

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA



“Análisis de Fractura Del Aluminio 6061-T651 Expuesto a un Medio Corrosivo”

**TESIS PARA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS**

Director de Tesis:

Dr. Israel Saucedá Meza

Presentado por:

M.C. Guillermo Cine Páez

Mexicali, B. C. 29 de marzo de 2012

“Análisis de Fractura del Aluminio 6061-T651 expuesto a un Medio Corrosivo”

Índice

Índice	1
Índice de figuras	3
Índice de tablas	5
Simbología	6
Resumen	8
Abstract	9
Hipótesis	10
Objetivo	10
Justificación	10
CAPÍTULO 1 Desarrollo de la Mecánica de la Fractura	11
1.1. Perspectiva Histórica de la Mecánica de la Fractura, su origen	12
1.2. Mecánica de la Fractura lineal elástica en el contexto del siglo XX	20
1.3. Desarrollo de la Mecánica de la Fractura elastoplástica.	33
1.4. El método del elemento Finito.	34
1.5. Mecánica de la Fractura por Fatiga.	38
1.6. Corrosión-Fatiga	39
CAPÍTULO 2 Fundamentos Teóricos de la Mecánica de la Fractura	41
2.1. Balance energético durante la propagación de la fractura, criterio de Griffith.	42
2.2. Tasa de liberación de energía y energía de fractura, criterio de Irwin.	46
2.3. Factor de Intensidad de Esfuerzos	49
2.3.1. Campos de esfuerzos para cuerpos elásticos isotrópicos.	49
2.3.1.1. Modo I	50
2.3.1.2. Modo II	52
2.3.1.3. Modo III	52
2.4. Tenacidad a la Fractura.	54
2.5. El criterio de Irwin para la zona plástica	57

2.6. La Integral J y el criterio energético.....	61
2.6.1. Determinación de la curva <i>J-R</i>	72
2.7. El desplazamiento de apertura de grieta CTOD.....	79
2.8. Iniciación de la fractura en modo mixto.....	81
2.8.1. Teoría del esfuerzo circunferencial máximo.	82
2.8.2. Teoría de la razón de liberación de energía máxima.....	84
2.9. Determinación de los factores de intensidad de esfuerzos.....	85
2.10. Fatiga.....	89
CAPÍTULO 3 Análisis Preliminares utilizando NASGRO, FRANC2D y ANSYS.....	98
3.1. Aluminio 6061-T651.....	99
3.2. Configuración de los especímenes.	100
3.3. Ambiente de exposición de los especímenes sujetos a estudio.....	100
3.4. Herramientas utilizadas en los análisis preliminares.....	102
3.4.1. Paquete computacional NASGRO.	102
3.4.2. Paquete computacional FRANC2D.	103
3.4.3. Simulación de la fractura utilizando el paquete computacional ANSYS.....	105
3.5. Resultados.	105
3.5.1. Resultados Analíticos.....	105
3.5.2. Resultados mediante FRANC2D.	108
3.5.3. Resultados mediante ANSYS.....	115
3.6. Resultados para el Aluminio 6061-T651.	116
CAPÍTULO 4 Resultados Experimentales Finales de Fractura.....	120
4.1. Fabricación de los especímenes de Aluminio 6061-T651.	121
4.2. Análisis experimental de fractura.....	122
4.3. Análisis Experimental de Fatiga.	127
4.4. Cálculo de la deformación plástica.	130
4.5. Efectos del fluido en la dureza del material.	132
Conclusiones	134
Trabajo futuro.....	134
REFERENCIAS	135

Índice de figuras

Figura 1.1	Canasta de Da Vinci.	13
Figura 1.2	Esquema de Galileo en relación a la proporción de los huesos.	15
Figura 1.3	Viga del Problema de Galileo.	15
Figura 1.4	Fracturas de los especímenes de Kirkaldy.	19
Figura 1.5	Resultados de Alan Arnold Griffith en fibras de vidrio.	21
Figura 1.6	Falla por fractura del buque S.S. Schenectady (1944).	22
Figura 1.7	Fractura del buque I.O.S. 3301 ocurrida en 1972.	23
Figura 1.8	Modos básicos de desplazamiento de fracturas.	25
Figura 1.9	Avión DH-106 Comet (1952).	27
Figura 1.10	Fractura del avión Comet.	28
Figura 1.11	Ejemplo de calibrador para estudios extensométricos.	29
Figura 1.12	Ejemplo del patrón de las franjas después de remover la carga.	31
Figura 1.13	Representación Del FEM en un espécimen.	36
Figura 1.14	Cámara de prueba de corrosión fatiga.	40
Figura 2.1	Cuerpo fisurado sujeto a esfuerzos.	43
Figura 2.2	Criterio de Griffith para fractura bajo tensión uniforme.	45
Figura 2.3	Modos básicos de desplazamiento de fractura.	49
Figura 2.4	Punta de grieta y su campo de esfuerzos.	50
Figura 2.5	Variación de la tenacidad a la fractura con respecto del espesor.	56
Figura 2.6	Aproximación de la zona plástica.	59
Figura 2.7	Formas de la zona plástica para el modo I.	60
Figura 2.8	Representación esquemática de la vecindad de una grieta.	60
Figura 2.9	Representación de la curva alrededor de la punta de grieta.	61
Figura 2.10	Diagrama carga desplazamiento de la grieta.	62
Figura 2.11	Vector de proyección con dirección del crecimiento de la grieta.	65
Figura 2.12	Diagrama carga-desplazamiento.	67
Figura 2.13	Parámetros de la fractura descritos por ASTM.	68
Figura 2.14	Curva J-R típica.	69
Figura 2.15	Especimen C (T).	70
Figura 2.16	Muestra del clip en la boca del espécimen.	70
Figura 2.17	Gráfica de carga contra abertura de la grieta.	72
Figura 2.18	Curva carga-desplazamiento para la aleación 2219-T87.	72
Figura 2.19	Definición del área para el cálculo de J.	74
Figura 2.20	Definición del área plástica para el cálculo de J.	75
Figura 2.21	Tipos de registros de carga contra desplazamiento de línea de carga.	77
Figura 2.22	Aceptabilidad del pop-in.	78
Figura 2.23	Definición de las líneas de construcción para aceptación de datos.	79
Figura 2.24	Curva típica $\delta - R$	80
Figura 2.25	Fisura bidimensional sujeta a modo de carga mixto.	82
Figura 2.26	ángulo de propagación contra ángulo de la carga aplicada.	83
Figura 2.27	Región de falla pronosticada.	84
Figura 2.28	Valores de intensidad de esfuerzos.	88
Figura 2.29	Terminología empleada en fatiga para carga de amplitud constante.	89
Figura 2.30	Curva S-N.	91

Figura 2.31	Datos experimentales para una aleación de aluminio 2024.....	92
Figura 2.32	Espécimen C(T) para prueba de corrosión esfuerzo.....	94
Figura 2.33	Curva típica de corrosión esfuerzo.....	94
Figura 2.34	Iniciación de la fractura por corrosión fatiga de varios aceros.....	95
Figura 2.35	Representación esquemática del crecimiento de las grietas por fatiga.....	97
Figura 2.36	Representación idealizada de la corrosión fatiga en función de la frecuencia.....	97
Figura 3.1	Espécimen estándar ASTM C(t).....	100
Figura 3.2	Espécimen C(t) en NASGRO.....	103
Figura 3.3	Metodología utilizada por FRANC2D.....	104
Figura 3.4	Elemento triangular utilizado por ANSYS.....	105
Figura 3.5	Datos dimensionales de entrada.....	106
Figura 3.6	Valores de FIE contra longitud de fisura c	107
Figura 3.7	Valores de S_n/S_y contra longitud de fisura c	108
Figura 3.8	Geometría y subregiones dentro del espécimen.....	109
Figura 3.9	Subregiones divididas en segmentos.....	109
Figura 3.10	Mallado mediante CASCA.....	110
Figura 3.11	Distribución de las cargas aplicadas.....	110
Figura 3.12	deformaciones antes de modelar la grieta.....	111
Figura 3.13	Secuencia de borrado de elementos y generación de nuevo mallado.....	111
Figura 3.14	Mallado final mostrando la punta de la grieta.....	112
Figura 3.15	Campo de esfuerzos en la punta de la fisura.....	112
Figura 3.16	Generación del mallado para una longitud de fisura de 0.8 pulgadas.....	113
Figura 3.17	Campo de esfuerzos para una longitud de fisura de 0.8 pulgadas.....	113
Figura 3.18	Valores de FIE ($Ksi\sqrt{in}$) contra longitud de fisura a (in).....	114
Figura 3.19	Campo de esfuerzos para una longitud de fisura de 0.1 pulgadas.....	116
Figura 3.20	Campo de esfuerzos para una longitud de fisura de 0.8 pulgadas.....	116
Figura 3.21	Valores de FIE contra longitud de fisura a diferentes métodos.....	118
Figura 3.22	Valores de fuerza contra longitud de fisura a	119
Figura 4.1	Dimensiones de los especímenes fabricados.....	121
Figura 4.2	Especímenes C(t) fabricados.....	121
Figura 4.3	Muestra de especímenes ensayados a tensión.....	123
Figura 4.4	Ensayos de tensión en especímenes con fisura inicial de 0.5 pulgadas.....	123
Figura 4.5	Ensayos de tensión en especímenes con fisura inicial de 0.6 pulgadas.....	124
Figura 4.6	Ensayos de tensión en especímenes con fisura inicial de 0.7 pulgadas.....	124
Figura 4.7	Ensayos de tensión en especímenes con fisura inicial de 0.8 pulgadas.....	125
Figura 4.8	Ensayos de tensión en especímenes con fisura inicial de 0.9 pulgadas.....	125
Figura 4.9	Comparación de resultados analíticos, numéricos y experimentales.....	126
Figura 4.10	Trampa de condensados.....	127
Figura 4.11	Especímenes en vasija de prueba.....	128
Figura 4.12	Características de la carga cíclica aplicada en los ensayos de fatiga.....	128
Figura 4.13	Curvas carga-desplazamiento para en especímenes 0.5 y 0.8 pulgadas.....	132
Figura 4.14	Espécimen atacado por la salmuera geotérmica.....	133
Figura 4.15	Detalle de un espécimen atacado.....	133

Índice de tablas

Tabla 3.1	Propiedades físicas del aluminio 6061-T651	99
Tabla 3.2	Composición química de la aleación 6061-T651	99
Tabla 3.3	Composición química de la salmuera	101
Tabla 3.4	Resultados para cada longitud de fisura.....	106
Tabla 3.5	Resultados arrojados por NASGRO.....	107
Tabla 3.6	Resultados para una longitud inicial de fisura 0.0 pulgadas	114
Tabla 3.7	Resultado numéricos del Aluminio 6061-T651	117
Tabla 3.8	Resultado numéricos del Aluminio 6061-T651 para $K = 26KSI\sqrt{in}$	118
Tabla 4.1	Fuerza en la que se inicia la propagación de la grieta.....	126
Tabla 4.2	Especímenes sujetos a ensayos de fatiga.	128
Tabla 4.3	Condiciones de fatiga del material virgen.....	129
Tabla 4.4	Condiciones de fatiga del material expuesto.....	129
Tabla 4.5	Porcentaje de vida reducido del material expuesto	130
Tabla 4.6	Resultados numéricos y experimentales de J.....	131
Tabla 4.7	Valores de J en deformación elastoplástica.....	131
Tabla 4.8	Dureza del aluminio antes y después de ser expuesto al medio corrosivo.....	132

Simbología

A	Área
A_{pl}	Área bajo la curva carga-desplazamiento
a	Longitud de grieta
a_c	Longitud crítica de grieta
$2a$	Longitud de Grieta
B	Espesor de placa
b_0	Longitud no fracturada
C_k	Constante empírica
d_s	Elemento de longitud de arco
E	Módulo de Young
E'	Modulo de Young para esfuerzo plano
F	Fuerza
G	Energía de deformación
G_C	Energía de deformación crítica
G_{IC}	Tasa crítica de liberación de energía o energía de fractura
J	integral J
J_{IC}	integral J al iniciar la propagación inestable
J_{el}	Componente elástico de la integral J
J_{pl}	Componente plástico de la integral J
K	Factor de intensidad de esfuerzos
K_I	Factor de intensidad de esfuerzos para el modo I
K_{II}	Factor de intensidad de esfuerzos para el modo II
K_{III}	Factor de intensidad de esfuerzos para el modo III
K_c	Tenacidad a la fractura (esfuerzo plano)
K_{Ic}	Tenacidad a la fractura (deformación plana)
L	Longitud
m	Factor de proporcionalidad
M	Par torsor
N	Número de ciclos (vida total por fatiga)
N_T	Número de ciclos
N_i	Numero de ciclos de iniciación de la Grieta
N_p	Numero de ciclos para la propagación de la grieta
P_u	Fuerza en el punto de inflexión “pop-in”
Q	Vector
R	Resistencia a la propagación de la grieta o razón del esfuerzo máximo/mínimo
r_p	Tamaño de la zona plástica
r_y	Tamaño de la zona elástica
S	Esfuerzo

S_n	Esfuerzo nominal
S_y	Esfuerzo de fluencia
T	Vector de tracción normal
t	Espesor
U	Energía potencial
U_0	Energía elástica
U_a	Decremento en la energía elástica causada por la fisura
U_y	Incremento de energía de superficie causada por la fisura
U_γ	Energía de superficie
u	Desplazamiento
W	Trabajo
α	Angulo
β	Angulo
β_1	Factor de corrección por geometría
γ	Energía de superficie específica
Γ	Curva alrededor de la punta de la grieta
$\Delta\sigma$	Rango de esfuerzo
Δa	Incremento de longitud de fisura.
δ	Desplazamiento
ε	Deformación
θ	Angulo de inclinación
ν	Relacion de Poisson
τ	Esfuerzo cortante
μ	Modulo del cortanta
Π_z	Energía potencial de la fisura después de la propagación de la grieta
Π	Energía potencial de la fisura antes de la propagación de la grieta
σ	Esfuerzo
σ_c	Esfuerzo crítico
σ_{YSS}	Esfuerzo de fluencia del material
σ_{fl}	Esfuerzo de flujo del material (promedio de σ_{YSS} y σ_u)
σ_u	Esfuerzo ultimo del material

Resumen

El estudio de la resistencia de los materiales o estructuras que analiza el crecimiento de grietas que se originan debido a cargas estáticas y/o dinámicas es conocido como Mecánica de la Fractura. Cuando los elementos objeto de estudio presentan una nula o mínima deformación plástica, se aborda el análisis de manera tradicional con elementos de la Mecánica de la Fractura Elástico Lineal, analizando los esfuerzos que aparecen las zonas limítrofes de la punta de la grieta y utilizando el factor K de intensidad de esfuerzos, éste factor se relaciona con la posición, el tamaño de la grieta, la geometría del elemento analizado y la carga aplicada.

Cuando se requiere estimar la tolerancia al daño de elementos que sufren de deformaciones plásticas elevadas antes de la fractura, los métodos de cálculo utilizados por la Mecánica de la Fractura Elástico Lineal dan como resultado estimaciones poco precisas, por lo que es necesario la utilización de la Mecánica de la Fractura Elastoplástica, donde intervienen los factores como la Integral J y el desplazamiento de la apertura de la grieta COD.

Dentro de La Mecánica de la Fractura se han desarrollado varios criterios de análisis en los que se contemplan balances de energía en las zonas limítrofes a la punta de la grieta, dichos criterios son utilizados cuando las fracturas que se presentan son del tipo elasto-plástico, es decir, en aquellas circunstancias en las cuales las deformaciones plásticas son considerables.

En el presente proyecto de investigación se estudia el comportamiento del Aluminio 6061-T651 en un medio corrosivo.

Una de las principales metas del proyecto es conocer el comportamiento del fenómeno de crecimiento de las grietas por fatiga a baja frecuencia. Además de evaluar el comportamiento de la propagación de la fisura considerando el estado de esfuerzo tensión-compresión en un ambiente de salmuera geotérmica con un pH alcalino.

Abstract

Fracture Mechanics is the study of materials resistance or structures that analyzes the growth of cracks originated due to static or dynamic loads. When the studies specimen have a non-existent or minimal plastic deformation, the analysis is performed with elements of the Linear Elastic Fracture Mechanics analyzing the stress presented on the zones around the crack tip and using the stress intensity factor K , this factor is related to the position, the crack size, the geometry of the analyzed element and the applied load.

When it is required to estimate the damage tolerance from elements who suffer plastic deformations before the fracture, the methods of calculation used by the Linear Elastic Fracture Mechanics resulting vague estimates, so the use of the Elastoplastic Fracture Mechanics, where intervening factors such as the J Integral and the COD crack opening displacement is necessary.

Various analysis criteria which cover balances of power in the tip of the crack periphery have developed within the Fracture Mechanics, these criteria are used when fractures that occur are of the elasto-plastic type, i.e., in circumstances in which plastic deformations are considerable.

This research studies the behavior of aluminum 6061-T651 in a corrosive environment.

One of the main goals of the project is to know the behavior of the phenomenon of growth of cracks under low frequency fatigue, also evaluates the behavior of crack propagation of the aluminum 6061 after being exposed to geothermal condensates with an alkaline pH.

