realizan sobre soportes y estructuras sometidas a la acción de cargas de variación rápida.
- Dinámicas: realizadas sobre acciones de variación rápida: fenómenos de vibración, impacto, etc.

3.2.1. Principio de funcionamiento

Se basa en el efecto piezo-resistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material de que esta hecho y el diseño adoptado [3.2].

Si se considera un hilo metálico de longitud l , sección transversal A y resistividad ρ , su resistencia eléctrica R es:

$$R = \rho (l/A) \quad (3.1)$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R cambia, por tanto el cambio de R se puede expresar como:

$$dR = [A(\rho dl + l d\rho) - \rho d l A] / A^2 \quad (3.2)$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza F a una pieza unidimensional (siempre y cuando no se supere su límite elástico, figura 1), está dado por la ley de Hooke [3.3].

$$\sigma = F/A = E \cdot \epsilon = E (dl/l) \quad (3.3)$$

Donde E es modulo de elasticidad del material, denominado módulo de Young, σ es el esfuerzo uniaxial y ϵ es la deformación unitaria.

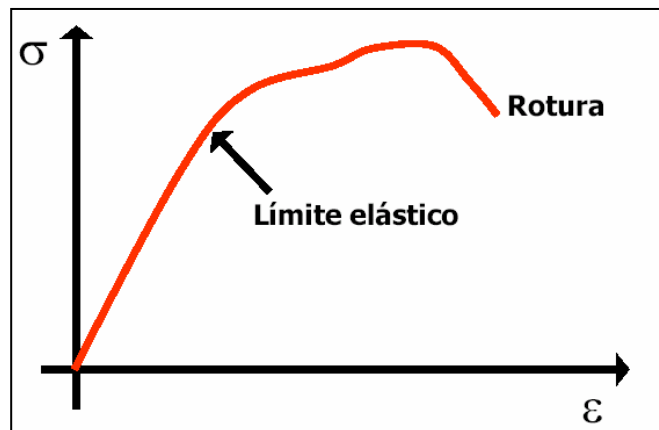


Figura 3.4.- Relación esfuerzo-deformación.

Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral a la deformación axial también es una propiedad del material, esta propiedad se llama razón de Poisson y se define como:

$$\mu = - (dD/D) / dl/l \quad (3.4)$$

Donde D es el diámetro del hilo y μ es denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0.5, en términos de la razón de Poisson tendremos:

$$dR/R = (dl/l)[1 + 2\mu] + (d\rho/\rho) \quad (3.5)$$

Los cambios en la resistencia se originan por la modificación de la geometría en la longitud o el área y el cambio en la resistividad. La dependencia de la resistividad en deformación mecánica se expresa en términos del coeficiente de piezo-resistencia π_1 definido por la siguiente expresión:

$$\pi_1 = (1/E) [(d\rho/\rho) / (dl/l)] \quad (3.6)$$

Por lo tanto el cambio en la resistencia es:

$$(dR/R)/(dl/l) = 1 + 2\mu + \pi_1 E \quad (3.7)$$

El cambio en resistencia de un medidor de deformación por lo general se expresa en términos de un parámetro determinado por el fabricante empíricamente llamado factor de galga, GF expresado como:

$$GF = (\delta R/R)/\epsilon \quad (3.8)$$

Relacionando las ecuaciones (3.7) y (3.8) se observa que el factor de galga depende de la razón de Poisson para el material del medidor y su piezo-resistividad.

Las mediciones de carga requieren detectar cambios muy pequeños de resistencia, el circuito de puente Wheatstone se usa predominantemente. La forma habitual de obtener una señal eléctrica como resultado de una medida empleando un puente de Wheatstone, es mediante el método de deflexión. En éste método, se mide la diferencia de voltaje entre ambas ramas o la corriente a través de un detector.

Existen tres tipos de montajes básicos: con una, dos y cuatro galgas. El uso de múltiples medidores permite compensar los efectos no deseados, como componentes de temperatura y deformaciones específicas.

En el circuito puente de la Figura 3.5, las cuatro resistencias representan medidores de deformación activos, la salida V_d esta dada por: [3.4]

$$(\delta V_d)/V = [(GF/4)]^* \epsilon \quad (3.9)$$

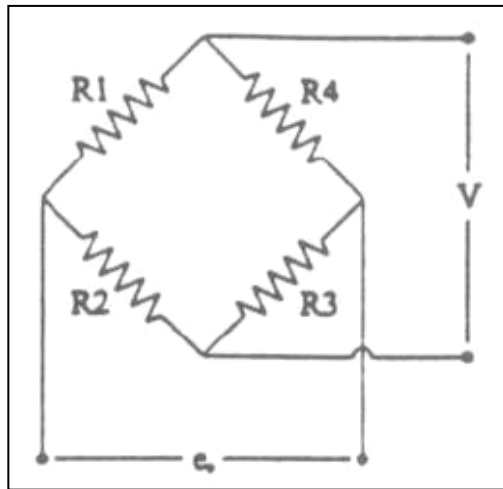


Figura 3.5.- Esquema de Puente Wheatstone.

Donde:

GF= Factor de la galga

ϵ = Deformación unitaria

3.3. Procedimiento para la instalación de galgas extensiométricas

3.3.1 Preparación de superficie

1.- Limpieza burda. Por medio de la aplicación desengrasante CSM-2 (figura 3.6) eliminar cualquier residuo de grasa que pueda haber en el área de adhesión de las galgas.



Figura 3.6.- Desengrasante CSM-2.

2.- Suavizar la superficie. Para eliminar todo tipo de pintura, corrosión, oxidación o cualquier otro contaminante, se debe realizar un proceso de lijado utilizando un papel de lija apropiado para el material y de un grano apropiado (figura 3.7). Para evitar hacer canales en el material este procedimiento debe hacerse en movimientos circulares y de preferencia usando primero un papel de lija más grueso y después uno más fino.



Figura 3.7.- Papel de lija SCP-3 400 GRIT.

3.- Marcar la superficie. La superficie del espécimen donde se van a aplicar las galgas debe marcarse ligeramente para poder alinear las galgas según la deformación que se desea medir.

4.- Limpieza fina. Cualquier residuo de lija, material o polvo generado en el proceso anterior debe ser eliminado cuidadosamente. Se pueden usar los mismos métodos usados en el punto 2. Se debe empapar una gasa (Figura 3.8) con solución M-PREP CONDITIONER A (figura 3.9), tomarla con pinzas de punta fina o 'tweezers' (Figura 3.10) y pasarla por la superficie una sola vez. Este procedimiento debe ser repetido una y otra vez hasta que la gasa no muestre señales de decoloración al pasarla por la superficie. La superficie debe dejarse seca y libre de residuos de gasa (no soplar o respirar cerca de la superficie y evitar tocarla ya que volverá a ensuciarse)



Figura 3.8.- Gasas.



Figura 3.10.- Tweezers.



Figura 3.9.- M-PREP Conditioner A.

5.- Alcalinidad óptima. La superficie debe ser tratada para controlar su pH. Se aplica un neutralizador líquido M-PREP NEUTRALIZER 5A (figura 3.11) libremente sobre la superficie limpia, se talla y seca con gasa o con palillos con punta de algodón. Tallar y secar debe hacerse siempre en una sola dirección y sin reutilizar el algodón o gasa.



Figura 3.11.- M-PREP Neutralizer 5A.

Si los pasos anteriores se siguieron con atención y cuidado, la superficie está ya lista para que las galgas se adhieran. A partir de este momento las galgas deben ser adheridas tan pronto sea posible para minimizar contaminación.

3.3.2. Adhesión de las galgas

1.- Posicionamiento de la galga. Tome la galga con unas pinzas de punta fina y colóquela en una superficie químicamente limpia con la superficie de adhesión hacia abajo. Tome un pedazo de cinta adhesiva y póngala sobre la galga y terminal de tal manera que queden centradas en la cinta. Levante la cinta cuidadosamente en un ángulo de aprox. 45° de la superficie, trayendo consigo la galga y terminal adheridas, como lo muestra la figura 3.12.

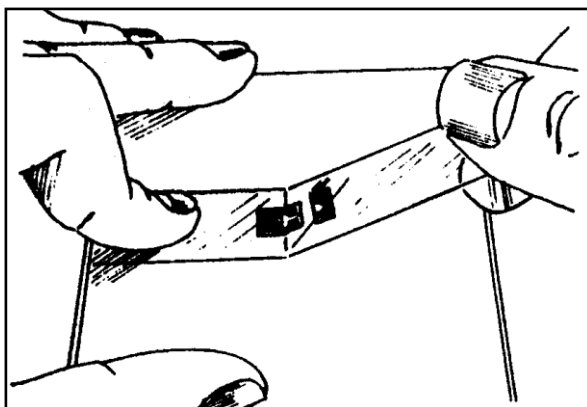


Figura 3.12.- Galga y terminal adherida con cinta.