Hipótesis

Con el conocimiento del comportamiento de la propagación de fractura dúctil y frágil por fatiga en ambientes agresivos controlados, bajo condiciones de esfuerzos biaxiales se podrá determinar la vida útil de servicio de estos materiales bajo las condiciones ambientales descritas.

Objetivo

Evaluar la Fractura Elasto-Plástica de materiales metálicos dúctiles presentada en el crecimiento de grietas por fatiga en especímenes sujetos a esfuerzos biaxiales en ambientes controlados.

Justificación

Es importante conocer el comportamiento del aluminio en condiciones de servicio en tuberías de vapor endógeno debido a su aplicación en estos ambientes, las pruebas de mecánica de la fractura con materiales expuestos a fluido geotérmico han sido escasamente realizadas y los problemas planteados por el crecimiento de fisuras sub-críticas, todavía no se han resuelto satisfactoriamente. Desde hace más de un centenar de años se estudia el fenómeno de fatiga y en la actualidad es el área de mayor actividad dentro de la Mecánica de la Fractura. Aunque se han llegado a buenas aproximaciones en la predicción de fisuras por fatiga, no se ha conseguido una síntesis satisfactoria entre el micro-mecanismo físico y la descripción macroscópica de estas fracturas que, todavía, son una de las mayores causas de los accidentes de las estructuras, de ahí la importancia de su estudio.

Una de las principales metas del presente proyecto de investigación, es conocer el comportamiento elastoplástico de las fisuras generadas por fatiga en aluminio expuesto a fluido geotérmico, las cuales podrán dar la información útil para en el diseño de estructuras utilizando este material.

CAPÍTULO 1 Desarrollo de la Mecánica de la Fractura

En este capítulo se aborda el tema de la Mecánica de la Fractura desde una perspectiva histórica cubriendo sus antecedentes, además se mencionan los primeros estudios realizados de manera objetiva del fenómeno de fractura así como la evolución de los métodos de análisis a través de los años. Además, se revisan los antecedentes de las diversas metodologías de análisis por elementos finitos.

Temas como fracturas por fatiga y corrosión-fatiga son incluidos en este capítulo además los métodos experimentales para el estudio de la propagación de las grietas utilizados en la actualidad.

1.1. Perspectiva Histórica de la Mecánica de la Fractura, su origen.

La Fractura de los materiales ha sido de gran importancia para la humanidad a lo largo de la historia, desde épocas prehistóricas se utilizaban algunas piedras que el hombre fracturaba a su conveniencia para fabricar herramientas como puntas de lanza y algunos utensilios de corte como cuchillos, mazos, hachas y otros. En la zona norte de México como en muchas otras partes del mundo, se utilizaban diversos materiales tales como el basalto, el cuarzo, la andesita, el sílex y la obsidiana. En el horizonte arqueolítico (33000-12000 a. C.) ya se elaboraban artefactos tallados con golpes alternados en uno y otro lado de manera muy incipiente, posteriormente, la técnica de tallado de piedras por percusiones tuvo una mejoría significativa, se han encontrado vestigios del periodo protoneolítico (del año 5000 al 2000 a. C.) con técnicas de tallado un poco más refinadas. En el periodo de 1150 a 400 a. C., época de esplendor de la cultura Olmeca, se elaboraron esculturas monumentales utilizando percusiones en piedras, ya para entonces la fabricación de objetos de lapidaria era una de las actividades artesanales más importantes de ésta cultura, los Olmecas esculpían objetos de basalto, obsidiana, cuarzo y jade con un conocimiento artesanal dando como resultado objetos de gran valor artístico [1].

Aún y cuando la fractura se conoce desde épocas remotas, no fue sino hasta el siglo XVI cuando Leonardo Da Vinci trató de estudiar de manera formal el fenómeno, Da Vinci observó que la longitud de una cuerda de hierro influía en su resistencia y fue el primero en notar el efecto del tamaño de una estructura en la tenacidad de la misma. Uno de los experimentos más famosos de los que se hace referencia al tratar el tema de la Mecánica de la Fractura es el que Da Vinci mismo intituló en sus notas "*Pruebas de la resistencia de los cables de hierro a diferentes longitudes*", el experimento de Da Vinci, mostrado en la Figura 1.1, consistía en suspender una canasta mediante un cable de longitud y espesor conocido y llenarla gradualmente con arena, al romperse el cable, la canasta cae y un mecanismo cierra la alimentación de arena para ser pesada posteriormente y así determinar su resistencia., de acuerdo a las mediciones de Da Vinci, cables más cortos soportan cargas mayores.

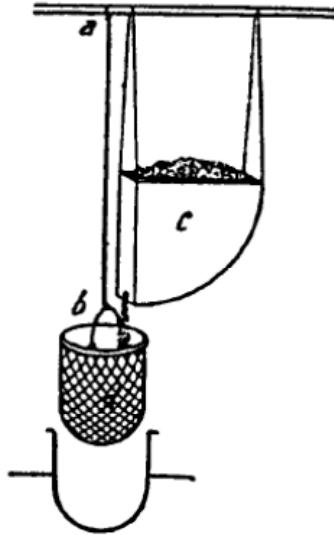


Figura 1.1 Canasta de Da Vinci.

No obstante que Da Vinci documentó la influencia de la longitud en la resistencia del cable, éste criterio no estuvo acorde a las teorías de la mecánica clásica las cuales establecen que la longitud del cable es irrelevante debido a que el esfuerzo es el mismo a lo largo de toda la longitud y cada longitud unitaria del cable se comporta de la misma manera, sin embargo, al considerar las variaciones en las propiedades de los materiales, el criterio de Da Vinci es totalmente válido.

Lund y Byrne [2] mencionan que quizá por los defectos o las inconsistencias en el material o en los procesos de fabricación de la época algunos segmentos de cable tuvieron una resistencia a la tensión diferentes entre sí, entonces, la resistencia máxima de los cables es la correspondiente al segmento más débil, por lo tanto, si el cable es más largo tiene más posibilidades de tener segmentos débiles, ante éstas circunstancias el cable más largo en promedio tiene menor resistencia. Lund y Byrne [2] utilizando un modelo probabilístico de las imperfecciones en el hierro y documentando evidencia de la heterogeneidad de los hierros de esa época demuestran que las teorías de Da Vinci son acertadas, éste descubrimiento sin embargo fue opacado por las teorías de la mecánica clásica.

Un siglo después de Da Vinci, en 1638, Galileo Galilei [3] publica su obra *“Discursi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove scienze”* en la cual aborda, desde un punto de vista matemático el problema de la fractura y menciona el término de tensión. En éste trabajo, Galileo remarca el hecho de que los artesanos fabricantes de botes ponían mucho más atención y cuidado en la fabricación de embarcaciones grandes en comparación de las pequeñas, las cuales ofrecían mayor resistencia [3], Galileo, en el primer capítulo de su trabajo, intitula éste estudio como: *“La Primera Nueva Ciencia, Tratado de la Resistencia que tienen los cuerpos sólidos a la Fractura. El Primer Día”*., Galileo dice en palabras de Salviati, uno de los interlocutores en su obra, al ser cuestionado por Sagredo acerca de la resistencia de cualquier máquina construida a escala de una más pequeña: *“...el solo hecho de construir máquinas más grandes, del mismo material y con las mismas proporciones que la más chica, y correspondiendo de manera exacta con la más pequeña en todos los aspectos, no la hace más resistente al ser tratada con violencia, la más grande es más débil...., por lo tanto Sagredo, harías bien en cambiar la opinión que tienes tu y quizá muchos otros estudiantes de mecánica, concerniente a la habilidad de las máquinas y estructuras a resistir perturbaciones externas...”*. Posteriormente, Galileo analiza mediante la geometría la influencia del tamaño en la resistencia de los cuerpos y menciona: *“...por lo que se ha demostrado, puedes observar la imposibilidad de incrementar el tamaño de cualquier estructura en las artes o en la naturaleza de manera vasta así como la imposibilidad de construir barcos, palacios o templos de enorme tamaño de manera que sus columnas, vigas, pernos y en general todas sus partes se mantengan unidas., tampoco la naturaleza puede construir árboles de extraordinario tamaño ya que sus ramas se quebrarían bajo su propio peso, tampoco estructuras de hombres, caballos u otros animales... éste incremento en el tamaño puede ser acompañado únicamente usando materiales más fuertes que lo usual o incrementando el tamaño de sus huesos hasta que la apariencia fuera monstruosa...”* Galileo realiza un esquema a escala de un hueso que de acuerdo a él, debería de incrementar sus dimensiones para soportar el tamaño Figura 1.2.



Figura 1.2 Esquema de Galileo en relación a la proporción de los huesos.

Galileo es considerado como el primer matemático que estudió la naturaleza de la resistencia de los sólidos a la fractura, si bien es cierto en su época no se conocían las teorías de la elasticidad de los sólidos, sus trabajos fueron utilizados por investigadores posteriores. Sus estudios sobre vigas empotradas en muros fueron famosos, la Figura 1.3 muestra un esquema de su trabajo, en éste, se determina la resistencia de una viga construida sobre el muro y se analiza la tendencia a la fractura debido a su propio peso o a cargas externas, Galileo concluye que la viga tiende a girar por el eje perpendicular a su longitud y en el plano del muro, éste problema fue conocido como “*el problema de Galileo*”

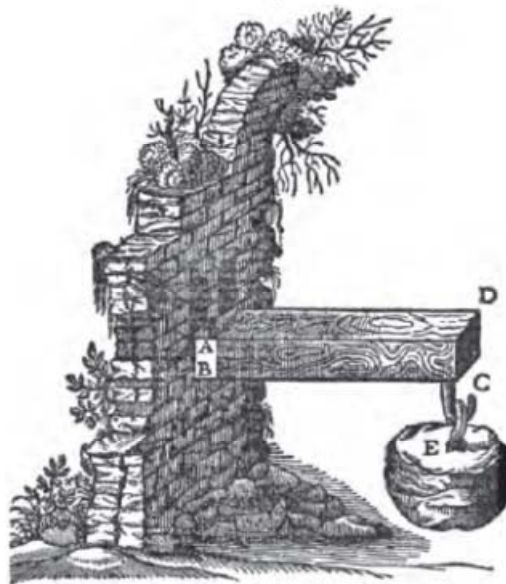


Figura 1.3 Viga del Problema de Galileo

Isaac Todhunter [4] en 1886 publica: “*A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials*” en la que atribuye a Robert Hooke los primeros estudios de la elasticidad y cita su obra: “*De Potentia Restitutiva*” que Hooke publicó en 1678 en la cual explica su teoría mencionando que cualquier material ya sea metal, madera, piedras, cerámicas, huesos, seda, vidrio o cualquier otro se comporta de acuerdo a las leyes de la naturaleza y menciona que la fuerza que se presenta para restituir la posición original es siempre proporcional a la distancia o espacio de la deformación creada y generaliza el principio en la llamada hoy en día Ley de Hooke. Todhunter [4] continua su narrativa y explica como posteriormente E. Mariotte [5] aplica los principios de la elasticidad de Hooke a las fibras de las vigas similares a las analizadas por Galilei y remarca que algunas de las fibras se extienden antes de la ruptura y otras se contraen, Mariotte fue el primer investigador que aplicó el principio de elasticidad de Hooke al problema de las vigas de Galileo [6] y concluye que las teorías de Galileo no son del todo ciertas mencionando además que algunas fibras en la viga se extienden mientras que otras se comprimen antes de la ruptura. Posteriormente y debido a toda la polémica creada por los experimentos de Mariotte y su rechazo a los puntos de vista de Galileo el filósofo alemán G. W. Leibniz [7] examina las hipótesis de Galileo y Mariotte y encuentra que siempre existe flexión previa a la ruptura de la viga y la resistencia de las fibras es proporcional a la extensión de éstas, en otras palabras, Leibniz en 1684 aplica la ley de Hooke a las fibras individuales, ésta hipótesis se conoció en su época como la teoría Mariotte-Leibniz.

Posteriormente, James Bernoulli [8] en 1705 aborda el concepto de esfuerzo como una fuerza dada por unidad de área, en función de la elongación por unidad de longitud o deformación de una fibra de material bajo tensión, Bernoulli asume que la resistencia de una viga proviene de la extensión y contracción de sus filamentos o fibras longitudinales. Después de esto, Leonhard Euler [9] que por cierto aprendió matemáticas de John Bernoulli (hermano de James) en el año de 1757 propuso la relación lineal entre esfuerzo y deformación con una constante de proporcionalidad conocida hoy como módulo de Young en honor a Thomas Young [10] que desarrolló una idea similar en 1807, la ecuación de Euler para deformaciones es de la forma $\sigma = E\varepsilon$ donde σ representa el esfuerzo, ε la deformación y E el ya mencionado módulo de Young. Daniel Bernoulli sugirió a Euler que la ecuación diferencial que definía la línea elástica en una barra podía

ser inferida y siguiendo sus consejos logra obtener la ecuación diferencial de la curva así como clasificar varias formas de éstas, una de ellas es la de Senos de amplitud pequeña, Euler remarca que en el caso en que la línea de empuje coincide con el eje de la barra de manera tal que esté vertical y completamente recta, ésta puede pandearse debido a su propio peso o con cargas externas, en sus trabajos de investigación Euler [9] asigna las longitudes mínimas en las cuales una columna puede doblarse.

El físico e Ingeniero francés Charles August Coulomb [11] fue el primero que relacionó la teoría de las vigas como una línea elástica flexionada y los esfuerzos y deformaciones de una viga real de manera tal que ni Bernoulli ni Euler lo pudieron hacer. Coulomb desarrolló la expresión $\sigma = \frac{MY}{I}$ para esfuerzos debidos únicamente a la flexión pura de una viga lineal elástica homogénea donde M es el par torsor, Y es la distancia de un punto desde el eje que pasa a través del centroide paralelo al eje de torsión e I es la integral de Y^2 sobre el área transversal. Otra de las aportaciones importantes de Coulomb fue el tema del esfuerzo que hoy conocemos como cortante, su opinión era que la fractura ocurría cuando el esfuerzo cortante del material es más grande que cierto límite pero lo consideró sin deformación elástica previa en el año de 1776.

El primero en plantear el cortante como una deformación elástica fue Thomas Young [10] quien notó que la resistencia de un cuerpo al esfuerzo cortante es diferente a su resistencia a la contracción o compresión, definió el módulo de elasticidad de una sustancia, lo que hoy conocemos como módulo de Young, éste concepto marca una época en la historia de la ciencia.

En 1823, el matemático francés Augustin Louis Cauchy [12] definió la mayor parte de los elementos de la teoría de la elasticidad, introdujo la noción de esfuerzo en un punto determinado como la tracción por unidad de área de sección transversal, formalizó el concepto de esfuerzo en el contexto tridimensional mostrando sus propiedades en un arreglo de tres por tres y formuló la teoría de la respuesta de un sólido isotrópico. Como parte de su trabajo, Cauchy también introdujo las ecuaciones que expresan los componentes de los esfuerzos, tres extensionales y tres cortantes [13], mostró como los

coeficientes diferenciales de los tres componentes del desplazamiento pueden ser usados para estimar la extensión de cualquier elemento lineal del material y expresó además las deformaciones cerca de un punto en términos de los seis componentes de la deformación. Cauchy determinó las ecuaciones del movimiento mediante las cuales los componentes de los esfuerzos se conectan con las fuerzas que se distribuyen en el volumen con reacciones cinéticas [14].

Durante el siglo XIX, el hierro y el acero empezaron a ser utilizados con fines estructurales y la fractura de éstos materiales fue considerada por muchos estudiosos de aquella época, Kirkaldy [15] realizó estudios experimentales en aceros provenientes de diferentes fabricantes y menciona en su obra publicada en 1876: “...Cada uno de los especímenes fue medido, probado, y los resultados fueron registrados personalmente, y en una serie de reportes tabulados los he dado de la mejor manera posible, numéricamente. Los especímenes fueron cuidadosamente preservados y pueden ser vistos...”. El trabajo de Kirkaldy [16] también incluía de manera gráfica las regiones de las fracturas presentadas durante sus ensayos. Además de representar el efecto de las perforaciones en el corrimiento de las fracturas, no utilizó los términos de fractura frágil o dúctil, sin embargo, observó que las fracturas en los materiales se presentaban de manera abrupta en ángulos rectos o de manera gradual con apariencia de seda y fracturas en forma de copa, característica de la fractura dúctil: “...todas se quebraron más o menos abruptamente con fracturas en ángulos rectos, los más blandos, quebraron muy gradualmente con apariencia sedosa y en forma de copa” menciona Kirkaldy en su reporte, además de representar las fallas de manera gráfica como se muestra en la Figura 1.4

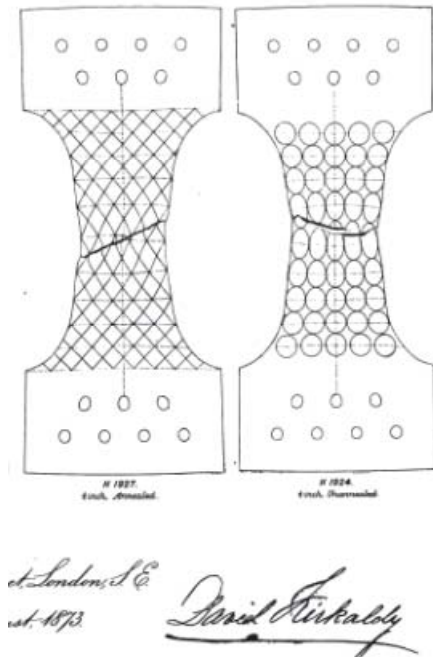


Figura 1.4 Fracturas de los especímenes de Kirkaldy.