2.- Alineación de la galga. Posicione la cinta con la galga y terminal en el espécimen de tal manera que las marcas de alineación coincidan con las marcas del espécimen y pegue firmemente un extremo de la cinta como se muestra en la figura 3.13. Si la alineación no coincidiera a satisfacción, levántela cinta de un extremo manteniendo un ángulo igual o menor a 45° hasta despegar la cinta completamente. Repita el procedimiento de alineación hasta quedar satisfecho.

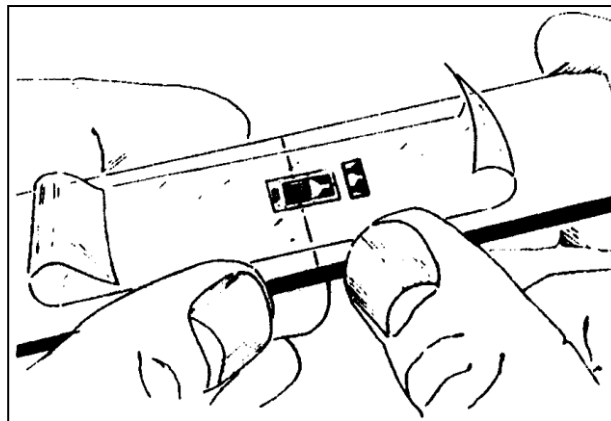


Figura 3.13.- Galga y terminal alineadas en el espécimen.

3. Preparación final. Levantar la cinta con la galga en un ángulo agudo (figura 3.14) hasta que la terminal quede aproximadamente 1 cm. libre. Se dobla la cinta sobre si misma y se pega el otro extremo sobre la superficie del espécimen de tal manera que la galga y terminal queden expuestas en una superficie plana con la parte a adherirse hacia arriba (figura 3.15).

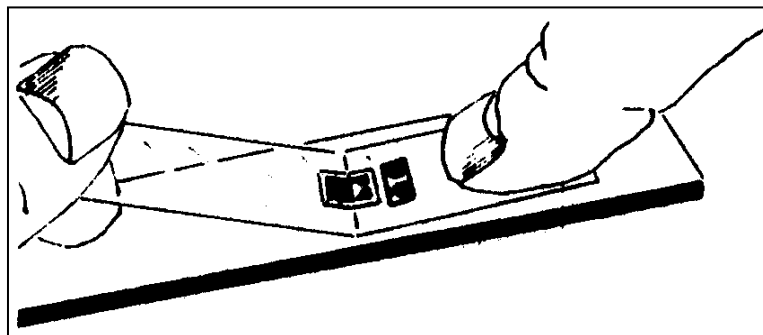


Figura 3.14.- Levantar la cinta en un ángulo agudo.

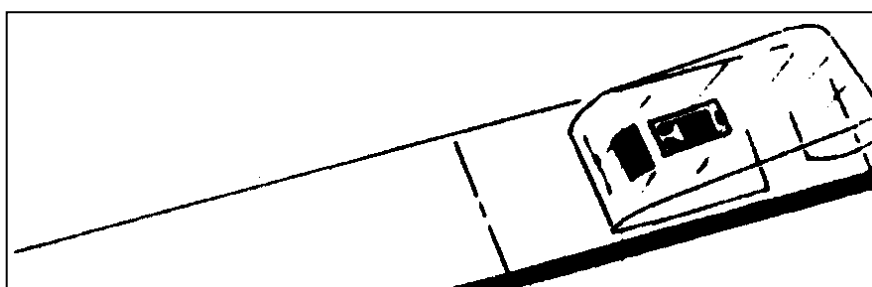


Figura 3.15.- Posicionar la cinta.

4.- Aplicación del adhesivo. Levantar la cinta del lado que ha sido doblada sobre si misma. Tomando la cinta sin jalar ni doblar. Aplicar una o dos gotas de CATALYST-C (figura 3.16) para acelerar el pegado [3.5] y de M-BOND 200 ADHESIVE (figura 3.17) en la unión de la cinta con el espécimen a aproximadamente 1 cm. de la periferia de la galga con terminal tal y como lo muestra la figura 3.18. Esto permite que la polimerización instantánea del adhesivo al contacto con el espécimen no provoque imperfecciones en la homogeneidad y uniformidad de la película de adhesivo.



Figura 3.16.- CATALYST-C.



Figura 3.17.- Adhesivo.

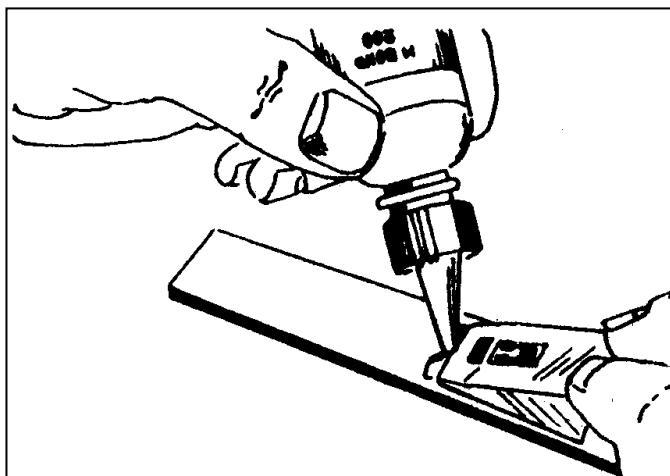


Figura 3.18.- Aplicación del adhesivo.

5.- Adhesión. Inmediatamente desdoble la cinta para quedar a aproximadamente 30° de la superficie del espécimen con la galga y terminal haciendo un 'puente' sobre el lugar de instalación. Mientras se sostiene la cinta con una ligera tensión, se aplica una presión deslizando con los dedos y un pedazo de gasa que vaya oprimiendo la galga y terminal sobre su posición y alineación deseadas (figura 3.19). Se usa una presión firme al 'recostar' la galga sobre su posición ya que se requiere una película muy delgada y uniforme de adhesivo para resultados óptimos.

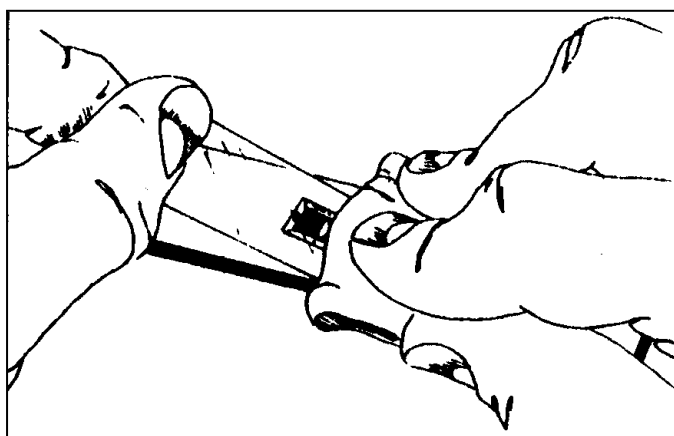


Figura 3.19.- Adhesión.

6.- Aplicación de presión. Inmediatamente después de la acción deslizando y ya con la galga en su posición y alineación correctas, aplique una presión firme con el dedo pulgar sobre la galga y terminal (figura 3.20). Esta presión se debe ejercer por lo menos por espacio de un minuto.

El calor que se genera durante la presión ayuda a una rápida polimerización del adhesivo. Espere por lo menos dos minutos para quitar la cinta después de retirar la aplicación de presión.

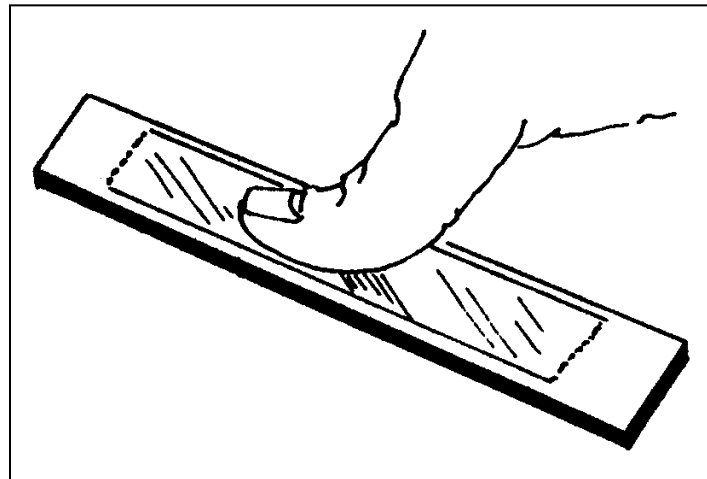


Figura 3.20.- Aplicación de presión.

7.- Retirar la cinta. La galga y terminal ya deben estar firmemente adheridas al espécimen. Para retirar la cinta (figura 3.21), júlela directamente sobre sí misma de forma continua y lenta para evitar ejercer fuerzas innecesarias sobre la galga. Una vez retirada la cinta se protege la galga de las condiciones ambientales (humedad, agentes químicos, agua...) y de algunos agentes mecánicos como golpes o rozaduras, aplicando sobre ella una capa de M-LINE RESIN SOLVENT (figura 3.22).

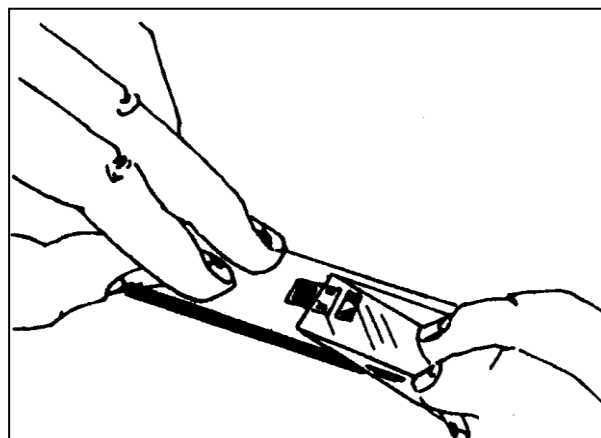


Figura 3.21.- Retirar cinta adhesiva.



Figura 3.22.- Solvente.

Realmente no es necesario retirar la cinta inmediatamente después de la instalación y puede permanecer como protección mecánica hasta que se vaya a proceder a soldar.

3.4. Procedimiento para soldar.

3.4.1 Herramienta y técnica para soldar.

Se debe cuidar que la punta del cautín sea de terminación plana o tipo desarmador plano (figura 3.23) y que se solde usando la parte plana (figura 3.24).

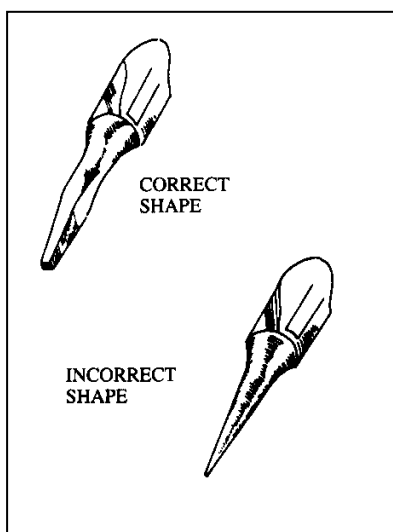


Figura 3.23.- Formas de la punta del cautín. soldadura.

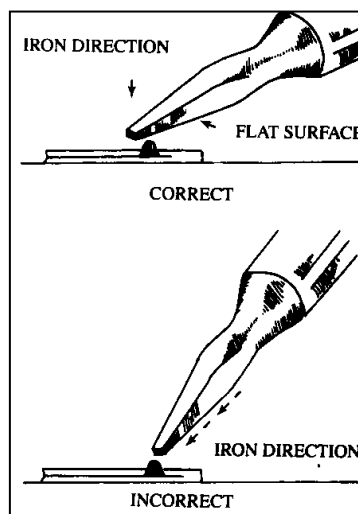


Figura 3.24.- Maneras para aplicar la soldadura.

3.4.2 Soldado de galgas.

Este procedimiento debe realizarse con cuidado para evitar cualquier eventual daño a la galga. Como paso previo a soldar cables a las galgas los cables a soldar y las terminales deben ser recubiertos de soldadura para obtener una mejor transferencia de calor y una soldadura más rápida y nítida [3.6] [3.7].

Procure usar un cautín con temperatura controlada debido a que temperaturas muy altas tienden a oxidar la punta y a evaporar instantáneamente la pasta de soldar lo cual hace la operación más difícil. Se recomienda fijar el cable a soldar con una cinta adhesiva también para tener los cables a soldar en el lugar correcto y dispone de ambas manos para soldar.

Coloque el cautín a un ángulo de 30° o menor sobre la terminal de la galga y cable y al mismo tiempo alimente aproximadamente 3mm de soldadura tal y como lo muestran las figuras 3.24 y 3.25. Al terminar levante simultáneamente la punta del cautín y la soldadura.

La soldadura debe ser de la que contiene flujo antioxidante en su interior. El procedimiento de soldado de cada terminal debe durar aproximadamente 1 segundo. La soldadura debe quedar como un pequeño montículo sobre la terminal (figura 22) y la punta del cable y debe tener un aspecto suave y brillante. Deben evitarse picos y soldaduras opacas.

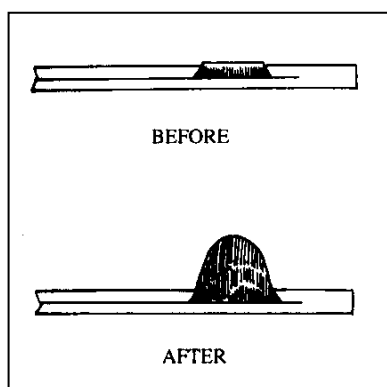


Figura 3.25.- Forma correcta del montículo de soldadura.

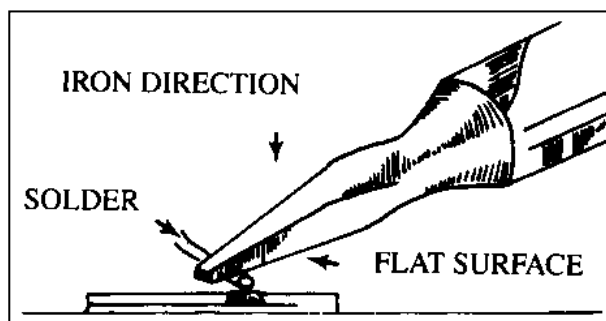


Figura 3.26.- Colocación del cautín y la soldadura.

3.4.3. Barniz de recubrimiento.

La instalación completa debe protegerse mediante recubrimientos especializados. El tipo y técnica de recubrimiento depende de la aplicación y el ambiente de uso del sensor. En general se requiere de al menos un barniz protector y podría llegar a requerirse una capa de silicón o cera para protección mecánica y contra humedad respectivamente [3.8], sin embargo, para este trabajo se utilizó M-COAT A AIR DRYING (figura 3.27).

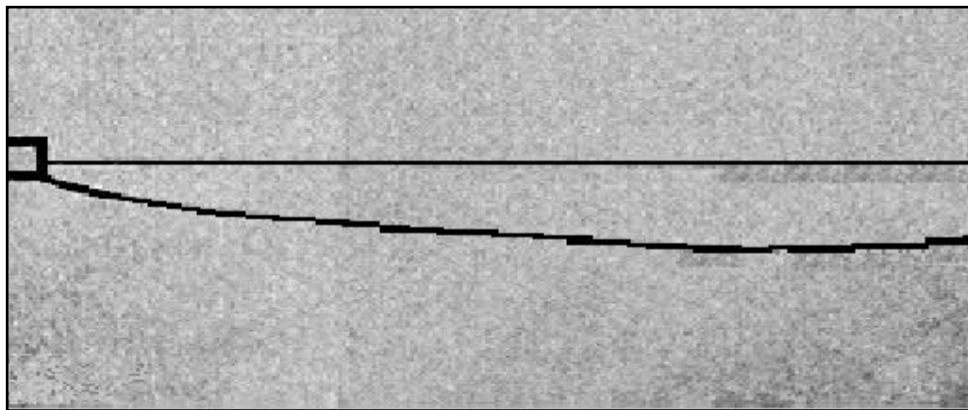


Figura 3.27. - M-COAT A Air drying.