Fue en 1898 cuando G. Kirsh [17] obtiene la solución para la distribución de esfuerzos alrededor de un orificio circular en una placa con cargas de tensión, su análisis mostraba una significativa concentración de esfuerzos en las zonas limítrofes al orificio hasta tres veces más que el resto de la placa cuando ésta era sujeta a tensión uniaxial.

En 1907, el matemático Ruso Yuri Vasilievich Kolosov [18] propone un método analítico de cálculo de tensiones en la vecindad de un orificio en una placa de dimensiones infinitas, Kolosov hizo sus estudios en la universidad Yurev en San Petersburgo, Rusia y dedicó su años como académico estudiando la mecánica de sólidos y las teorías de la elasticidad, derivó la solución de los esfuerzos alrededor de un orificio elíptico, mostrando que la concentración de esfuerzos es mucho más grande conforme el radio de la curvatura al final del hueco se hace más pequeño comparado con la longitud de éste, a partir de 1908 Kolosov se dedicó exclusivamente al estudio de la elasticidad y sus fórmulas son aún utilizadas. Independientemente, en 1914 el británico Charles Inglis [19] llega a la misma solución, las conclusiones de ambos llevaron a los ingenieros de la época a considerar las concentraciones de esfuerzos y su riesgo en las estructuras en las cuales sin

éstas consideraciones los esfuerzos estarían en niveles de seguridad aceptables, las concentraciones de esfuerzos dan lugar a la nucleación y crecimiento de fallas.

1.2. Mecánica de la Fractura lineal elástica en el contexto del siglo XX.

La teoría básica en la cual se origina la Mecánica de la Fractura tiene su origen en el trabajo publicado por Alan Arnold Griffith [20] en el cual analiza la resistencia mecánica del vidrio utilizando fibras de éste material, la Figura 1.5 muestra los resultados que obtuvo y puede observarse que el esfuerzo de ruptura aumenta al disminuir el diámetro de sus especímenes de prueba, Griffith atribuyó éste fenómeno al decremento de posibilidades de defectos al disminuir el diámetro de las fibras. Griffith partió del trabajo de Kosolov [18] e Inglis [19], conocía el método desarrollado hasta ese entonces en el que se calculaba la concentración de esfuerzos alrededor de huecos elípticos y consideró como usarlo para predecir la resistencia a la fractura, sin embargo, matemáticamente los esfuerzos tienden al infinito en los límites de una fisura perfecta, esto evidentemente no ocurre de manera física, de hecho existe una deformación elástica previa al corrimiento de la fractura, Griffith se enfocó en el balance de energía en lugar de el análisis de esfuerzos en la zona limítrofe a la grieta.

Cuando una fractura se ha propagado en un sólido a cierta profundidad, la región adyacente a la superficie libre de esfuerzos libera energía, Griffith [20] calculó ésta energía liberada, utilizando el balance energético de la primera ley de la termodinámica que básicamente establece que en un sistema cerrado la energía se conserva, Griffith asumió que el corrimiento de una fractura requiere de la creación de una energía en la superficie la cual surge de la pérdida de energía de esfuerzo acompañada de una reducción localizada de esfuerzos conforme la fractura avanza, el fallo ocurre cuando la pérdida de energía de esfuerzo es suficiente para proveer un incremento en la energía de superficie [21].

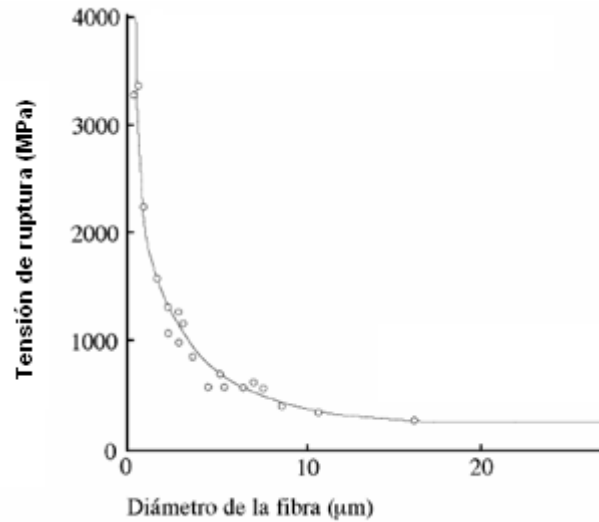


Figura 1.5 Resultados de Alan Arnold Griffith en fibras de vidrio.

La teoría desarrollada por Griffith para materiales frágiles fue posteriormente modificada por George R. Irwin [22] y E. Orowan [23], extendiendo su aplicación a materiales metálicos, ellos sugirieron que en un material dúctil, una buena parte de la energía de deformación liberada es absorbida por la energía que se disipa debido al flujo plástico del material cerca de la fisura y observaron que las fracturas catastróficas ocurren cuando la energía de deformación se libera con una rapidez suficiente para que ocurra el fallo.

Muchos de los avances tecnológicos y científicos se han desarrollado durante las guerras y la Mecánica de la Fractura no es la excepción, un ejemplo de esto fue durante la Segunda Guerra Mundial en la que la demanda de buques de guerra requirió de su construcción a gran escala en Estados Unidos y se inició su fabricación en 1940 a partir de planchas de acero soldadas sin remaches, ésta serie de buques que originalmente fue un diseño británico conocido como Liberty, fue adoptado por Estados Unidos debido su costo menor y la rapidez de fabricación, el desconocimiento del diseño y análisis de grandes estructuras soldadas tuvo como consecuencia que se presentaran fallas catastróficas en algunos de los buques fabricados las cuales fueron consecuencia de fracturas en los cascos sin causas aparentes. Las fallas iniciaron durante 1942 y se presentaron de nuevo durante el invierno. La Figura 1.6 muestra un buque con éste modo de falla.



Figura 1.6 Falla por fractura del buque S.S. Schenectady (1944).

Durante la segunda guerra mundial Estados Unidos construyó más de 5000 buques, en el 20% de las unidades se detectaron fallas estructurales de variada magnitud durante los primeros años de servicio, fallas serias debido a fracturas se observaron en más de 250 y alrededor de 20 embarcaciones tuvieron que abandonarse debido a fallas masivas [24]. Los estudios concluyeron que en todos los casos las fracturas se originaron debido a severas concentraciones de esfuerzos y a que el diseño se basó en las propiedades de resistencia máxima a la tensión sin considerar los modos de fractura, la mayor parte de las fracturas en los buques Liberty iniciaron en las esquinas de las placas de cubierta., a ésta conclusión llegó el grupo de investigadores dirigidos por G. R. Irwin en el laboratorio de investigación de la naval de Estados Unidos por sus siglas en inglés NRL (Naval Research Laboratory), el resultado obtenido fue una nueva propiedad de los materiales conocida como resistencia a la fractura simbolizada como K_{Ic} y éste factor en nuestros días define la Mecánica de la Fractura. Esta forma de análisis de la fractura conllevó a otro problema, el acero utilizado en los buques no es perfectamente elástico y sufre de deformaciones plásticas en la vecindad de la ranura de inicio del corrimiento de la fractura, esto limitó el uso de la teoría de la fractura elástico lineal de manera práctica aunado a dos razones

adicionales, obtener el valor de K_{Ic} era más costoso y la información para seleccionar el tipo de acero podía obtenerse de las pruebas de impacto Charpy de mucho menor costo, la segunda razón fue que en el material cercano a la elasticidad lineal existía poca deformación plástica y el acero se comportaba de manera frágil lo que llevaría al problema original en las fracturas de buques, sin embargo, el diseño de las embarcaciones Liberty dio nuevos conocimientos técnicos para construir estructuras que soportaran mejor las fracturas, así se sabe que las construcciones con remaches o pernos toleran más las fisuras que aquellas construidas con procesos de soldadura, esto debido a que los mejores criterios de inspección de juntas soldadas no garantizan la ausencia total de defectos, además, las perforaciones para los pernos o remaches introducen concentraciones de esfuerzos mucho más pequeños que las juntas soldadas, aunado a esto, los remaches causan compresión en los bordes de las perforaciones lo que retrasa la iniciación de las grietas., la grieta puede propagarse en una estructura remachada hasta los bordes de una placa pero no a través de la junta mientras que las placas soldadas pueden propagar la grieta entre placa y placa a lo largo de toda la estructura, los cambios en el diseño de los buques Liberty incluyeron el redondeo y reforzamiento de las esquinas en las placas además de la introducción de remaches como mecanismo de contención en el corrimiento de las fracturas.

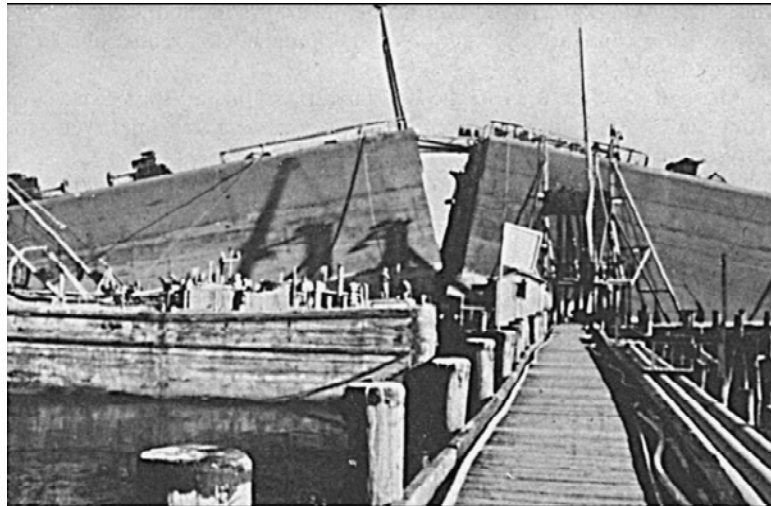


Figura 1.7 Fractura del buque I.O.S. 3301 ocurrida en 1972.

Aún con las mejoras en los diseños, el uso de mecanismos de contención para el corrimiento de las fracturas, el control de la composición química de los aceros y la mejora en los procesos de fabricación de los mismos, las fracturas siguieron ocurriendo., a principios de los años cincuenta, entre 1951 y 1953, dos cargueros relativamente nuevos con sus estructuras soldadas fallaron. En el invierno de 1954 otro buque soldado construido con aceros de calidad superior y usando todas las consideraciones en los diseños conocidas hasta ese entonces, se partió en dos., desde 1950 los fallos en los buques siguieron presentándose pero con mucho menor incidencia, al menos diez buques con éste modo de falla se fracturaron entre los años de 1960 y 1965 y un número de fallas adicionales posteriormente. La fractura del buque Barge I.O.S. 3301 en 1972 con solo un año de servicio ocurrió de manera inesperada anclado en puerto con el mar en calma, la Figura 1.7 muestra el fallo ocurrido [24].

En 1948 Irwin [25], ya para ese entonces profesor de la Universidad de Leigh, mostró que el criterio de Griffith podía ser incluido en la región plástica y en 1957 [22] extendió éste criterio a cualquier fractura proponiendo que el crecimiento de la grieta ocurría cuando la energía de deformación liberada (G) era mayor que la energía crítica (G_c), se dice que la notación G fue por la inicial de Griffith, sin embargo otros autores mencionan que Irwin lo asigno por su nombre, George [26].

Posteriormente, J. A. Kies [27], quien fue colaborador de Irwin en el NRL, observó que el esfuerzo crítico para un tamaño de fisura dada dependía únicamente de $G_c E$, donde E es el módulo de elasticidad y G_c el ya definido valor de energía crítica. La respuesta de los ingenieros de la compañía Boeing fue el uso de $(G_c E)^{1/2}$ el cual definió el factor de tenacidad a la fractura K_c como reconocimiento a Kies. Irwin, usando el criterio de H.M. Westergaard relacionó G al campo de esfuerzos en la punta de la grieta e introdujo el factor de intensidad de esfuerzos $K = (GE)^{1/2}$ también nombrado así en honor a Kies [28], definiendo así lo que hoy en día se conoce como Mecánica de la Fractura Elástico Lineal. Irwin mostró que cualquier fractura puede describirse mediante tres casos fundamentales de fractura dependiendo del modo de carga (Figura 1.8), así, K_I, K_{II} y K_{III}

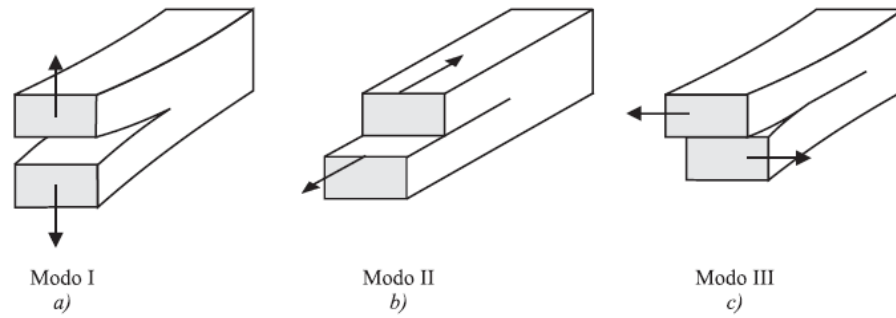


Figura 1.8 Modos básicos de desplazamiento de fracturas.

corresponden a los modos de carga I, II y III respectivamente, el modo I o de apertura en el que la separación de las caras se da como consecuencia de tensiones normales., el modo II o de deslizamiento en el cual existen desplazamientos de superficie consecuencia de esfuerzos cortantes perpendiculares al frente de la grieta y el modo III o de desgarre, en éste último, existe deslizamiento y cizalladura en dirección paralela al frente de la grieta, éstos modos de fractura pueden observarse en la Figura 1.8. Para geometrías y cargas relativamente sencillas existen tablas que contienen los valores de intensidad de esfuerzos [28]. En Mecánica de la Fractura la determinación de los parámetros que describen las tensiones y los desplazamientos en la punta de las grietas es de suma importancia de tal forma que si existiera un factor de intensidad de esfuerzos que exceda el valor crítico específico del material, la fractura se propagaría hasta el fallo del material.

El desarrollo de la Mecánica de la Fractura se dio de manera aislada en Europa y América durante las décadas de 1940 y 1950 con excepción de algunos casos, entre ellos el de Wells que regularmente visitaba a Irwin en Estados Unidos. Los investigadores en Europa se enfocaron en los aceros de baja resistencia en donde el problema más importante fue la transición dúctil a frágil, mientras que en estados Unidos hubo más interés por los aceros de alta resistencia los cuales se utilizaban en las carcasas de los motores de cohetes. La aplicación de las teorías de Griffith en los aceros de baja resistencia es prácticamente nula, por lo que no es de extrañarse que el desarrollo de la Mecánica de la Fractura elástico lineal ocurriera en Estados Unidos, no obstante se llevaron a cabo investigaciones aisladas en Europa en el tema elástico lineal, una de éstas investigaciones fue la desarrollada por

Rivlin y Thomas [29] sobre la ruptura de los materiales elastoméricos, como en el caso de los materiales de alta resistencia, éstos sufren de deformaciones extremadamente grandes y son deformaciones no lineales, Rivlin y Thomas propusieron una aplicación generalizada de las teorías de Griffith en el ámbito de los elastómeros, plantearon que la condición crítica para la ruptura catastrófica ocurría cuando la energía liberada por el corrimiento de la fractura era igual a la energía de desgarre T (del idioma inglés *tearing*) el cual es el equivalente al valor G_c de Irwin, pero, debido a que la deformación no es lineal las ecuaciones de Griffith no podían ser utilizadas, éste tipo de materiales son sujetos a prueba bajo condiciones fijas de sujeción de manera tal que la energía liberada proviene únicamente de la energía de deformación almacenada, Rivlin y Thomas usaron un método gráfico para determinar la rapidez de la energía liberada y mostraron que la ruptura ocurría cuando ésta llegaba a un valor crítico igual a la energía de ruptura T [30].