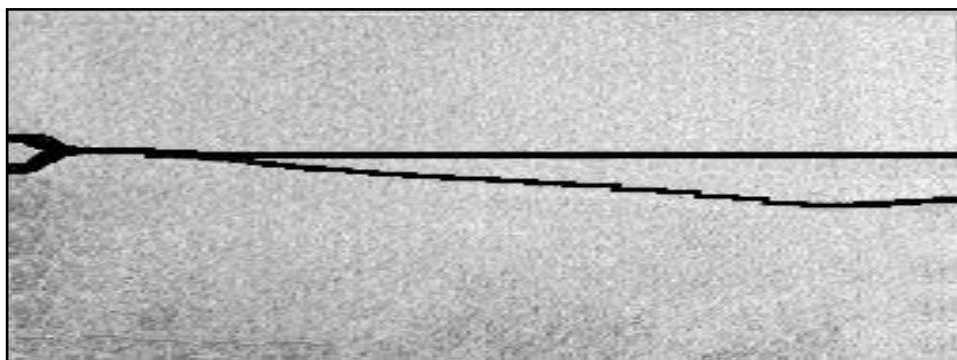
3.5. Consideraciones experimentales

Uno de los primeros análisis experimentales que se llevaron a cabo, fue para corroborar el efecto de las condiciones locales y globales que rigen el comportamiento de una grieta [3.9]. Para ello, se considera una probeta de PMMA, que tiene los siguientes parámetros: dimensiones de 152 mm x 102 mm x 6 mm, un Módulo de Elasticidad de $2.3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ y una relación de Poisson de 0.28. Se le aplica una carga de apertura de 756 N y una carga transversal a compresión de 56 N/mm. En la figura 3.28a, se puede apreciar que la punta de la grieta es de forma cuadrada, la cual se propagará por la esquina donde sobrepase la energía potencial necesaria para su propagación.

Mientras que en la figura 3.28b, se tiene la misma probeta empleada en la figura 3.28a, con idénticas condiciones de carga, sólo que en este caso se tiene una muesca afilada, lo que posibilita que la grieta inicialmente se propague en forma horizontal. Asimismo, se puede apreciar en forma notable que en el caso de la figura 3.28a (extremo cuadrado) la dirección de inicio de la misma tiende a ser inestable por el efecto de las condiciones locales, y a medida que la grieta crece prevalecen las condiciones globales, esto tiene el efecto de hacer que la grieta se prolongue en forma direccionalmente estable. Otro punto que hay que considerar, es que si no se hubiera aplicado una carga transversal a compresión, el ángulo inicial de propagación de la grieta es mayor que en el caso anterior, dado que dicha carga transversal tiene el efecto de disminuir la inestabilidad. Esto, sucede para ambos casos.



(a).- Punta de grieta en forma cuadrada.



(b).- Grieta en forma de punta.

Figura 3.28.- Análisis de la influencia de las condiciones locales en la propagación de una grieta.

Además, Urriolagoitia y Hernández realizaron dos pruebas experimentales, para dos especímenes “A” y “B” de PMMA con diferentes cargas. Para el espécimen “A”, de dimensiones de 152mm x 102mm x 6mm, se considera una carga de apertura de 1388 N y una carga transversal a compresión de 28 N/mm. Una de las primeras mediciones del ángulo de propagación, es de $\theta = 22^\circ$ para una longitud de grieta de aproximadamente 40 mm, como se puede observar en la figura 3.29 [3.9].

Para otra prueba experimental del espécimen “A”, se emplea una longitud de grieta de 76mm, una carga de apertura de 756 N y una carga transversal a compresión de 28 N/mm, resultando un ángulo de propagación de $\theta = 10^\circ$ [3.9].

Para el segundo caso, el espécimen “B” presenta la misma geometría que el anterior, solo que la carga de apertura es de 1317 N y la carga transversal a compresión de 63 N/mm.

La primera medición se hace cuando la longitud de la grieta es aproximadamente de 40mm, donde el resultado del ángulo de propagación es de $\theta = 4^\circ$. Posteriormente, se realiza otra prueba de fractura con una longitud de grieta de 56mm, y una carga de apertura de 832 N, obteniéndose un ángulo de propagación $\theta = 1^\circ$. Esto, corrobora que si se aplica una carga transversal a compresión, se tiende a estabilizar la ruta de la grieta. En la tabla 3.2, se muestran los valores obtenidos experimentalmente de los especímenes “A y B” [3.9].

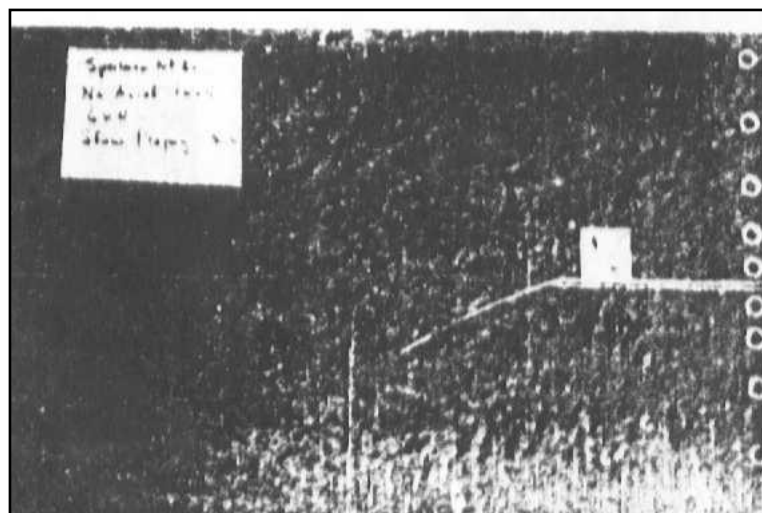


Figura 3.29.- Resultado experimental del espécimen A para una longitud de grieta de 40 mm.

Parámetros	Especimen A		Especimen B	
	Primer Análisis	Segundo Análisis	Primer Análisis	Segundo Análisis
Carga de apertura (N)	1388	756	1317	832
Carga transversal (N/mm)	28	28	63	63
Longitud de la grieta (mm)	40	76	40	56
Ángulo (θ)° (Experimental)	22	10	4	1

Tabla 3.2.- Resultados experimentales para un espécimen de PMMA 152 mm x 102 mm x 6 mm..

Una desventaja de estos análisis experimentales, es que el material utilizado es un PMMA, el cual no posee las características fotoelásticas necesarias para poder visualizar el campo de esfuerzos alrededor de la grieta.

Con el objeto de establecer un procedimiento para validar los resultados experimentales, se considera la utilización de un método numérico, como es el caso de los paquetes computacionales ANSYS y FRANC, los cuales se basan en el Método del Elemento Finito. Estas herramientas, se han utilizado para obtener el campo de esfuerzos en la vecindad de la grieta y la trayectoria de propagación.

3.6. Análisis Numérico de Propagación de grietas

Para el análisis numérico se considero el Método del Elemento Finito (MEF), el cual es uno de los que se han utilizado con más éxito. La idea básica de éste, es la representación de un cuerpo o estructura por medio del ensamble de subdivisiones llamados elementos finitos [3.10], dicho de otro modo, el método consiste en dividir el cuerpo en pequeñas áreas o volúmenes llamados elementos, los cuales son formados por conexiones entre nodos. Esto, establece el modelo de elementos finitos para determinar las ecuaciones matriciales del sistema, considerando las propiedades de los elementos y las condiciones de frontera, obteniendo un sistema de ecuaciones lineales simultáneas.

Uno de los principales problemas considerados en la Mecánica de Fractura, es el análisis del proceso de fractura bajo cargas arbitrarias, y la determinación de la estabilidad de propagación de la grieta.

Debido a ello, se ha puesto interés especial en el análisis experimental descrito en el punto 3.2 [3.9], donde se estudia un caso en condiciones de esfuerzos biaxiales. En la figura 3.30, se muestra el tipo de espécimen que se analiza en el caso experimental.

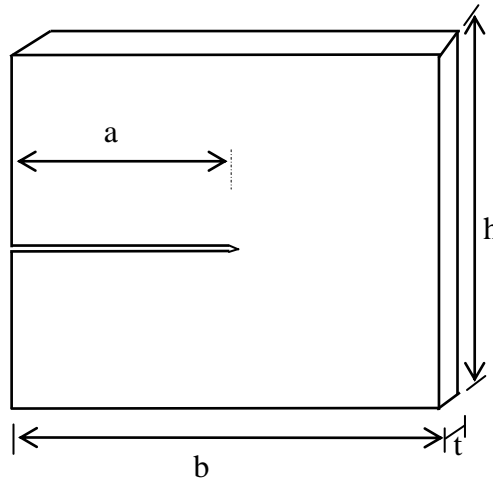


Figura 3.30.- Espécimen de prueba.

Para esto, se consideró un Polimetil-Metacrilato (PMMA) con las siguientes propiedades mecánicas:

Módulo de Elasticidad, $E = 2.3 \text{ Gpa}$.

Relación de Poisson, $\nu = 0.28$

Densidad de 1190 kg/m^3

3.6.1. Descripción del trabajo numérico

Desde el punto de vista numérico, el Método del Elemento Finito ofrece ventajas, ya que no solo calcula los Factores de Intensidad de Esfuerzos, si no que también grafica el Campo de Esfuerzos resultantes. Sin embargo, existen dos aspectos importantes: El primero, es que hay programas de Elementos Finitos “rígidos” como el ANSYS [3.11], que evalúa el caso de estudio con un tamaño fijo de la grieta. Por lo que el analista tiene que generar una nueva red con la grieta propagada si se quiere encontrar la evolución del proceso de fractura. El segundo es interesante, ya que el grado de avance en el desarrollo de programas de cómputo, permite hacer la evaluación de la forma de propagación de la grieta. Además, se permite visualizar el Campo de Esfuerzos.

Con la finalidad de obtener un mayor conocimiento, se examina el problema con los programas ANSYS y FRANC. El primero, permite conocer las condiciones globales del Campo de Esfuerzos que podrían generar la inestabilidad. Mientras que el segundo caso, muestra la evolución de la grieta durante su propagación.

3.6.2. Planteamiento de la Metodología para análisis numérico

La metodología de análisis considera el material ideal, lineal elástico, continuo, homogéneo e isotrópico. Ésta, es desarrollada para analizar cualquier tipo de elemento agrietado, considerando los paquetes de cómputo ANSYS [3.11] y FRANC [3.12].

A continuación se describe la metodología en diferentes fases:

1. Se definen las propiedades mecánicas del material, el sistema de unidades, el tipo de análisis y el tipo de elemento a utilizar.
2. Se desarrolla el modelado del componente estructural con una grieta en uno de sus bordes, definiendo sus características geométricas.
3. Se simulan las condiciones de apoyo y sus respectivas cargas.
4. Se obtiene el campo de esfuerzos y deformaciones resultantes, los cuales determinan en que direcciones la grieta será propagada.
5. Considerando el paquete FRANC, se genera la propagación de la grieta por incrementos constantes, posteriormente se realiza un análisis estático del campo de esfuerzos y deformaciones en la vecindad de la punta de la grieta.

6. Finalmente, se obtiene la trayectoria de propagación en los diferentes casos de estudio.

3.6.3. Desarrollo del análisis experimental

Para llevar a cabo el análisis experimental se consideran cuatro casos en los cuales se simularon las condiciones de carga de apertura y biaxial. En la figura 3.31 se muestran los especímenes de 205 mm x 100 mm x 6 mm que fueron expuestos a una carga de apertura de 1388 N. En ésta, se puede apreciar que la trayectoria de la grieta es inestable, ya que ésta tiene a ser paralela a la carga aplicada teniendo solamente el efecto de la carga de apertura. Mientras que en la figura 3.32, se muestra el mismo espécimen (205x100x6mm) pero con una carga de apertura de 1388 N y una transversal de 63 N/mm, en ésta, se puede apreciar que el efecto de la carga transversal provoca que la trayectoria de la grieta tienda a ser perpendicular a la carga aplicada, logrando una estabilidad direccional de propagación.

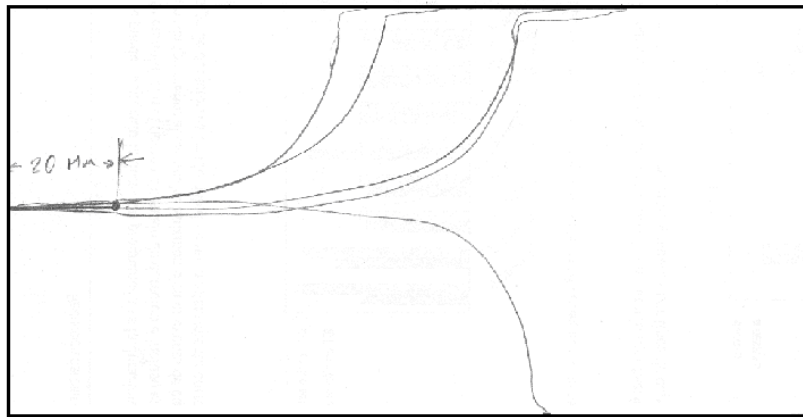


Figura 3.31.- Trayectoria de grieta con carga de apertura de 1388 N. (Método experimental).

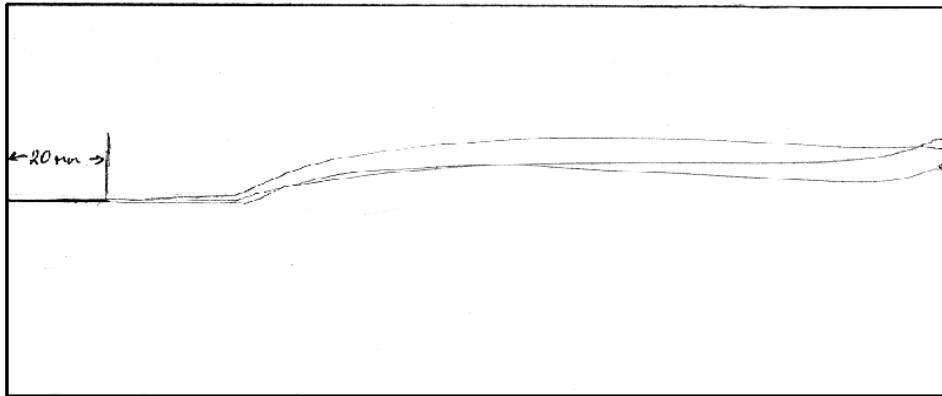


Figura 3.32.- Trayectoria de grieta con carga de apertura 1388 N y transversal de 63 N/mm
(Método experimental).

En la figura 3.33 se tienen especímenes con geometrías de 205mm x 50mm x 6mm expuestos a condiciones de carga de apertura de 1317 N. En ésta se presenta el mismo patrón que la figura 3.31, ya que solamente se tienen cargas de apertura y con este tipo de carga la trayectoria de la grieta tiene a ser inestable. Mientras que en la figura 3.34, la trayectoria de la grieta se comporta direccionalmente estable por el efecto de la carga transversal al igual que la figura 3.32.

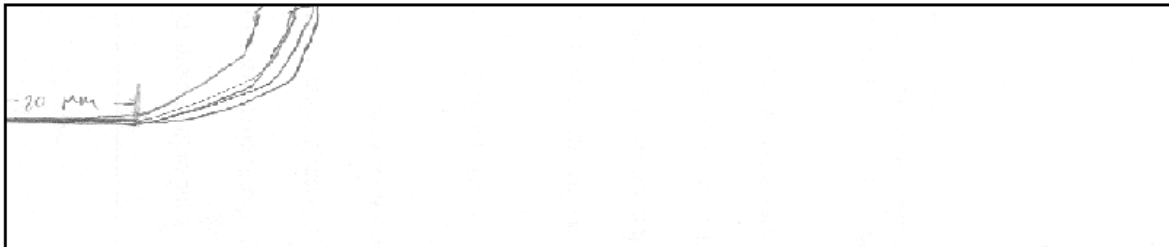


Figura 3.33.- Trayectoria de grieta con carga de apertura de 1317 N. (Método experimental).

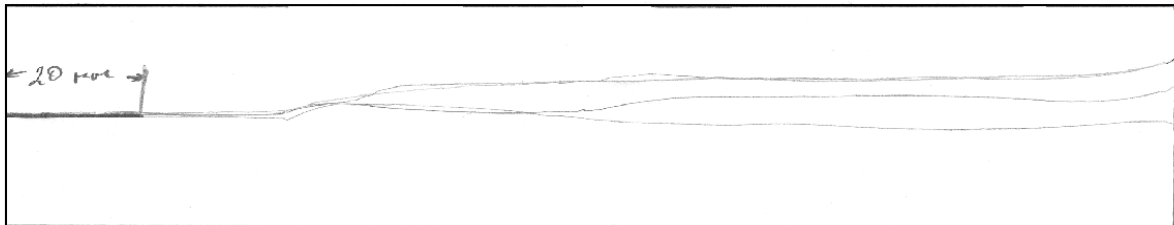


Figura 3.34.- Trayectoria de grieta con carga de apertura 1317 N y transversal de 28 N/mm.
(Método experimental).