A principios de los años cincuentas, la aeronave Comet fue la primera con motor de propulsión en servicio comercial de pasajeros [31] , el avión era superior a los transportes aéreos de propela existentes hasta ese entonces y por consiguiente, una buena parte del mercado fue cubierta por ésta aeronave. En los años 1940's había avances tecnológicos en la aviación militar los cuales originaron el cambio de los biplanos impulsados con propelas por los aviones con motores de reacción, al finalizar esa década, la aviación civil seguía utilizando los motores antiguos. El 2 mayo de 1952 el avión Comet entra en servicio como el primer jet comercial de pasajeros entrando la aviación civil en una nueva era. El avión Comet había sido conceptualizado en 1943 en Inglaterra por Sir Geoffrey de Havilland iniciándose los trabajos de diseño en julio de 1949 y en ese año ya existía una orden de compra por 14 unidades para la compañía British Overseas Airways. Al entrar en servicio el Comet podía transportar 36 pasajeros con una velocidad crucero de 200 metros por segundo con una autonomía de vuelo de 4000 Km. Para asegurar la viabilidad comercial el peso de la aeronave debía mantenerse al mínimo, las técnicas de construcción empleadas fueron una mezcla de técnicas tradicionales y de innovación tales como los nuevos adhesivos llamados Redux. El Comet utilizaba cuatro motores turbohélices del tipo Ghost construidos por la compañía Havilland Engine Company Limited, el avión debería volar a una altitud de 10.7 kilómetros que representaba el doble

de la altitud de vuelo de las aeronaves comerciales existentes en ese entonces. En altitud crucero, los pasajeros y la tripulación requerían de un suministro de oxígeno y se decidió presurizar la cabina con un equivalente de presión confortable de 2.4 kilómetros de altitud lo cual originaba una presión diferencial en el fuselaje de 56 kilo pascales en altitud crucero, esto representa el doble de lo convencional por lo que la compañía Havilland realizó muchas pruebas para garantizar la integridad de la cabina [32].

No obstante el cuidado en el diseño y la cantidad de pruebas realizadas, poco después de entrar en servicio, dos aeronaves de la compañía aérea British Overseas Airways Corporation sufrieron súbitamente de descompresión durante su ascenso a altitud crucero debido a fallas en el fuselaje lo cual originó en las pérdidas de las naves y las vidas que se encontraban a bordo. Las investigaciones concluyeron que las fallas se debieron a fracturas por fatiga en el fuselaje del avión, específicamente en regiones de elevadas concentraciones de esfuerzos adyacentes a las esquinas de las ventanas que fueron diseñadas originalmente de forma cuadrada como se observa en la Figura 1.9, las cargas de fatiga se originaron debido a las constantes presurizaciones y despresurizaciones de la cabina durante cada ciclo de despegue y aterrizaje.



Figura 1.9 Avión DH-106 Comet (1952).

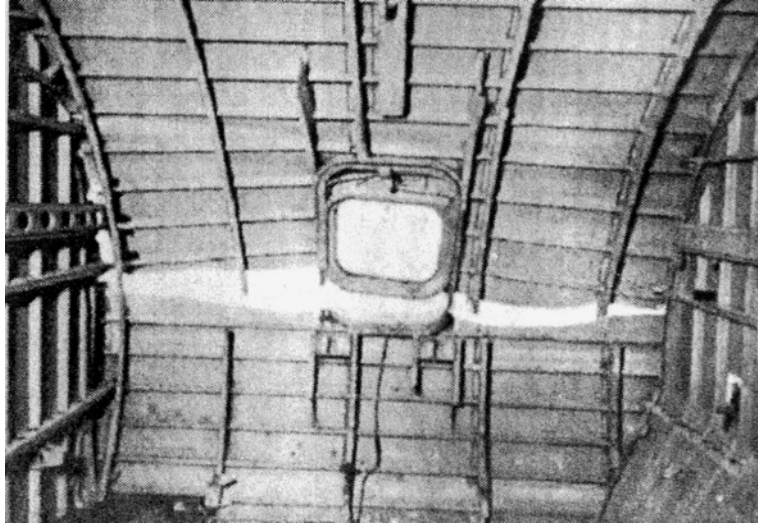


Figura 1.10 Fractura del avión Comet.

La presencia de fracturas por fatiga fue confirmada mediante estudios realizados en los restos de las aeronaves siniestradas en la superficie de las fracturas presentadas, encontrándose marcas fractográficas características del crecimiento de las fracturas por fatiga [31] , la Figura 1.10 muestra la zona de la falla.

El resultado de éstos accidentes fue significativo, toda la flota dejó de volar, y las órdenes de compra fueron canceladas, éstos acontecimientos centraron la atención en la importancia que tiene el crecimiento de las fracturas por fatiga en las estructuras de las aeronaves además de considerar que los fuselajes presurizados debían ser diseñados de tal forma que las despresurizaciones catastróficas se evitaran cuando existieran daños por fatiga e incluso por desprendimientos de partículas en un motor colapsado que pudiesen penetrar el fuselaje, además, como resultado de éstos accidentes los criterios de diseño fueron mejorados para incrementar la confiabilidad considerando los efectos del crecimiento de la fractura por fatiga y los criterios de inspección también fueron mejorados [31].

Para el análisis de la falla no se utilizaron los elementos de la Mecánica de la Fractura ya que ésta no había sido desarrollada aún, es interesante mencionar que en 1997 Withey [32] publicó un artículo en el que utiliza la Mecánica de la Fractura como herramienta de análisis a partir de los datos conocidos del Comet, llevándolo a la

conclusión de que la ruptura se originó a partir de una fisura de alrededor de $100\ \mu\text{m}$ y estimando que éstas fisuras se propagaron únicamente $1.7\ \text{mm}$ antes del fallo catastrófico.

En 1957 Irwin [22] propuso el primer método experimental para el estudio de las fisuras mediante tensometría resistiva conocido hoy como calibradores de deformación o extensométricos, sin embargo, el método no se utilizó hasta 30 años después debido a las incertidumbres relacionadas con el efecto gradiente y el tamaño de la región de dominio de K [33]. El calibrador de deformación consiste en un cable o papel que forma un reticulado continuo y es colocado en la superficie del componente sujeto a investigación de manera que cualquier deformación que ocurra también será experimentado por el calibrador, debido a la relación de longitud-resistencia de un conductor, cualquier cambio en la sección transversal del calibrador originará un cambio en la resistencia del mismo, el cambio en la resistencia eléctrica se transforma mediante instrumentación en cambios de longitud del espécimen sujeto a prueba y así se determina la deformación ocurrida, la Figura 1.11 muestra un ejemplo, los calibradores se fabrican mediante un proceso de impresión de circuitos a partir de aleaciones previamente seleccionadas, hoy en día existen diferentes tipos de variada aplicación teniendo capacidad de medir deformaciones lineales, pandeos e incluso deformaciones en flechas debido a torsión [34].

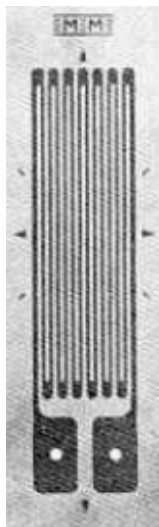


Figura 1.11 Ejemplo de calibrador para estudios extensométricos.

En 1958 se publicaron los primeros artículos relacionados con la evaluación de la distribución de esfuerzos y la propagación de grietas basados en fotoelasticidad, partiendo de ésta información, Irwin propone que los factores de intensidad de esfuerzo pueden estimarse midiendo la distancia entre la punta de la grieta y el punto más lejano de una franja en el patrón isocromático típico en la vecindad de la grieta además del correspondiente ángulo de inclinación en el eje de ésta. Desde entonces, se han realizado diversos estudios para estimar el factor de intensidad de esfuerzos K_I correlacionando los resultados obtenidos por la propuesta de Irwin para estimarlos mediante fotoelasticidad [35]. Además, la fotoelasticidad se ha utilizado en la estimación de los factores K_I , K_{II} y K_{III} para los diferentes modos de fractura e incluso en modos de carga mezclados con especímenes de diferentes geometrías [36]. Cuando la luz polarizada pasa a través de un modelo transparente sujeto a esfuerzos, se forman patrones de interferencia o franjas, estos patrones proveen de información cualitativa acerca de la distribución general de esfuerzos, posiciones y áreas de concentración de los mismos. Cuando el modelo se encuentra libre de esfuerzos la luz polarizada pasa sin ser alterada, por el contrario, cuando el modelo está sometido a esfuerzos el resultado es un patrón de franjas que pueden verse. Los modelos fotoelásticos se construyen de materiales transparentes especiales los cuales exhiben una propiedad de refracción y tienen la habilidad de bifurcar la luz polarizada que incide en el modelo, ésta propiedad solo ocurre cuando el material está sujeto a esfuerzos y su dirección incide con la dirección de los esfuerzos principales. Si la fuente de luz es monocromática el patrón de franjas aparece como una serie de líneas negras en un fondo de color uniforme, si se utiliza luz blanca, se obtienen franjas multicolores denominadas multicromáticas. Las fuentes monocromáticas son utilizadas preferentemente en mediciones cuantitativas debido a que pueden observarse un mayor número de franjas mostrando por ejemplo la localización de las concentraciones de esfuerzo, mientras que la luz blanca se utiliza para modelos cualitativos como en los casos en que se requiere investigar la dirección de los esfuerzos usando las denominadas isóclinas. La técnica de fotoelasticidad muestra esfuerzos principales, valores frontera y dirección de los esfuerzos. La fotoelasticidad también ha sido empleada para el estudio de los mecanismos de crecimiento de grietas por fatiga en éstos casos las franjas aparecen en las regiones

deformadas manera elástica así como también en las regiones plásticas, en la Figura 1.12 puede observarse el patrón de franjas en la vecindad de una grieta [37].

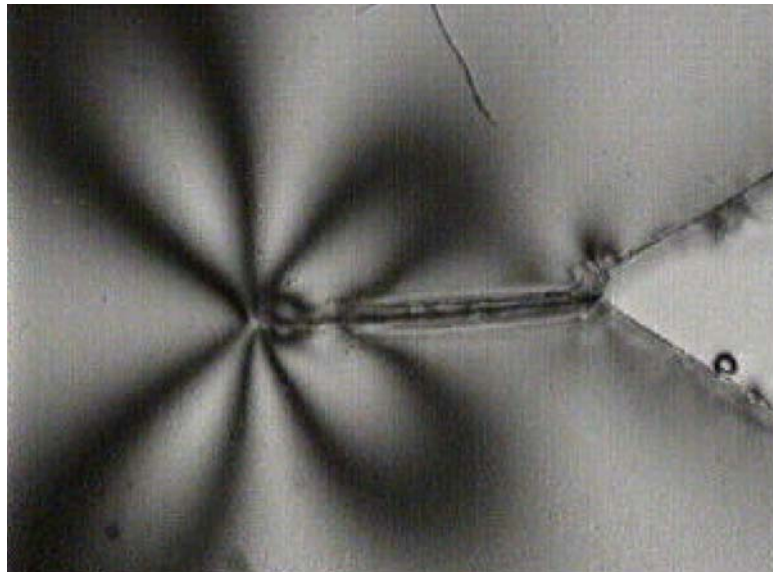


Figura 1.12 Ejemplo del patrón de las franjas después de remover la carga.

En 1959 Barenblatt [38] consideró las fuerzas de cohesión en la vecindad de la punta de una fisura dentro de la teoría lineal elástica, sus trabajos se basaron en la relación tracción-desplazamiento la cual considera desplazamientos interfaciales. Dentro del marco lineal elástico Barenblatt asume la existencia de fuerzas de cohesión alrededor de la punta de la fisura las cuales son capaces de eliminar totalmente la fricción dentro de las superficies, en el modelo de Barenblatt la distribución de éstas fuerzas no se especificaban pero asumía que dichas fuerzas actuaban en una pequeña zona denominada zona de cohesión cerca de la punta de la grieta de tal forma que la fisura cierra de una forma suave [30], Barenblatt dividía las superficies de las fracturas en dos regiones: una región interna donde los lados opuestos de la grieta están separados de tal forma que las fuerzas de cohesión son despreciables y una región en la punta de la fisura en la cual la distancia de los lados de la fisura son muy cortas y las fuerzas de cohesión están presentes., en el caso de la fractura cuasi-frágil la superficie se toma como la frontera entre la región plástica que rodea la grieta y la parte exterior de ésta., las fuerzas de cohesión aumentan con el incremento de la carga aplicada hasta que finalmente llega al máximo de intensidad,

después de éste punto, inicia el crecimiento de la fractura [38] [39]. Barenblatt basa su teoría en tres hipótesis fundamentales:

a).- Las dimensiones longitudinales de la región en el borde son pequeñas comparadas con las dimensiones de la fisura completa.

b).- La distribución de los desplazamientos de los puntos sobre las superficies en la región limítrofe de la punta de la grieta no depende de las cargas existentes y es siempre la misma para un material dado bajo condiciones dadas. Las fuerzas de cohesión, las cuales atraen entre sí a los bordes contrarios de la fisura dependen únicamente de la distribución de los desplazamientos en el límite de la región, por lo tanto, la hipótesis envuelve independencia de esas fuerzas con respecto de las cargas.

c).- Las aristas de la fractura están conectadas suavemente entre si al final o, lo que es lo mismo, los esfuerzos son finitos en la punta de la grieta.

Barenblatt partiendo de éstas hipótesis encontró la solución del problema de las fracturas rectilíneas en equilibrio aplicadas a placas planas [39]. Según Willis [40], después de realizar una comparación de los criterios de Griffith y Barenblatt, el modelo de éste último no mostraba ventajas significativas para predecir el corrimiento de la fractura pero si ofrecía una idea más realista de los esfuerzos en la vecindad de la fisura y por lo tanto mejoraba en gran medida el conocimiento del mecanismo básico de la fractura.

Barenblatt asume que las fuerzas de cohesión actúan en una pequeña región denominada zona de cohesión de manera tal que las caras de la grieta terminan cerrando de manera suave. En 1960 Dugdale [41] asume que las fuerzas de cohesión son conocidas y constantes., Barenblatt y Dugdale fueron los primeros en incluir las fuerzas de cohesión en la región de la punta de una grieta. De acuerdo al modelo Dugdale-Barenblatt, la zona plástica está confinada a una región angosta que forma una protuberancia delante de la punta de la grieta éste modelo fue analizado posteriormente por Theocaris y Gdoutos [42] tomando en consideración el efecto de fluencia en la zona plástica al hacer la fisura más grande y considerando también las fuerzas de cohesión las cuales restringen el corrimiento de la grieta. Theocaris y Gdoutos utilizaron el método de cáusticas en el cual las

singularidades de los esfuerzos en la punta de la fisura son transformadas a singularidades ópticas aplicando leyes matemáticas. Las singularidades ópticas fueron definidas experimentalmente con muy buena precisión y exactitud de manera tal que los esfuerzos en la vecindad de la grieta pudieron ser evaluados por éste método validando así el modelo de dugdale-Barenblatt.

En 1960 se abordó por primera vez la propagación de las grietas debido a fatiga de los materiales, Paris establece su conocida ley de propagación de fracturas dentro del marco lineal elástico. Con el modelo de Paris se puede obtener el número de ciclos en los que una fractura se propaga de una longitud inicial a un tamaño crítico en el que la estructura falla [30]. El desarrollo del crecimiento de grietas debido a fatiga en los materiales antes de 1960 no se analizaba bajo la perspectiva de seguridad en situaciones estructurales, Paris aplicó el método de Irwin para el análisis de esfuerzos en las fisuras al crecimiento de las fracturas debido a la fatiga., [43], además sugirió que la rapidez de crecimiento de las fisuras debido a la fatiga de los materiales puede ser caracterizado utilizando el parámetro de intensidad de esfuerzos en la punta de una fisura y los datos representados podían ser relacionados para predecir el crecimiento de fracturas en elementos estructurales a partir de resultados de laboratorio.

1.3. Desarrollo de la Mecánica de la Fractura elastoplástica.

La extensión de la Mecánica de la Fractura al régimen lineal-elástico requirió de nuevos conceptos, el modelo de Desplazamiento de la Abertura de la Grieta (del inglés COD Crack Opening Displacement) posteriormente denominado CTOD (Crack Tip Crack Opening Displacement) relaciona la idea de que el trabajo de la fractura es representado por el producto del esfuerzo a través del plano de la fractura cerca de la punta de la grieta y el desplazamiento de la abertura de la fisura [44]. Este concepto fue introducido por Wells en 1961 para modelar la fractura bajo condiciones de deformación plástica considerable asumiendo que para que la fractura ocurra debe haber una abertura crítica, proponiendo que el comportamiento de la fractura en la vecindad de la punta de la grieta puede ser caracterizado por la apertura de las caras, más aún, mostró que el modelo CTOD era análogo al concepto de G_c y por lo tanto, los valores de CTOD podían ser relacionados

con el factor de tenacidad a la fractura K_{Ic} . Debido a que la medición de CTOD puede realizarse incluso cuando existe un flujo plástico considerable delante de la grieta., como puede ser en los casos en que existe un comportamiento elastoplástico o plástico puro, ésta técnica puede ser utilizada para establecer esfuerzos críticos de diseño o tamaños de grietas en una manera cuantitativa similar a la fractura lineal elástica [26].

Cuando la fractura ocurre en un elemento aparece implícita una región plástica en la vecindad de la punta de la grieta, dependiendo del tamaño de esa región plástica el concepto del criterio de Griffith no puede ser aplicado directamente, en la década de 1960, J. R. Rice [45] desarrolló un nuevo parámetro para el estudio de la fractura para describir los casos en los que existe suficiente deformación plástica en la vecindad de la grieta, éste método de análisis se conoce como la integral J y se aplica en los casos en que la deformación plástica es suficientemente grande para ser considerada.