Para llevar a cabo los análisis numéricos de los casos anteriores, se aplica la metodología del punto 3.6.2 y se utilizan los softwares ANSYS y FRANC/2D.

Una vez efectuado el modelado de la probeta, se aplican las condiciones de frontera mostradas en la figura 3.35, estas corresponden a los datos del análisis experimental [3.9]. Una de sus condiciones de frontera consiste en empotrar el borde del extremo derecho. Asimismo, en el extremo izquierdo donde se localiza la muesca, se aplica una carga de apertura (P_y) y una carga transversal a compresión (P_x).

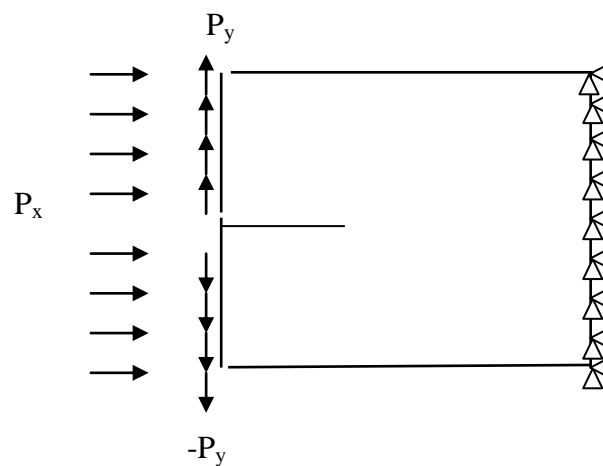


Figura 3.35.- Condiciones de frontera en el espécimen de prueba.

3.6.4. Análisis numérico de los especímenes en cargas de apertura

En la figura 3.36, se tiene un espécimen de 205mm x 100mm x 6mm con grieta de 20mm, bajo una carga de tensión de 1388 N, en ésta se presenta un campo de esfuerzos en la punta de la grieta, el cual indica que la grieta iniciará su propagación de manera perpendicular a la carga aplicada.

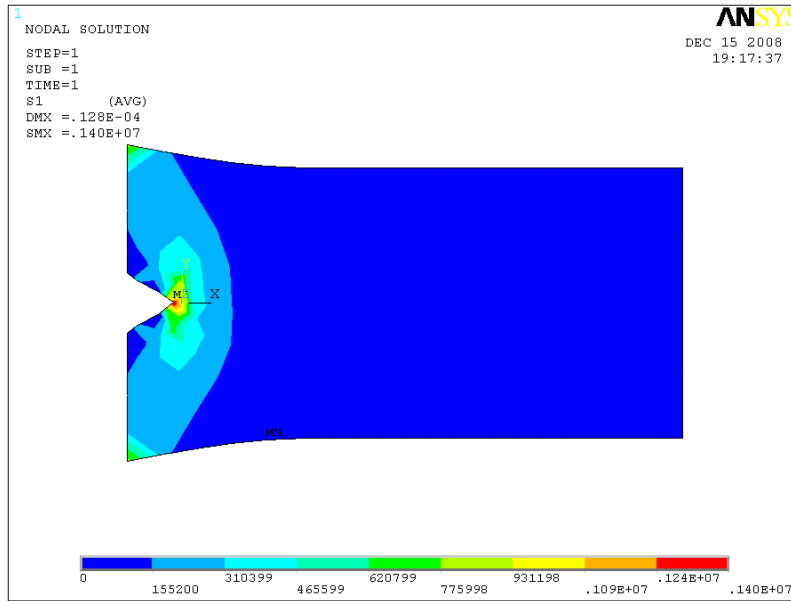


Figura 3.36.- Campo de esfuerzos en un una grieta de 20 mm por ANSYS (Análisis Numérico).

La figura 3.37 corresponde al mismo espécimen de la figura 3.36, la cual es modelada en FRANC, en ésta, se puede observar con detalle la trayectoria de propagación de la grieta cuando es sometida a una carga de apertura de 1388 N. La dirección de propagación de la grieta fue inestable debido a que una vez que se encuentra propagándose la grieta es dominada por la geometría y las condiciones de carga.

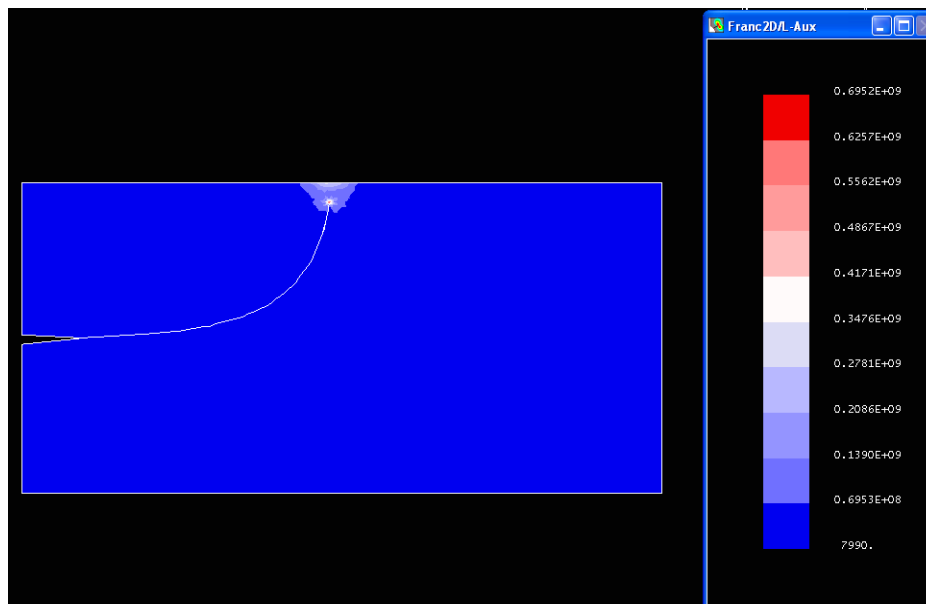


Figura 3.37.- Trayectoria de grieta en un espécimen de 205x100x6mm con carga de apertura (Análisis Numérico).

Posteriormente, se realizaron una serie de pruebas con las mismas características del espécimen simulado. Las trayectorias de grietas obtenidas se pueden apreciar en la figura 3.38.

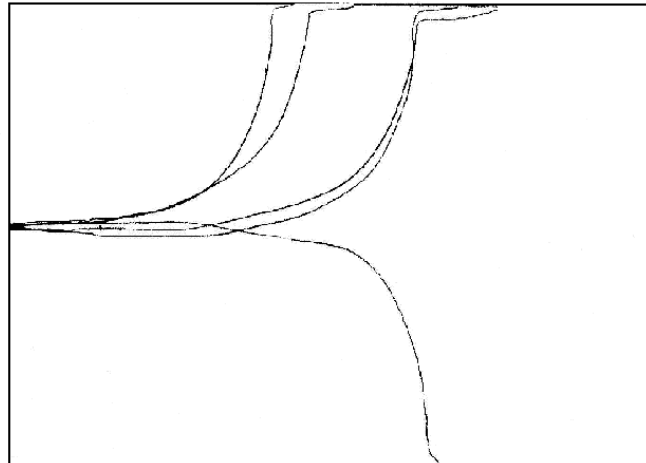


Figura 3.38.- Trayectorias reales con carga de apertura (Método Experimental).

Mientras que en la figura 3.39, se presenta la trayectoria de la grieta para el mismo espécimen de la figura 3.36 pero con cargas de apertura de 1388 N y transversal de 63 N/mm, donde debido al efecto de la carga transversal a compresión, ésta es propagada direccionalmente estable.

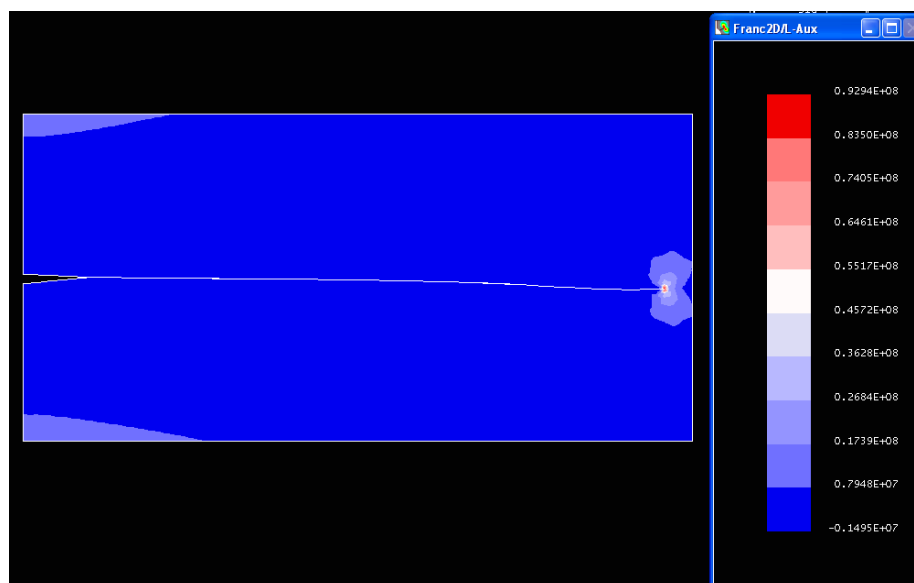


Figura 3.39.- Trayectoria de grieta con carga de apertura 1388 N y transversal de 63 N/mm. (Análisis Numérico).

Los resultados obtenidos de someter un espécimen con carga de apertura y transversal con el marco de prueba experimental se muestran en la figura 3.40.

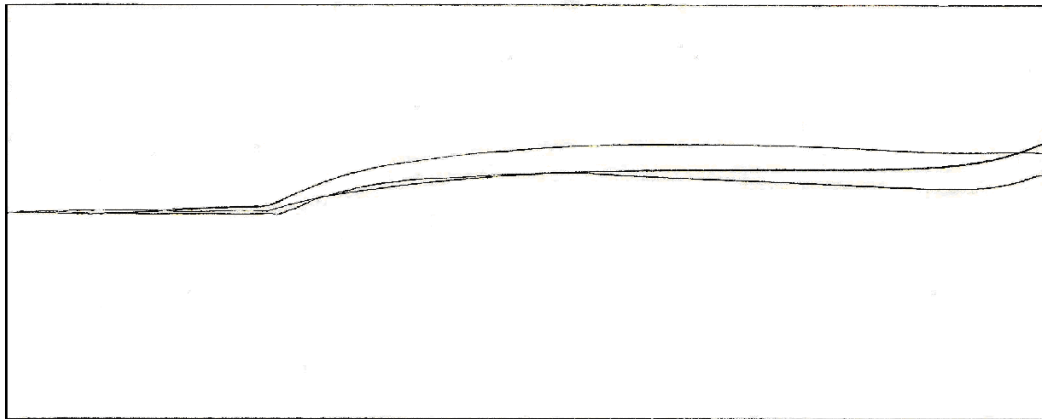


Figura 3.40.- Trayectorias obtenidas con carga de apertura y transversal (Método Experimental).

Más adelante, se hizo otro análisis numérico para la geometría de 205 mm x 50 mm x 6 mm, donde se utilizaron cargas de apertura y transversal. En la figura 3.41 se tiene un espécimen con una carga de 786 N donde se muestra el campo de esfuerzos por ANSYS antes de la propagación de la grieta, en ésta se puede apreciar que de acuerdo a los esfuerzos principales mínimos ésta crecerá perpendicularmente a la carga aplicada. Mientras que en la figura 3.42, se muestra la trayectoria de propagación por medio de FRANC, siendo ésta direccionalmente inestable.

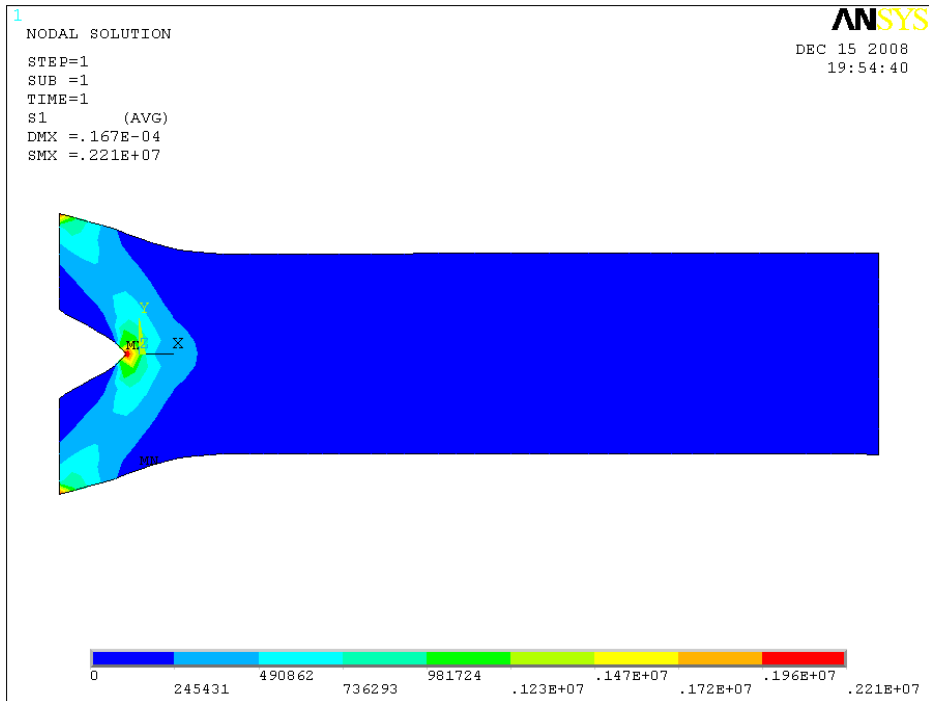


Figura 3.41.- Trayectoria de grieta en un espécimen de 205x50x6mm con carga de apertura (Análisis Numérico).

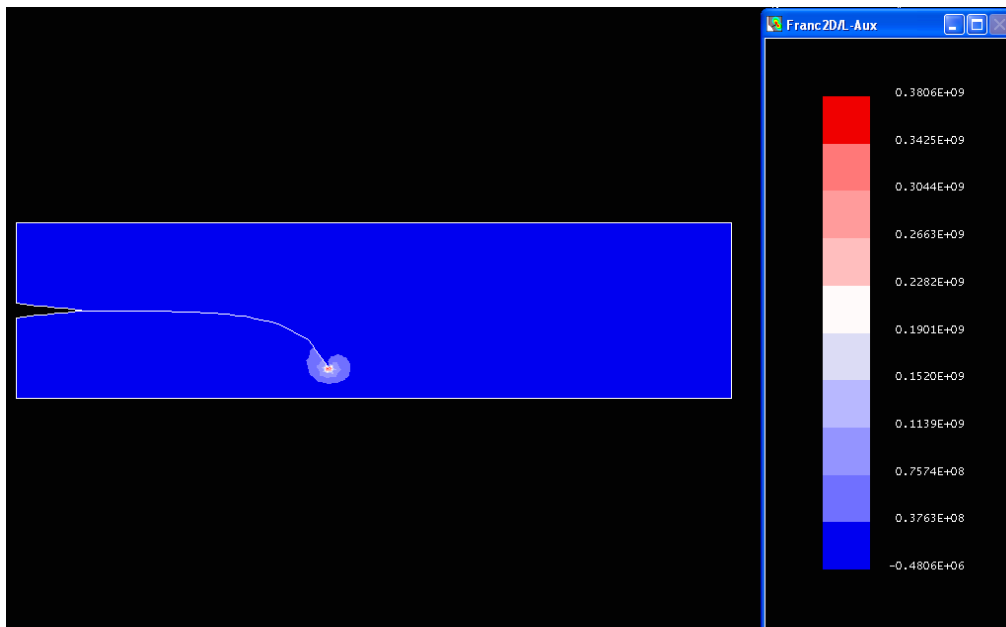


Figura 3.42.- Trayectoria de grieta con carga de apertura de 786 N. (Análisis Numérico).

En este caso, las trayectorias de las grietas simuladas con ambos programas difieren de los resultados obtenidos con el marco de prueba (figura 3.43).