1.4. El método del elemento Finito.

El método del elemento finito (FEM por sus siglas en inglés *Finite Element Method*) es una técnica numérica de aplicación en la solución de problemas en el área de mecánica de sólidos, éste método ha sido utilizado en varias disciplinas y muchos de los avances existentes en diseño estructural, en tecnologías de nuevos materiales emergentes, en el área aeroespacial y en muchas otras áreas no serian posibles hoy en día sin la utilización del FEM. La Mecánica de la Fractura no ha sido la excepción y también se ha beneficiado del FEM, el uso rutinario de las herramientas de la Mecánica de la Fractura en el diseño se debe a la habilidad de poder predecir de manera numérica los factores de intensidad de esfuerzos y es cada vez más utilizado en plasto-elasticidad en aplicaciones de alta tecnología ya que existen programas computacionales cada vez más amigables en su uso.

Las primeras soluciones del FEM empleaban elementos convencionales los cuales ignoraban el campo de deformaciones cerca de la punta de la grieta de tal manera que para modelar las deformaciones se requería de mallados sumamente densos de tal forma que para obtener soluciones con un nivel de exactitud superior al 95% se requerían

de mallados imprácticos de más de 10,000 grados de libertad, además estudios de convergencia indicaban que las soluciones cerca de la punta de la grieta nunca eran exactas sin importar la densidad del mallado [46].

A principios de los años 70's se empezó a utilizar una técnica de subestructuras, en ellas se subdividía el dominio en subestructuras con un mallado menos denso. El dominio cerca de la grieta se modelaba como un macro elemento con un mallado sumamente fino y denso “suavizando” la frontera externa para acoplar el mallado externo. El uso de ésta técnica producía resultados aceptables y su ventaja se debía a la habilidad de manejar geometrías complejas sin utilizar mallados densos, desafortunadamente, la técnica tenía todas las limitantes del método convencional el acoplar el mallado es válido únicamente si la región de la fractura es suficientemente grande para mostrar gradientes de deformación despreciables a lo largo de la frontera. En la práctica, un reticulado meticuloso puede producir resultados con la misma precisión sin la técnica de subestructuras, éste método no se emplea en la actualidad, la Figura 1.13 muestra el mallado utilizado para analizar un espécimen por Chan y Wilson [46] en 1970.

El método de Wilson identificaba una región núcleo que rodeaba la grieta en el cual el campo de desplazamiento es conocido (con excepción de los factores de intensidad de esfuerzos) el resto del dominio se modelaba utilizando FEM convencional, la formulación del elemento finito es modificado para incluir una minimización con respecto de los factores de intensidad de esfuerzos desconocidos además de los grados de libertad nodal, el resultado es un sistema de ecuaciones lineales las cuales predicen los desplazamientos nodales y los factores de intensidad de esfuerzos de manera directa. Estudios numéricos posteriores han demostrado que la opción del tamaño óptimo del núcleo es sumamente difícil de predecir, éste método no converge uniformemente y con frecuencia predice resultados erróneos, es sin embargo el primero que considera la singularidad en la punta de la fisura de una manera consistente, el método además de no utilizarse en la actualidad nunca se extendió a análisis tridimensionales [47].

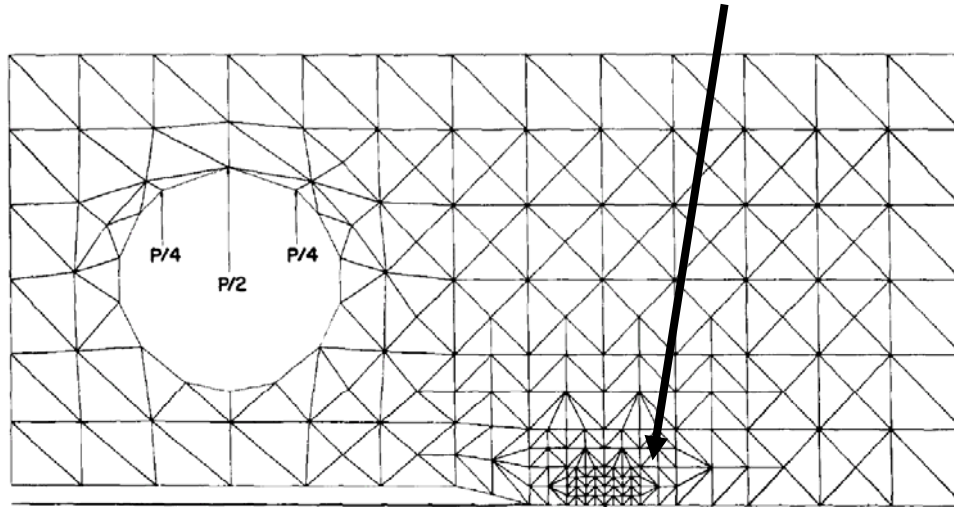
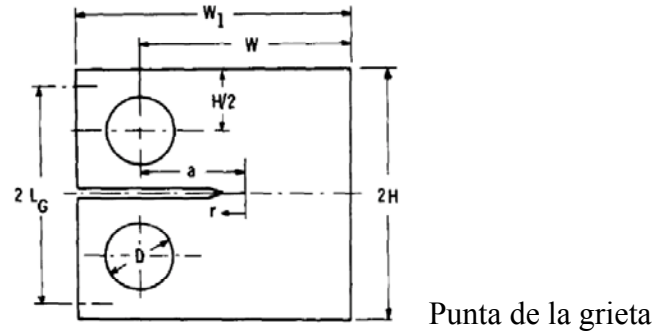


Figura 1.13 Representación Del FEM en un espécimen.

Debido a las limitaciones y problemas del método de la región núcleo se propuso la incorporación directa de la naturaleza asintótica del campo de deformaciones o desplazamiento en las funciones de forma del elemento., para problemas bidimensionales se han propuesto elementos de tres y seis nodos y para problemas tridimensionales elementos de seis y quince nodos., éstas formulaciones utilizan funciones de forma las cuales producen singularidades de deformación correctas, sin embargo, las incógnitas primarias son los desplazamientos nodales de manera que los factores de intensidad de esfuerzo son post calculados. Benzley propuso el concepto del elemento enriquecido para la solución de problemas de grietas en dos dimensiones, en lugar del desarrollo de funciones de forma las cuales producen la singularidad correcta, el elemento enriquecido emplea funciones estándar en su formulación, el campo de desplazamiento es “enriquecido” adicionando el campo de desplazamiento asintótico para un plano

bidimensional de deformación (incluyendo los factores de intensidad de esfuerzo desconocidos) y restando un término el cual causa que el campo enriquecido se desvanezca en los nodos, éste procedimiento produce una singularidad de deformación correcta. La formulación del FEM predice los factores de intensidad de esfuerzo como incógnitas primarias, éste método se ha empleado en problemas bidimensionales, si bien es cierto, el método se ha aplicado a cualquier elemento convencional, el campo de deformaciones y esfuerzos generalmente se predice de manera errónea con ésta técnica [47].

Otro método para modelar fracturas elastoplásticas emplea el uso de elementos híbridos, se han desarrollado dos vertientes en éste sentido, los basados en esfuerzos y los basados en deformaciones frente a la grieta de ésta manera se obtienen soluciones muy precisas, sin embargo, debido a que los códigos no son estandarizados, su complejidad limita su uso [47].

Para calcular los factores de intensidad de esfuerzo en los modelos FEM en los que no se calcula su valor directamente, se han propuesto varios métodos, uno de ellos consiste en evaluar el desplazamiento de la abertura directamente detrás del frente de la grieta, se han planteado varias maneras de lograrlo, por ejemplo, evaluando el nodo directamente atrás del frente de la grieta en el que se requiere el factor de intensidad de esfuerzo e igualando el desplazamiento del elemento con el desplazamiento del plano de la deformación, generando así un sistema de ecuaciones que predicen el factor de intensidad de esfuerzos. Por otro lado, también se han utilizado varios puntos detrás del frente de la grieta y en cada punto, un factor de intensidad de esfuerzos efectivo se obtiene como función de la distancia y posteriormente se realiza una regresión lineal para obtener el valor de factor de intensidad de esfuerzos frente a la grieta. El uso del desplazamiento de la abertura de la grieta no es la única opción, se han desarrollado además métodos basados en las fuerzas en los nodos, éstas técnicas envuelven la integración de los campos asintóticos de esfuerzos a una distancia discreta frente a la grieta, el resultado es extrapolado posteriormente mediante una regresión lineal. Existen otros métodos como lo es el cálculo de los factores de intensidad de esfuerzos mediante la extensión virtual de la grieta, aquí, se calcula la energía liberada entre dos configuraciones con fisuras ligeramente diferentes utilizando dos corridas en computadora, trabajos posteriores han reducido el análisis a una

sola corrida. Algunos autores han utilizado además la integral J para el cálculo de los factores [47].

En la actualidad, para problemas de Mecánica de la Fractura se ha popularizado el uso de FEM, esto requiere de discretizar la estructura analizada aplicándose a problemas lineales y no lineales. Existen muchos paquetes computacionales comerciales disponibles en el mercado, algunos como Abaqus y MSC.Marc permiten calcular los parámetros de la Mecánica de la Fractura como es el caso de la Integral J. La ventaja principal de estos programas es la flexibilidad en términos capacidad de análisis., para aplicaciones del FEM en la propagación de grietas, existen programas anexos tales como Zencrack que provee de análisis tridimensional para la propagación de grietas a Abaqus, MSC.Marc y Ansys, Zencrac puede utilizar la integral J como parámetro. En el caso de los programas Franc2D y Franc3D, estos son más utilizados en aplicaciones para la solución de elementos frontera, estos programas utilizan desplazamientos para la solución por elemento finito pero no proveen de la integral J [48].

1.5. Mecánica de la Fractura por Fatiga.

Debido a la tecnología es posible medir micro fisuras cada vez más pequeñas, las observaciones realizadas sugieren que el daño por fatiga puede ser caracterizado por el tamaño de las grietas, paralelamente, los métodos de análisis de la propagación de las grietas utilizando los factores de intensidad de esfuerzos, han sido mejorados también, de manera tal que la teoría de las micro fisuras se ha unificado con los conceptos de la Mecánica de la Fractura.

Tradicionalmente la fatiga se caracteriza por las curvas de esfuerzos- número de ciclos ($S - N$) o deformación- número de ciclos ($E - N$) y la propagación de las grietas por los factores de intensidad de esfuerzos (ΔK), se observó que las grietas pequeñas inician en etapas tempranas cuando existen altos niveles de esfuerzos, por el contrario, cuando los niveles de esfuerzos son relativamente bajos, las grietas se presentaban en etapas tardías [49], la nueva forma de caracterizar la fatiga es mediante una etapa de iniciación de las grietas (N_i) y una fase de propagación (N_p), la

propagación de las grietas se caracteriza por los factores de intensidad de esfuerzos efectivos o por la integral J [49].

1.6. Corrosión-Fatiga.

La corrosión-fatiga es un modo de falla de elementos metálicos expuestos a deterioro ambiental y ocurre bajo condiciones de cargas cíclicas, se define como las etapas subsecuentes al daño acumulado en un ambiente agresivo, comparado con entornos inertes o benignos y se da como consecuencia de cargas cíclicas con deformaciones plásticas irreversibles con reacciones químicas o electroquímicas localizadas [50], conforme los ciclos de carga avanzan, se presentan 4 etapas iniciando con a) deformación cíclica plástica, b) la iniciación de micro fracturas, c) el crecimiento de fracturas pequeñas y finalmente d) la propagación de las grietas. El mecanismo de corrosión fatiga puede presentar fragilización por hidrógeno, ruptura de película, disolución y repasivación en la superficie o cualquier combinación de éstos fenómenos.

La fragilización por hidrógeno es un mecanismo de corrosión por fatiga que se presenta generalmente en aceros ferríticos y martensíticos además de otros metales como aluminio, titanio y aleaciones de níquel, el hidrógeno atómico es absorbido químicamente como resultado de una reducción electroquímica de iones de hidrógeno., el segundo mecanismo de corrosión fatiga se origina en el daño o ruptura de la película pasiva y la disolución anódica se analiza mediante un modelo con elementos empíricos para predecir la propagación en aceros al carbón e inoxidable en alta temperatura y en algunas ocasiones aplicable a aleaciones de titanio y aluminio en ambientes acuosos., la deformación plástica localizada se describe mediante la mecánica continua o por dislocaciones plásticas. El corrimiento de la fractura ocurre por disolución anódica del metal en la película dañada a una velocidad decreciente debido al repasivado de la superficie repitiéndose la secuencia de manera subsecuente [50].

Los experimentos que caracterizan la corrosión fatiga de los metales incluyen deformaciones cíclicas de especímenes maquinados con cierto nivel de precisión inmersos en un electrolito y los parámetros mecánicos dependen del tipo de prueba que puede ser fatiga de ciclos altos, fatiga de ciclos bajos o incluso propagación lineal elástica de la

fractura [50]. La Figura 1.14 muestra un ejemplo de una cámara de prueba con dos especímenes.

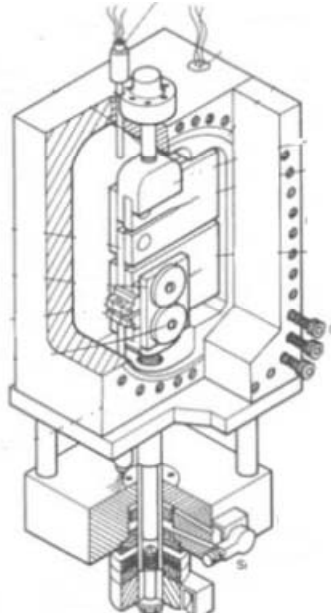


Figura 1.14 Cámara de prueba de corrosión fatiga.

Existe un fenómeno similar al de corrosión fatiga llamado corrosión bajo tensión en el cual las cargas son estáticas no fluctuantes, la forma tradicional de estudiar la susceptibilidad de los materiales a éste fenómeno se basa en el tiempo requerido para que el fallo ocurra en especímenes indentados sujetos a diferentes niveles de esfuerzos, éste método, al igual que el método tradicional S-N para fatiga, combina el tiempo requerido para iniciar la fractura y el tiempo de la propagación hasta alcanzar la dimensión crítica, ésta necesidad de separar las etapas inicial y de propagación, surgió debido a que en estudios en los que materiales aparentemente inmunes a corrosión bajo tensión utilizando especímenes lisos, presentaban fallas al someterse a las mismas condiciones con especímenes indentados. La aplicación de la Mecánica de la Fractura lineal elástica para estudiar las grietas por corrosión bajo tensiones se ha utilizado con gran éxito. Debido a que el crecimiento de las grietas y el ataque por corrosión bajo tensión ocurren en las áreas de concentración de esfuerzos, es entendible el uso de los factores de intensidad de esfuerzos para estudiar éste modo de falla [24].

CAPÍTULO 2 Fundamentos Teóricos de la Mecánica de la Fractura

En este capítulo se abordan los fundamentos teóricos de la Mecánica de la Fractura elastolineal y elastoplástica, para el análisis de la fractura frágil se utiliza la teoría de Griffith, que parte del balance energético y la teoría de Irwin que considera los esfuerzos localizados en la vecindad de la punta de la fisura, se observa además que para materiales frágiles ambas teorías son equivalentes, los factores de intensidad de esfuerzos y los diferentes modos de fractura también son incluidos, además se tratan los temas del criterio energético y la integral J así como la obtención de sus valores de manera experimental y el fenómeno de fatiga y corrosión fatiga.

2.1. Balance energético durante la propagación de la fractura, criterio de Griffith.

Las primeras investigaciones relacionadas con la mecánica de la fractura fueron realizadas por Griffith [51], su análisis plantea que las fracturas incipientes en un material idealmente frágil ocurren cuando la magnitud de la energía elástica suministrada en la punta de la grieta, durante un incremento de longitud de la fisura, es igual o mayor a la magnitud de la energía elástica en la punta de la grieta durante su crecimiento, este criterio energético se plantea de la siguiente manera:

Se considera una placa infinita con una longitud de fisura $2a$, sujeta a esfuerzos como se muestra en la Figura 2.1, la energía total del sistema puede escribirse como:

$$U_{TOTAL} = U_0 - U_a + U_\gamma \quad 2.1$$

Donde, para la ecuación 2.1:

U = Energía potencial total del sistema.

U_0 = Energía elástica inicial de la placa sin grieta.

U_a = Decremento de la energía elástica causada por la introducción de la fisura.

U_γ = Incremento de la energía de superficie causada por la formación de la fisura.

Griffith [51] utiliza la solución de Inglis [19] para calcular el campo de esfuerzos en una fisura angosta de forma elíptica y mostró que el decremento en la energía elástica almacenada en la placa no fisurada con respecto de la misma placa con una grieta como la que se muestra en Figura 2.1 cuando la carga permanece constante está dado por la ecuación 2.2.