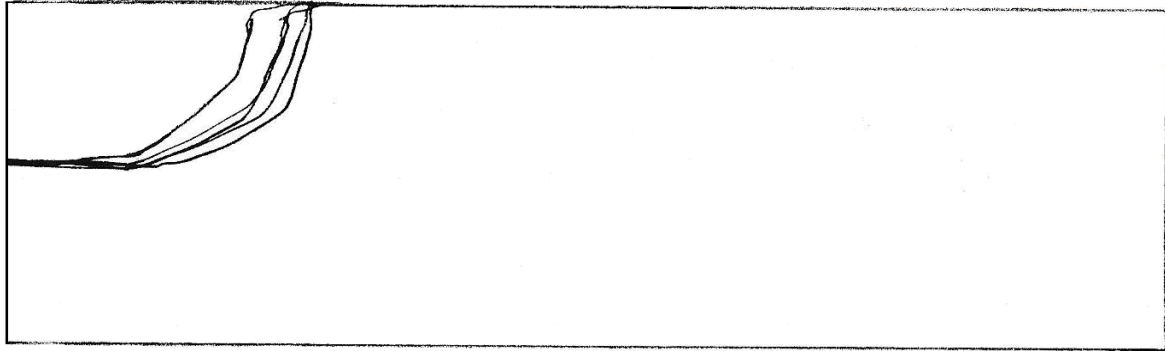


Figura 3.43.- Resultados del análisis experimental.

En la figura 3.44, se tiene el mismo espécimen de la figura 3.43 con cargas de apertura de 786 N y transversal de 28 N/mm, donde se muestra que la trayectoria de la grieta se mantiene estable debido a la carga transversal.

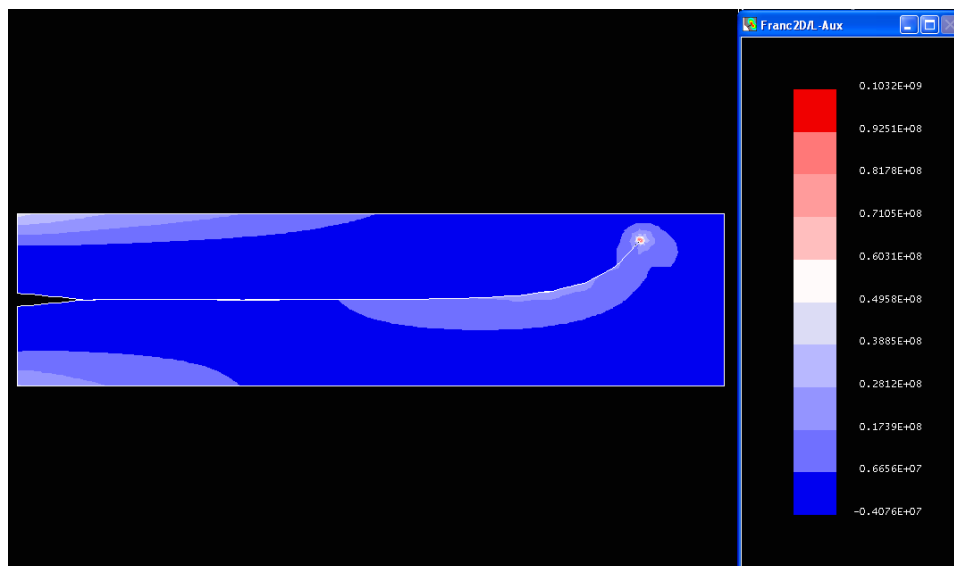


Figura 3.44.- Trayectoria de grieta con carga de apertura 786 N y transversal de 28 N/mm. (Análisis Numérico).

Una vez efectuado el análisis experimental para este espécimen, se observa que las trayectorias de la grietas son semejantes con las obtenidas de la simulación (figura 3.45)

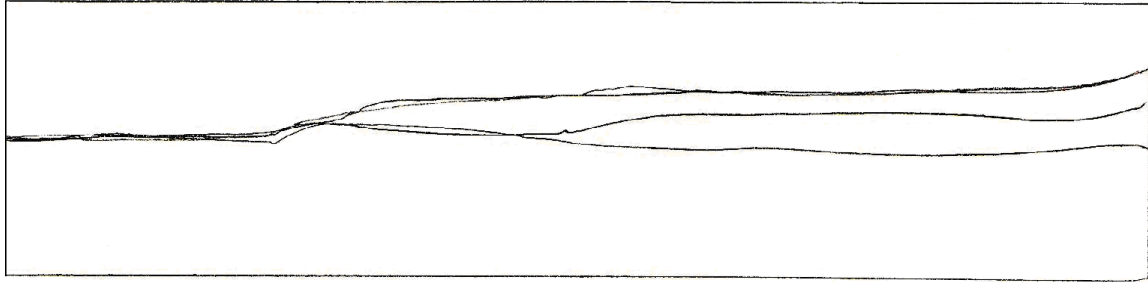


Figura 3.45.- Resultados del análisis experimental con carga de apertura y transversal.

3.7. Conclusiones

El inicio de propagación de una grieta se rige por las condiciones locales como las fallas e imperfecciones del material, sin embargo, la estabilidad direccional de la grieta depende de sus condiciones generales, como son la geometría y el tipo de carga.

Los análisis experimentales fueron llevados a cabo en un material de PMMA, el cual tiene un comportamiento visco elástico, para esto, se siguió un procedimiento de análisis numérico-experimental, donde se analizaron diversos especímenes con diferentes geometrías y condiciones de carga., los cuales fueron utilizados para calibrar los análisis numéricos.

En los análisis numéricos, se utilizaron dos programas de cómputo, el ANSYS y el FRANC, el primero muestra solamente el campo de esfuerzos el cual predice la dirección de propagación de la grieta, en dirección de los esfuerzos principales mínimos, mientras que el segundo realiza la dirección de propagación estable o inestable.

Finalmente se concluye que la dirección de propagación de la grieta es dominada por las condiciones de carga.

3.8. Recomendaciones para trabajo futuro

De los conocimientos adquiridos en el desarrollo del presente trabajo y de la consulta de la literatura abierta especializada, se sabe que el estudio del comportamiento de la dirección de propagación de una grieta es de gran importancia, ya que con esto se puede detectar si la grieta se comportará de forma estable o inestable, además, se podrá evaluar tal defecto en dicho componente y decidir si este ha llegado a su vida útil y si es necesario corregirlo o reemplazarlo. Por tales causas, se recomienda:

- 1.- Realizar un análisis utilizando otros tipos de materiales, tomando en cuenta el espesor de la probeta.

- 2.- Desarrollar una metodología para especímenes de prueba de diferente geometría y dimensión, ya sean cuadradas, rectangulares mas alargadas o estrechas, con o sin agujeros en la trayectoria de propagación.

- 3.- Hacer evaluaciones con grietas internas en el centro del espécimen, con diferentes ángulos, en punta o elípticas.

- 4.- Realizar análisis con múltiples grietas internas y de diferente longitud.

En general, sería importante realizar los trabajos experimentales de cada una de las recomendaciones, para poder validar las metodologías que se propongan.

3.9. Referencias

- [3.1] Urriolagoitia Calderón G. y Hernández Gómez L.H. (1997), "Evaluation of crack propagation stability part II". International Journal Computers and Structures. No. 63(5), pp. 1007-1014.
- [3.2] Ferrero, Jose Maria. Guijarro, E. (1994), "Instrumentación Electrónica", Sensores, UPV España, pp. 55-57.
- [3.3] Pallas Areny, Ramón (2001), "Sensores y Acondicionadores de Señal", Editorial Macombo S.A., Barcelona.
- [3.4] Figliola-Beasley (2003), "Mediciones Mecánicas Teoría y Diseño", Alfaomega Grupo Editor, México.
- [3.5] Measurements Group, Inc. P.O. Box 27777, Raleigh, NC 27611, USA.
- [3.6] Measurements Group, Technical Tip TT-606 (1983) "Soldering techniques for lead attachment to strain gages with solder dots".
- [3.7] Measurements Group, Technical Tip TT-609 (1986), "Strain gage soldering techniques".
- [3.8] Measurements Group, Catalogue A-110-8 (1995), "M-line Satrin Gage Accessories".
- [3.9] Urriolagoitia Calderón G y Hernández L.H. (1997), "Experimental analysis of crack propagation stability in single edge notch specimens". Theoretical and Applied Fracture Mechanics 28, pp. 57-68.
- [3.10] Saucedo M. I. (1997), "Análisis de Fatiga Mediante el Método del Elemento Finito", Tesis de Maestría, SEPI – ESIME – IPN, pp. 72-74

[3.11] Swanson, Analysis Systems Inc. (1992), "The ANSYS Program", Doc. MPB-A3-5/92.

[3.12] Swenson D. and Mark J. "FRANC2D/L: A Crack Propagation Simulator for Plane Layered.