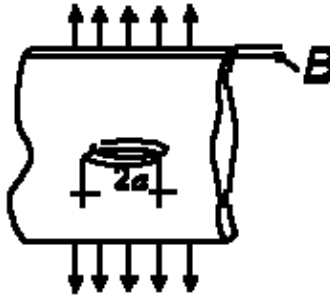


Figura 2.1 Cuerpo fisurado sujeto a esfuerzos.

$$U_a = \frac{\pi a^2 \sigma^2 B}{E} \quad 2.2$$

Donde:

$2a$ = Longitud de la Grieta.

σ = Esfuerzo aplicado.

B = Espesor de la placa.

E = El módulo de elasticidad del material.

U_a en la ecuación 2.2, es la energía liberada por la creación de una fisura de longitud $2a$ en una placa de espesor B con condiciones de esfuerzos aplicados uniformemente.

Además, Griffith establece que la energía que se absorbe al propagarse la grieta es el producto del área total de la fisura creada y de la energía de superficie específica, es decir:

Área: $A = 2a \cdot B$

Energía de Superficie: $U_\gamma = 2aB \cdot 2\gamma$

$$U_\gamma = 4aB\gamma \quad 2.3$$

Donde para la ecuación 2.3:

γ = Energía de superficie específica.

La energía de superficie específica es constante del material.

Es importante notar la diferencia entre el área de fractura y el área de superficie; debido a que la fractura incluye dos superficies, el área de superficie de fractura es dos veces el área proyectada de la fractura y es $2aB$ en este caso.

De manera tal que el total de la energía del sistema al fracturarse, para una placa de espesor B se convierte en:

$$U_{TOTAL} = U_0 - \frac{\pi a^2 \sigma^2 B}{E} + 4aB\gamma \quad 2.4$$

En la Figura 2.2 se muestra la ecuación 2.4 en función de la longitud de la fisura, el valor de U_0 es constante por lo cual no se incluyó en la figura., la condición de equilibrio se obtiene derivando la energía con respecto de la longitud de la grieta e igualando a cero para encontrar el punto máximo (de inflexión de la curva) como se muestra en las ecuaciones 2.5, 2.6 , 2.7 y 2.8:

$$0 = \frac{\partial}{\partial a} U_0 - \frac{\partial}{\partial a} \frac{\pi a^2 \sigma^2 B}{E} + \frac{\partial}{\partial a} 4aB\gamma \quad 2.5$$

$$0 = 0 - \frac{2\pi a \sigma^2 B}{E} + 4B\gamma \quad 2.6$$

$$\frac{2\pi a \sigma^2 B}{E} = 4B\gamma \quad 2.7$$

$$\frac{\pi a \sigma^2 B}{E} = 2B\gamma \quad 2.8$$

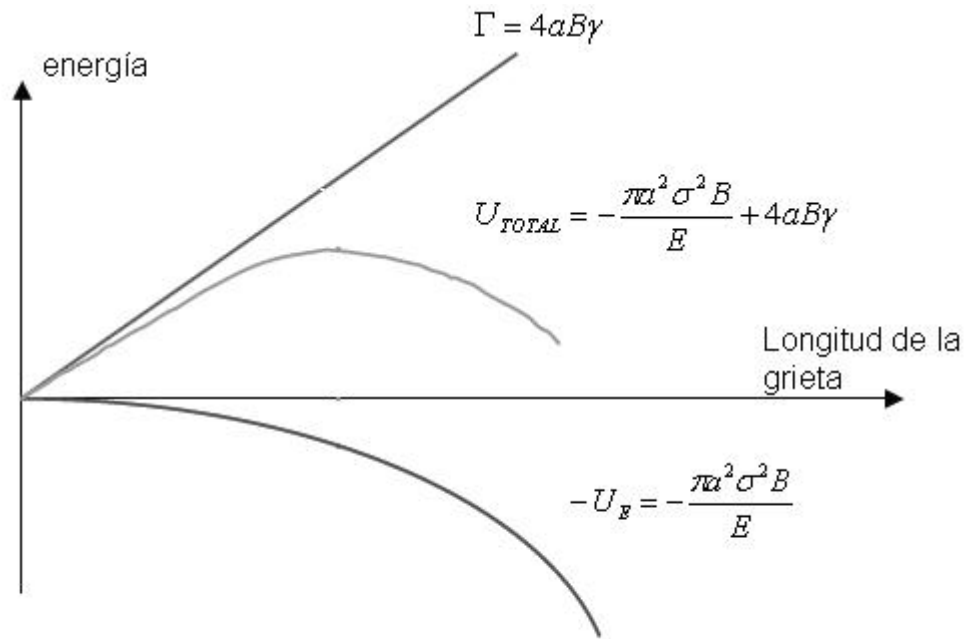


Figura 2.2 Criterio de Griffith para fractura bajo tensión uniforme.

La Figura 2.2 muestra el máximo en esta longitud de la fisura considerada como longitud crítica de fisura cuya expresión se muestra en la ecuación 2.9 para una placa de espesor unitario ($B = 1$):

$$a_c = \frac{2\gamma E}{\pi\sigma^2} \quad 2.9$$

Claramente se observa que la longitud crítica en la cual la fractura se mantiene estable decreta con el nivel de esfuerzos. Los valores críticos de esfuerzos para un cuerpo fisurado están dados por la ecuación 2.10:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad 2.10$$

Para carga constante bajo condiciones de esfuerzo plano.

La ecuación 2.9 puede escribirse como:

$$\sigma_c \sqrt{a} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi}} \quad 2.11$$

La ecuación 2.11 indica que la propagación de la grieta es determinada por el producto del esfuerzo nominal aplicado, de la longitud de la grieta y de las propiedades del material, el término de la derecha es un valor constante para un material idealmente frágil y la propagación de la grieta ocurre cuando el producto $\sigma_c \sqrt{a}$ llega a un valor crítico, este valor puede obtenerse de manera experimental.

2.2. Tasa de liberación de energía y energía de fractura, criterio de Irwin.

El criterio de propagación de grietas de Griffith fue planteado por Irwin [22] en términos de energía disponible y energía requerida para la extensión de la grieta de la siguiente manera (ecuación 2.12):

$$F - U - W = 0 \quad 2.12$$

Donde:

F = Trabajo o energía suministrado por las cargas.

U = Energía elástica almacenada.

W = Energía necesaria para extender la grieta.

$(F - U)$ Representa la energía disponible en el sistema para realizar el trabajo, es decir, la energía suministrada menos la energía elástica almacenada.

La razón de cambio de esta energía disponible con respecto del crecimiento de la grieta, representa la rapidez de liberación y se le conoce como tasa de liberación de energía G , es el mismo término establecido por Griffith en la ecuación 2.8 de tal forma que la ecuación 2.12 puede expresarse como:

$$\frac{\partial(F - U)}{\partial a} = \frac{\partial U_a}{\partial a} = \frac{\pi a \sigma^2}{E} = G \quad 2.13$$

G , en la ecuación 2.13 físicamente representa o caracteriza la cantidad de energía que puede liberarse si la fisura avanza una unidad de longitud, cuando éste valor es más grande que la energía de superficie del material, entonces la fractura puede ocurrir, de otra forma no sería posible la propagación de la fisura, por otro lado, cuando la grieta se propaga, el sistema mecánico transfiere energía de la zona no fracturada a la fractura a través del proceso de conversión de energía elástica en energía de superficie, lo anterior puede expresarse con la ecuación 2.14, G tiene unidades de trabajo por unidad de área (FL/L^2), de ahí que también se le denomine fuerza motriz de la fractura porque sus dimensiones también pueden expresarse como F/L , es decir fuerza por unidad de longitud.

$$\frac{\partial W}{\partial a} = R \quad 2.14$$

Donde R es la resistencia a la propagación de la grieta, es decir, la energía requerida para su propagación. Este término también se le denomina energía de fractura o tasa crítica de liberación de energía (G_{IC}) y es una propiedad del material.

La condición crítica G_{IC} ocurre cuando el esfuerzo llega a un valor crítico:

$$\frac{\partial W}{\partial a} = R = G_{IC} = \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad 2.15$$

De la ecuación 2.15 se puede obtener el esfuerzo crítico, al despejar el esfuerzo se tiene la ecuación 2.16:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{G_{IC} E}{\pi a}} \quad 2.16$$

El esfuerzo crítico es proporcional a $1/\sqrt{a}$, la tasa crítica de liberación de energía o energía de fractura es constante para un material dado y puede determinarse experimentalmente. En realidad, la energía de superficie de la mayoría de los metales es muy pequeña comparada con el trabajo plástico, por lo tanto, ignorar la plasticidad y utilizar únicamente G_c para el análisis da resultados erróneos [52]

El balance energético descrito en la ecuación 2.12 se aplica para el análisis estructural de componentes cuando se presentan fracturas frágiles consecuencia de cargas de tensión monotónicas, esta forma de análisis no es aplicable cuando se tienen cargas fluctuantes, el parámetro de la mecánica de la fractura que puede aplicarse a estas condiciones es denominado Factor de Intensidad de Esfuerzos (designado por K) y se relaciona con el parámetro G de la siguiente manera (ecuación 2.17)

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} = \frac{K^2}{E'} \quad 2.17$$

Donde:

E' =Es el módulo de elasticidad para esfuerzo plano o para deformación plana:

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad 2.18$$

ν en la ecuación 2.18 es la relación de Poisson, el Factor de Intensidad de Esfuerzos K que es utilizado para caracterizar la zona limítrofe a la punta de la grieta se discute en la sección 2.3.

2.3. Factor de Intensidad de Esfuerzos.

2.3.1. Campos de esfuerzos para cuerpos elásticos isotrópicos.

La superficie de una grieta influye de manera predominante en la distribución de esfuerzos en la vecindad de la fisura y representan la frontera del cuerpo cerca de ésta.

Existen tres modos básicos para generalizar el desplazamiento de una fractura sobre cuerpos fisurados sometidos a esfuerzos, el modo I o de apertura en el que la separación de las caras se da como consecuencia de tensiones normales., el modo II o de deslizamiento en el cual existen desplazamientos de superficie consecuencia de esfuerzos cortantes perpendiculares al frente de la grieta y el modo III o de desgarre, en este último, existe deslizamiento y cizalladura en dirección paralela al frente de la grieta. Estos modos de fractura están representados en la Figura 2.3.

Un cuerpo fisurado puede tener cualquiera de los tres modos de fractura o una combinación de ellos.

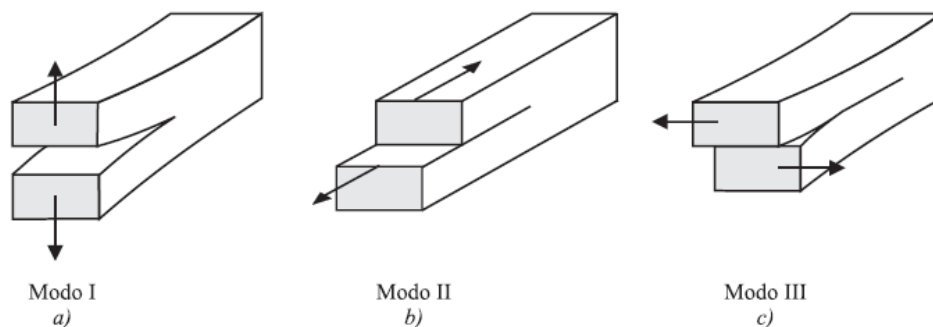


Figura 2.3 Modos básicos de desplazamiento de fractura.

La Figura 2.4 muestra la punta de una grieta en un sistema de coordenadas además del campo de esfuerzos en la vecindad de la grieta, la forma directa de determinar el campo de esfuerzos y los desplazamientos asociados con cada modo de fractura fue desarrollada por Irwin [22] y se describen en esta sección.

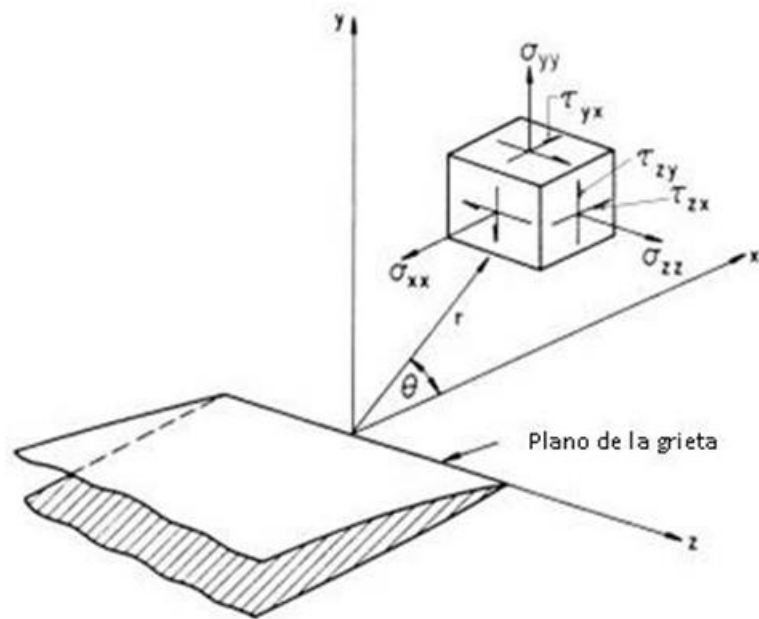


Figura 2.4 Punta de grieta y su campo de esfuerzos.

2.3.1.1. Modo I.

Las ecuaciones que determinan el campo de esfuerzos del modo I están dadas a continuación:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \text{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad 2.19$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \text{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad 2.20$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \quad 2.21$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad 2.22$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad \text{para esfuerzo plano} \quad 2.23$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{para deformación plana} \quad 2.24$$

$$u_x = \frac{K_I}{2\mu} \cdot \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[k - 1 + 2 \cdot \operatorname{sen}^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad 2.25$$

$$u_y = \frac{K_I}{2\mu} \cdot \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \left[k + 1 - 2 \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad 2.26$$

$$u_z = -\frac{\nu z}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{para esfuerzo plano} \quad 2.27$$

$$u_z = 0 \quad \text{para deformación plana} \quad 2.28$$

Donde, para las ecuaciones 2.19 a la 2.28:

r = Distancia desde la punta de la grieta.

θ = Ángulo de inclinación.

K_I = Factor de intensidad de esfuerzos del modo I.

σ = Esfuerzo en la dirección indicada.

μ = Módulo del cortante.

ν = Relación de Poisson.

u = Desplazamiento en el eje indicado.

El factor de intensidad de esfuerzos es el parámetro básico en la Mecánica de la Fractura elastolineal debido a que determina la magnitud del campo de esfuerzos en la

punta de la grieta, K_I tiene unidades en el sistema inglés $ksi \cdot \sqrt{in}$ y $mPa \sqrt{M}$ en el sistema Internacional de unidades.

2.3.1.2. Modo II.

Para el modo de fractura II las ecuaciones de la 2.29 a la 2.38 determinan el campo de esfuerzos.

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad 2.29$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \quad 2.30$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \text{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad 2.31$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad 2.32$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad \text{para esfuerzo plano} \quad 2.33$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{para deformación plana} \quad 2.34$$

$$u_x = \frac{K_{II}}{2\mu} \cdot \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \left[k + 1 + 2 \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad 2.35$$

$$u_y = \frac{K_{II}}{2\mu} \cdot \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[k - 1 - 2 \cdot \text{sen}^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad 2.36$$

$$u_z = -\frac{\nu z}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{para esfuerzo plano} \quad 2.37$$

$$u_z = 0 \quad \text{para deformación plana} \quad 2.38$$

K_{II} = Factor de intensidad de esfuerzos del modo II.

2.3.1.3. Modo III .

Finalmente, para el modo III se tienen las ecuaciones 2.39 a las 2.44 :

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \quad 2.39$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{cos} \frac{\theta}{2} \quad 2.40$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \tau_{xy} = \sigma_{zz} = 0 \quad 2.41$$

$$u_x = 0 \quad 2.42$$

$$u_y = 0 \quad 2.43$$

$$u_z = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \quad 2.44$$

K_{III} = Factor de intensidad de esfuerzos del modo III.

En el grupo de ecuaciones para cada uno de los modos de fractura se han despreciado los términos de orden superior en r , no obstante, son una buena aproximación cuando r es pequeña comparada con otras dimensiones del cuerpo.

Los parámetros K_I , K_{II} y K_{III} , no dependen de las coordenadas, de r o θ , de manera que controlan la intensidad del campo de esfuerzos pero no su distribución.

La derivación de las ecuaciones 2.19 a la 2.44 asumen que la región de alta concentración de esfuerzos está localizada en la zona limítrofe de la punta de la fisura y el valor de r está limitado a una pequeña zona, además, de estas ecuaciones puede observarse que el esfuerzo conforme r tiende a cero aparentemente se incrementa al infinito, sin embargo, para la mayoría de los materiales existe una deformación plástica y en la punta de la grieta se presenta fluencia del material antes de que el esfuerzo se incremente de forma ilimitada.

La forma general del Factor de Intensidad de Esfuerzos que incluye la geometría y las condiciones de carga puede escribirse como:

$$K_I = \beta_1 \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad 2.45$$

Donde, para la ecuación 2.45:

K_I = Factor de intensidad de esfuerzos del modo I.

σ = Esfuerzo.

β_1 = Factor de corrección por geometría.

El valor crítico del factor de intensidad de esfuerzos se le denomina tenacidad a la fractura, el criterio de falla de la mecánica de la fractura establece que la fractura se propagará de manera inestable cuando el factor de intensidad de esfuerzos sea igual o superior a la tenacidad a la fractura.

2.4. Tenacidad a la Fractura.

Las ecuaciones para estimar los factores de intensidad de esfuerzos de diferentes geometrías se dan en la sección 2.9, en general, el valor crítico de K es dependiente del espesor y su valor disminuye a medida que el espesor se incrementa, para una sección gruesa de un material dado en el cual la deformación plástica en la punta de la grieta esté contenida y sea despreciable (condición de deformación plana) el factor de intensidad de esfuerzos crítico se designa como K_{IC} y la fractura se propaga de manera inestable cuando $K \geq K_{IC}$.

La tenacidad a la fractura para deformación plana K_{IC} depende del tipo de material, de la carga aplicada así como también de la temperatura pero es independiente de la longitud de la grieta y del espesor del material.

A medida que el espesor del material disminuye la restricción del flujo plástico también disminuye y se llega al estado de esfuerzo plano, el factor de intensidad de esfuerzo asociado a esta condición se designa como tenacidad a la fractura para esfuerzo plano comúnmente se simboliza como K_C . La tenacidad a la fractura para espesores más pequeños que la condición de deformación plana depende del espesor y de la longitud de la

grieta, por lo tanto, el criterio de falla $K \geq K_{IC}$ es válido únicamente cuando la deformación plástica en la punta de la grieta es localizada y pequeña., la tenacidad a la fractura para metales donde la plasticidad en la punta de la fisura no está confinada o localizada puede obtenerse a través de la integral J descrita en la sección 2.6.

La tenacidad a la fractura se define como la resistencia de los materiales al crecimiento de grietas de manera inestable en ambientes benignos no corrosivos, en condiciones de deformación plana (K_{IC}) es independiente de la longitud de la grieta y del espesor del material, el subíndice I se utiliza para indicar que la inestabilidad es el resultado del modo I, para la mayoría de los metales, K_{IC} se relaciona con secciones transversales gruesas. Bajo condiciones de deformación plana el estado de los esfuerzos en la punta de la grieta se aproxima a esfuerzos de tensión triaxiales, bajo estas condiciones, la fluencia en la punta de la grieta está contenida o restringida. Datos experimentales [53] muestran que para materiales homogéneos en condiciones de deformación plana donde los esfuerzos en dirección del espesor no son pequeños ni despreciables, la fluencia del material ocurre a esfuerzos mucho más elevados que los que se presentan bajo condiciones de tensión uniaxiales, en estos casos, cuando los esfuerzos principales son prácticamente iguales en magnitud, el material permanecerá elástico con muy poca deformación plástica hasta el momento de su falla, sin embargo, en las dos superficies libres de los extremos el estado de los esfuerzos es biaxial y la fractura ocurre por un mecanismo cortante a 45 grados con respecto de la superficie plana, esta condición se le denomina esfuerzo plano y se presenta en materiales delgados, la tenacidad a la fractura para condiciones de esfuerzo plano se le denomina K_C . Para secciones delgadas donde el estado de esfuerzos en la punta de la grieta es biaxial, la restricción a la deformación plástica es menor y el fallo de los componentes está asociado al esfuerzo plano, para otros espesores donde se combina el esfuerzo plano y la deformación plana el estado de esfuerzos es mixto. En la Figura 2.5 puede observarse la variación de estos valores con respecto del espesor.

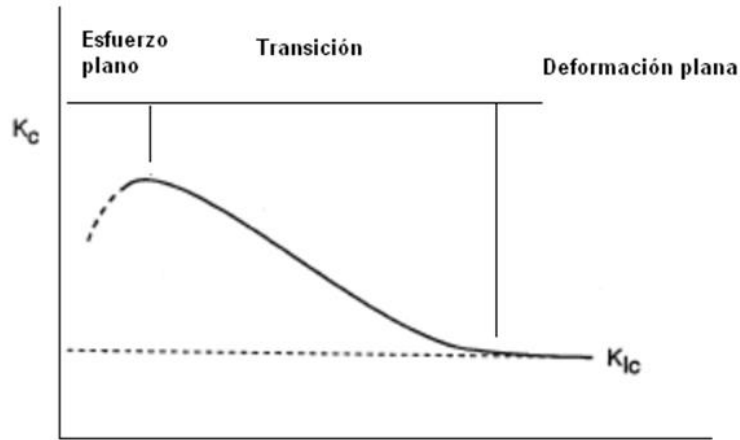


Figura 2.5 Variación de la tenacidad a la fractura con respecto del espesor.

Cuando los valores de K_C no están disponibles, la ecuación 2.46 propuesta por Irwin puede utilizarse con resultados muy aproximados a la realidad:

$$K_C = K_{IC} \left(1 + \frac{1.4}{t} \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \right) \quad 2.46$$

Donde, para la ecuación 2.46:

K_C = Tenacidad a la fractura en esfuerzo plano

σ_y = Esfuerzo de fluencia del material

K_{IC} = Tenacidad a la fractura bajo condiciones de deformación plana

t = Espesor del material

Cuando las grietas son no pasantes, la tenacidad a la fractura se designa con el símbolo K_{Ie} , este valor puede también obtenerse a través de métodos experimentales, el estándar ASTM E-740 establece los criterios para la realización de esta prueba., en los casos en que el valor K_{Ie} no esté disponible, la siguiente ecuación empírica [54] puede utilizarse:

$$K_{Ie} = K_{IC} \left(1 + C_k \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right) \quad 2.47$$

Donde, para la ecuación 2.47:

K_{Ie} = Tenacidad a la fractura para grietas no pasantes

σ_y = Esfuerzo de fluencia del material

K_{IC} = Tenacidad a la fractura bajo condiciones de esfuerzo plano

C_k = Constante empírica con valores de 1 para el Sistema Inglés y 6.275 para el Sistema Internacional de Unidades

2.5. El criterio de Irwin para la zona plástica.

El campo de esfuerzos teórico contiene esfuerzos infinitos en la punta de la grieta, es evidente que un material no puede soportar esfuerzos infinitos, cuando el límite de fluencia es sobrepasado cerca de la punta de la grieta, ocurre un flujo plástico y por lo tanto, los esfuerzos infinitos en la punta de la grieta no ocurren presentándose en realidad una zona plástica en la región. El flujo plástico y la subsecuente deformación elastoplástica en la punta de la grieta determinan en gran medida los procesos de fractura de los materiales.

La plasticidad hace que la fractura se comporte como si en realidad fuese más larga debido a que la zona plástica en la punta de la grieta resulta en desplazamientos más largos de la fisura y reduce las deformaciones elásticas locales.

Irwin estimó el tamaño de primer orden (elástico) de la zona plástica igualando σ_{yy} de la ecuación 2.20 para $\theta = 0$, con el esfuerzo de fluencia σ_{ys} , y resolviendo la distancia r_y , para placas delgadas (esfuerzo plano), de modo que obtuvo la ecuación 2.48:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad 2.48$$

Y para placas gruesas (esfuerzo plano) del componente adicional de esfuerzo σ_{zz} que inhibe el flujo plástico haciendo la zona plástica más pequeña por un factor de 3 como se muestra en la ecuación 2.49:

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad 2.49$$

Irwin estimó el tamaño de segundo orden (elastoplástico) de la zona plástica r_p redistribuyendo los esfuerzos de la punta de la grieta a la zona plástica de modo que:

$$\sigma_{ys} \cdot r_p = \int_0^{r_y} \sigma_{yy} dr$$

Lo que lleva al resultado mostrado en la ecuación 2.50:

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 = 2r_y \quad 2.50$$

Además mostró que los valores de los factores de intensidad de esfuerzos reales eran aproximados al considerar la grieta teniendo una longitud de $a + r_y$. Esta aproximación se da moviendo la punta de la grieta hacia el centro de la zona plástica como se muestra en la Figura 2.6, por lo tanto, para aplicar la corrección de manera consistente el factor de intensidad de esfuerzos debe corregirse como se muestra en la ecuación 2.51.

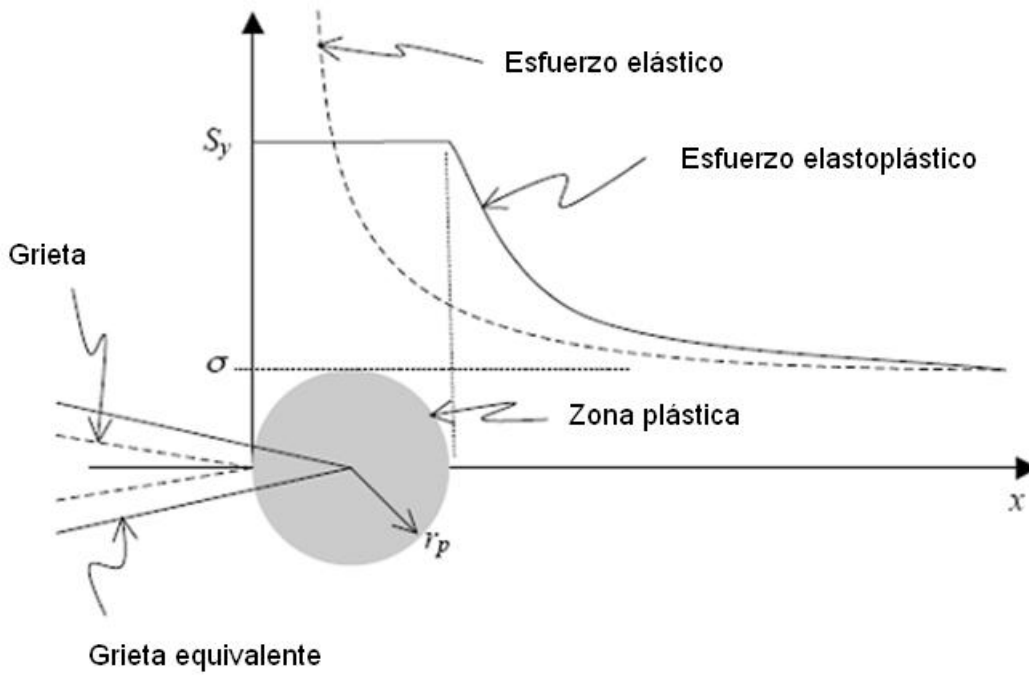


Figura 2.6 Aproximación de la zona plástica.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi(a + r_y)} \tag{2.51}$$

Utilizando el criterio de Von Mises para el campo de esfuerzos en las ecuaciones 2.19 y 2.20 se tiene para esfuerzo plano:

$$r_1(\theta) = \frac{K_I^2}{4\pi\sigma_{ys}^2} \left[1 + \frac{3}{2} \text{sen}^2\theta + \cos\theta \right] \tag{2.52}$$

Y para deformación plana:

$$r_1(\theta) = \frac{K_I^2}{4\pi\sigma_{ys}^2} \left[\frac{3}{2} \text{sen}^2\theta + \cos\theta \right] \tag{2.53}$$

Si se grafican las ecuaciones 2.52 y 2.53 se observa que existen diferencias en las zonas para esfuerzo plano y deformación plana. Ecuaciones similares pueden obtenerse para los modos II y III, la Figura 2.7 muestra esta gráfica.

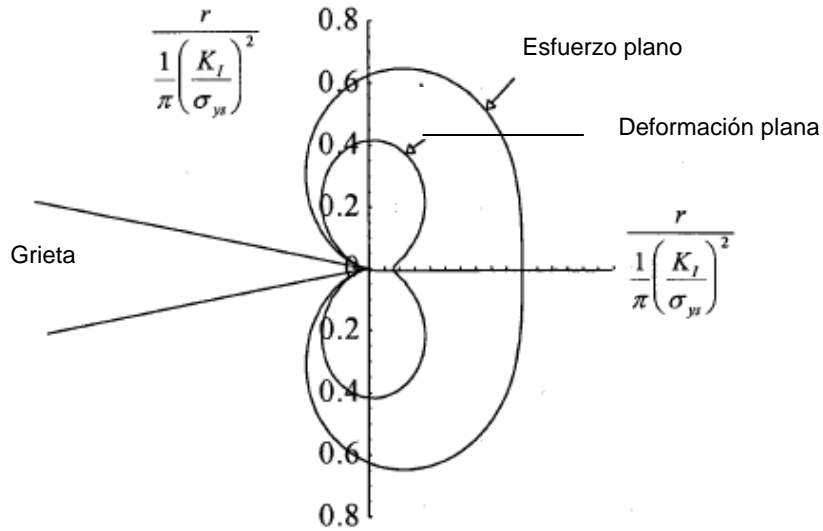


Figura 2.7 Formas de la zona plástica para el modo I.

En la

Figura 2.8 se representa en tres dimensiones la naturaleza de la zona plástica alrededor de la punta de la grieta en una placa de espesor B.

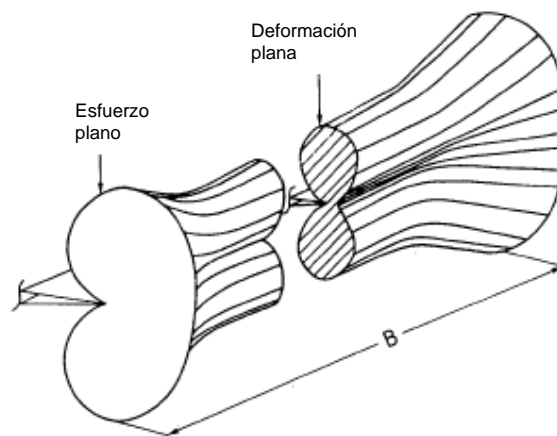


Figura 2.8 Representación esquemática de la vecindad de una grieta.

2.6. La Integral J y el criterio energético.

En materiales dúctiles se presentan deformaciones plásticas considerables durante el crecimiento de la fractura antes de la inestabilidad, en estos casos, la aplicación de la Mecánica de la Fractura elastolineal utilizando los factores de intensidad de esfuerzos no es adecuada para caracterizar con exactitud el campo en la punta de la grieta, éste tipo de fractura se analiza utilizando el criterio de la Mecánica de la Fractura elastoplástica, aplicando el concepto de la integral J desarrollado por Rice [45] en 1968 para caracterizar los esfuerzos y las deformaciones en la punta de la grieta. La integral J se basa en el balance energético y las teorías de deformación plástica.

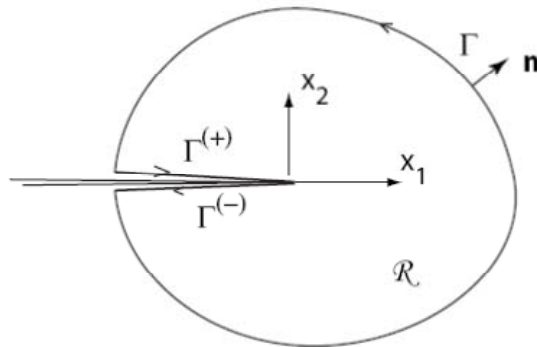


Figura 2.9 Representación de la curva alrededor de la punta de grieta.

La integral J representa el balance de energía en la punta de la grieta, este balance se da entre el trabajo suministrado por las tracciones t que actúan sobre la superficie de una trayectoria cerrada alrededor de la grieta (Figura 2.9) y la energía de las deformaciones dentro de los límites de esa trayectoria durante la extensión de la grieta. La integral J mide las magnitudes de los esfuerzos y las deformaciones en la vecindad de la punta de la grieta y es independiente de su trayectoria. La ecuación 2.54 muestra la expresión matemática para los caso bidimensionales, la fractura se encuentra en el plano x - y y con el eje x paralelo a la grieta.

$$J = \int_{\Gamma} W dy - \int_{\Gamma} T \frac{\partial u}{\partial x} ds \quad 2.54$$

La integral se evalúa en sentido contrario a las manecillas del reloj iniciando en la parte baja de la indentación y continuando a lo largo de la trayectoria Γ hasta la indentación superior.

Donde:

Γ = La curva alrededor de la punta de la grieta.

W = Densidad de energía de deformación o trabajo realizado sobre la trayectoria.

T = Vector de tracción normal a Γ de manera que $T_i = \sigma_{ij}n_j$, sobre el elemento de longitud de arco ds .

u = Vector desplazamiento.

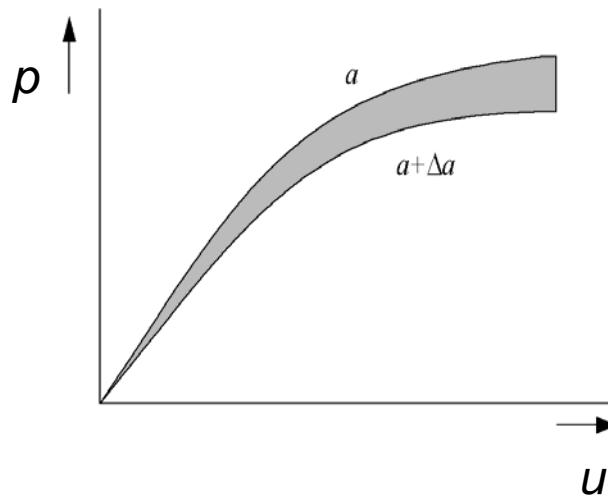
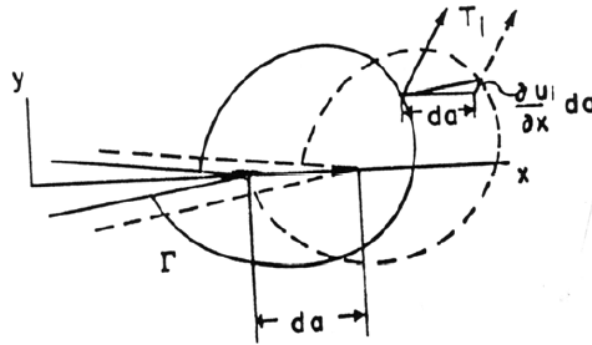


Figura 2.10 Diagrama carga desplazamiento de la grieta.

Considerando el diagrama de carga-desplazamiento de una grieta en un cuerpo en el cual la fractura se comporta de manera no lineal como se muestra en la Figura 2.10, se observa que al incrementar la carga hasta el punto más alto de la curva superior, al desplazarse la fisura y mantenerla fija en un desplazamiento u , se presenta una reducción de la carga aplicada (extremo de la curva inferior), y el cambio de energía debido a la propagación de la grieta está dado por el área sombreada.

De acuerdo a Rice [45], el cambio de energía alrededor de una grieta cuando existe una carga constante y la grieta se extiende está dada por:

$$J = - \int_0^p p \frac{\partial u}{\partial a} dp \quad 2.55$$

Donde, para las ecuaciones 2.55, 2.56 y 2.57 :

p = Carga.

a = Extensión de la grieta.

u = Desplazamiento.

Y para la condición de desplazamiento constante:

$$J = \int_0^p \frac{\partial p}{\partial a} u du \quad 2.56$$

Para un cuerpo de espesor B , la integral J está dada por:

$$J = \frac{2A}{B(W - a)} \quad 2.57$$

Cuando el tamaño de la zona plástica en la vecindad de la punta de la grieta es muy pequeño comparado con otras dimensiones en la fractura, la energía consumida para

la creación de nuevas superficies de fractura está dada por $\frac{dU_e}{da}$ para un material elástico lineal y es igual a la razón de liberación de energía de Griffith G , en los caso de los materiales elásticos lineales la razón de liberación de energía G y el valor J basado en la liberación de energía elástica durante la propagación de la grieta son idénticos en términos de los factores de intensidad de esfuerzos K , cuando la región plástica está presente en una zona muy pequeña en la vecindad de la punta de la grieta la integral J y el parámetro G están relacionados y se puede afirmar que:

$$J = G = \frac{K^2}{E'} \quad 2.58$$

Donde para las ecuaciones 2.58 y 2.59:

E' =Módulo de Young para esfuerzo plano.

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \text{ para deformación plana.}$$

El mismo criterio energético puede aplicarse en los diferentes modos de carga, de manera que, para una combinación de los modos de carga se tiene:

$$J = G = \frac{1}{E'}(K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad 2.59$$

Si se evalúa J en los puntos O_1 y O_2 se tiene:

$$J_1 = \int_{\Gamma} |\dots| = J_2 \int_{\Gamma} [\dots] \quad 2.60$$

Y para el modo mixto combinando I y II de la ecuación 2.59

$$J_1 = \frac{k+1}{8\mu} (K_I^2 + K_{II}^2) \quad 2.61$$

Además:

$$J_2 = -\frac{k+1}{4\mu} K_I K_{II} \quad 2.62$$

Si se tiene la punta de una grieta y el vector Q en la proyección de su crecimiento como se muestra en la Figura 2.11, $J(\theta)$ está definido por:

$$J(\theta) = J_1 \cos \theta = J_2 \sin \theta \quad 2.63$$

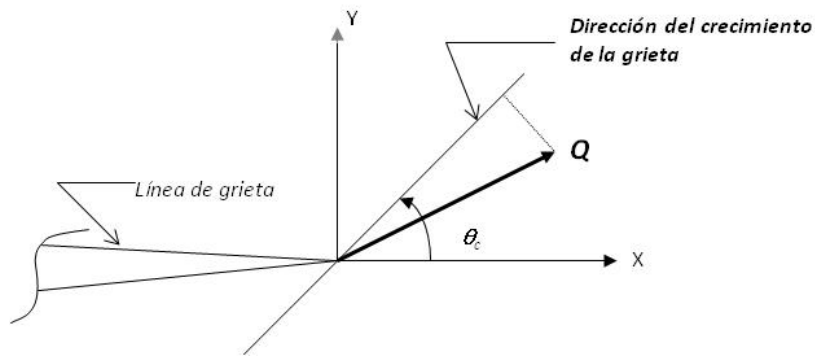


Figura 2.11 Vector de proyección con dirección del crecimiento de la grieta.

La teoría de propagación de la grieta basada en este criterio energético establece que la fractura se extenderá a lo largo de la dirección radial θ cuando $J(\theta)$ llegue al máximo, es decir, cuando se cumplan las siguientes condiciones establecidas en la ecuación 2.64:

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 J(\theta)}{\partial^2 \theta} < 0 \quad \text{y} \quad J(\theta) = 2\gamma \quad 2.64$$

Donde γ es el mismo termino expresado en la ecuación 2.9.

De las ecuaciones 2.61 y 2.62, la dirección del crecimiento de la grieta es:

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{-2K_I K_{II}}{K_I^2 + K_{II}^2} \right) \quad 2.65$$

Y los factores de intensidad de esfuerzos están dados por las ecuaciones **2.66** y **2.67**:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \sin^2 \beta \quad 2.66$$

$$K_{II} = \sigma \sqrt{\pi a} \sin \beta \cos \beta \quad 2.67$$

La ecuación anterior define el ángulo de propagación crítico entonces, se obtiene la ecuación **2.69**:

$$\tan \theta_c = -\sin 2\beta \quad 2.68$$

Y el esfuerzo crítico se da en:

$$\sigma_c = \left(\frac{16\mu\gamma}{(k+1)\pi a} \right) \left(\frac{1}{\sin^2 \beta \sqrt{1 + \sin^2 2\beta}} \right) \quad 2.69$$

J en la ecuación **2.58** caracteriza únicamente la región lineal del fenómeno, de manera que, J_{total} incluyendo la zona no lineal se obtiene con la ecuación **2.70**:

$$J = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{2A}{B(W-a)} \quad 2.70$$

Cuando existen deformaciones plásticas considerables donde gran parte de la energía se consume en crear dichas deformaciones en la punta de la grieta, el criterio de Griffith o el de Irwin de los factores de intensidad de esfuerzos, no cubren el fenómeno de plasticidad en la punta de la grieta, el diagrama esfuerzo-desplazamiento es lineal en el rango elástico y no lineal en el rango plástico presentándose plasticidad en la punta de la fisura.

La apertura de la grieta y el crecimiento estable de la fractura en materiales dúctiles cuando las cargas se aplican monotónicamente e incrementándose, se pueden separar en cuatro regímenes como se muestra en la Figura 2.12, primero, la punta de la fisura aguda presenta un fenómeno elástico y al incrementarse la carga el valor de J también se incrementa, la punta de grieta pierde paulatinamente su forma aguda en la punta, al incrementar de nuevo la carga, se presenta un desgarre en J_{IC} y la fisura empieza a propagarse y al llegar al tamaño crítico, se presenta un crecimiento inestable y la grieta se propaga.

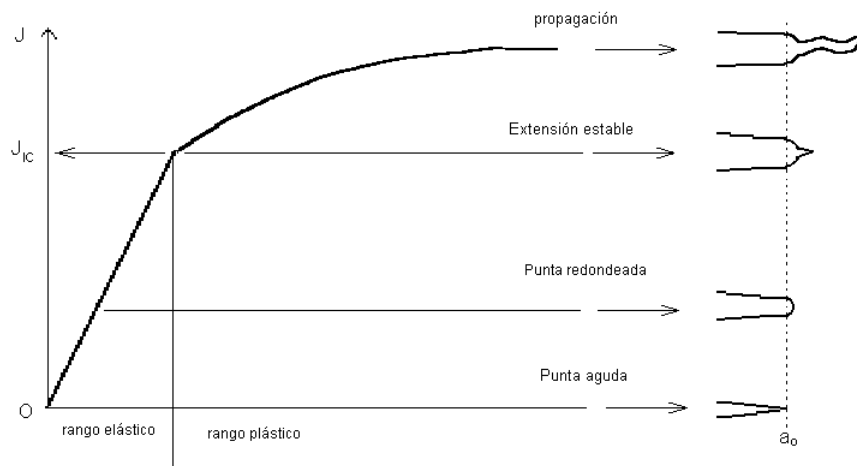


Figura 2.12 Diagrama carga-desplazamiento.

Cuando la grieta se propaga, la abertura de la punta (separación de las dos caras en la boca de la fisura) es una medida de la deformación alrededor de la fisura. CTOD por sus siglas en inglés (*Crack Tip Opening Displacement*) representa la cantidad de deformación en la punta de la grieta en un material dúctil y está en función de la carga aplicada, la geometría del espécimen, la longitud de la fisura y las propiedades del material, el CTOD y sus valores críticos se discuten más adelante en la sección 2.7.

El valor crítico de J con deformaciones plásticas considerables se designa como J_{IC} y es independiente de la geometría del espécimen al igual que el valor K_{IC} de la fractura lineal elástica. J_{IC} se obtiene mediante ensayos de laboratorio., el estándar ASTM E1820 (*Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*) [55] identifica tres propiedades de tenacidad a la fractura para metales, representados en la Figura 2.13 estos son:

J_C Caracteriza la tenacidad a la fractura de los materiales en la inestabilidad antes de una considerable extensión de la fisura por ruptura (A) pudiendo existir dependencia con respecto de la longitud del frente de la grieta, es decir, del espesor del material.

J_{IC} Es el valor de J bajo condiciones de deformación plana en la punta de la grieta cuando ocurre una pequeña cantidad de extensión de la fractura estable al inicial la fractura dúctil (B).

J_U Valor de J durante la fractura inestable después de la propagación estable (C).

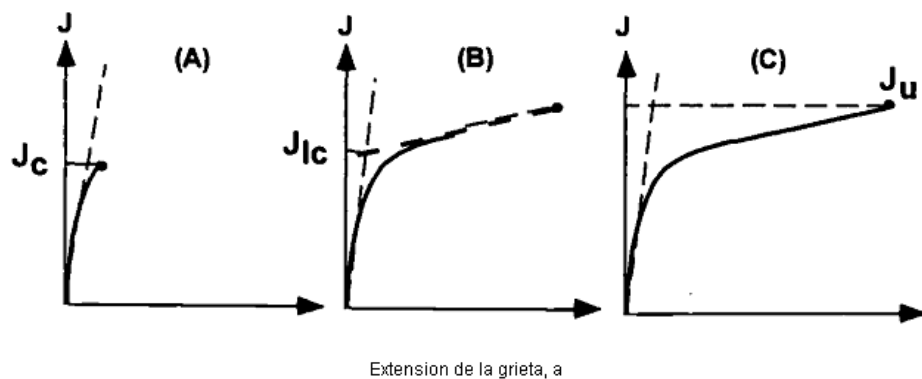


Figura 2.13 Parámetros de la fractura descritos por ASTM.

De los valores anteriores, J_{IC} es el utilizado como criterio de falla para los metales y es una medida conservadora que se utiliza como parámetro de tenacidad a la fractura elastoplástica.

El valor J_{IC} corresponde al punto de iniciación de la fractura y se asocia a una pequeña cantidad de extensión de fisura (en el centro del espesor de la pieza analizada) bajo condiciones de deformación plana J_{IC} se obtiene mediante las pruebas de ASTM E1820 (1), si bien es cierto ASTM tiene otros estándares de prueba para determinar los parámetros K , J y $CTOD$ (E399, E813, E1152, E1290 y E1737), ASTM desarrollo el estándar E1820 para proveer de un método común para la obtención de todos los parámetros de tenacidad a la fractura en una prueba única.

La Figura 2.14 muestra una curva típica de J contra la extensión grieta a , esta curva se conoce como curva J - R , en la gráfica se presenta el valor de la tenacidad de la fractura J_{IC} y el crecimiento estable de la grieta antes del fallo final el valor de J_{IC} se encuentra en la intersección de la línea del crecimiento estable de la grieta (línea ajustada a los valores experimentales) y la línea en la región donde se presenta la pérdida de agudeza de la fisura.

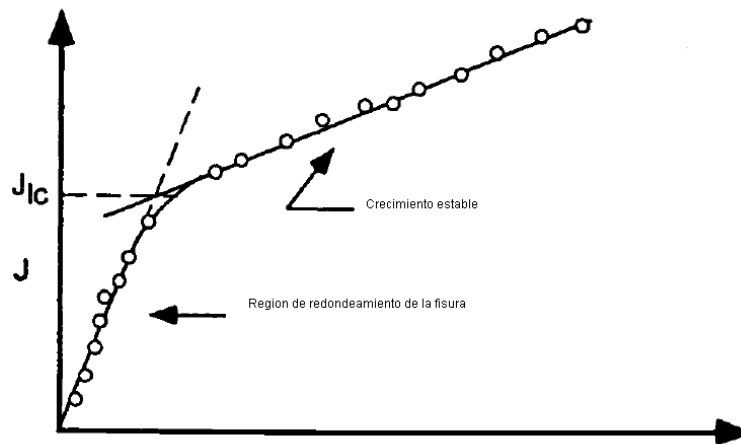


Figura 2.14 Curva J-R típica.

Existen diversas técnicas para determinar la cantidad de crecimiento de la fractura en el punto de extensión estable, algunas de estas técnicas son del tipo multi-espécimen, en este trabajo, se describe el método que utiliza el espécimen tipo C(T), su configuración se muestra en la Figura 2.15 y se dimensiona en términos de W , se utiliza un extensómetro acoplado a la abertura como se muestra en la Figura 2.16 para obtener la curva $J-R$.

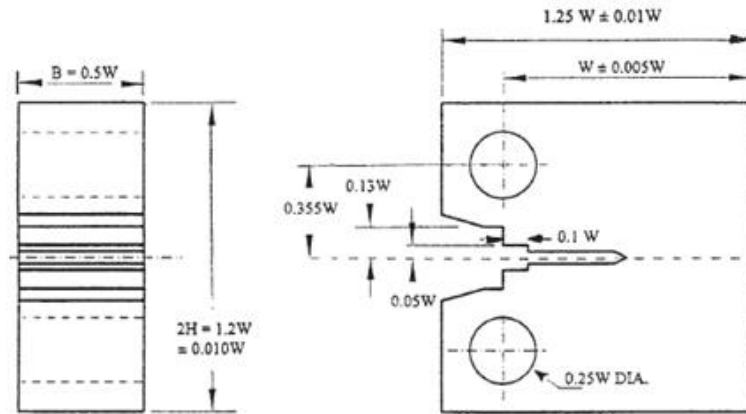


Figura 2.15 Especimen C (T).

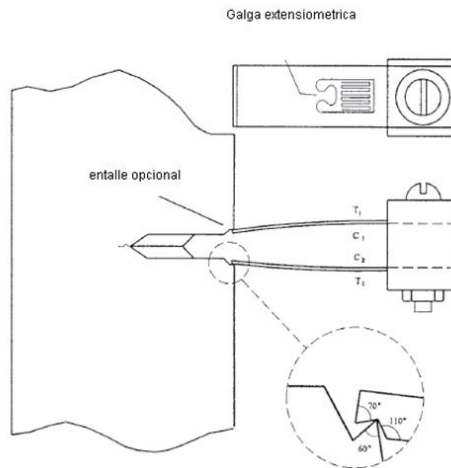


Figura 2.16 Muestra del clip en la boca del espécimen.

Para que el valor de J_{IC} sea satisfactorio se requiere que el espécimen sea pre-fracturado por fatiga en la región de la muesca, la carga para realizar esta fractura puede

realizarse controlando el desplazamiento o la carga misma, en ambos casos el límite de fluencia del material debe evitarse, la magnitud de la carga de pre-fatiga no debe exceder de lo marcado en la ecuación 2.71:

$$P_f = \frac{0.4B(W - a_0)^2 \sigma_{SSY}}{2W + a_0} \quad 2.71$$

Donde:

a_0 es la longitud original de la fisura

σ_{SSY} Es el valor de fluencia del material

El procedimiento para establecer la curva $J-R$ consiste en cargar y descargar el espécimen C(T) dentro del rango elástico para estimar la nueva longitud de fractura y el incremento del avance de la grieta, la carga debe permanecer por debajo de la carga final de pre-fatiga P_f expresado en la ecuación 2.71, usualmente se lleva más de 25 ciclos de carga y descarga para determinar la curva $J-R$.

La Figura 2.17 muestra la carga contra el desplazamiento de la línea de carga para algunos ciclos, mientras que en la Figura 2.18 se muestra la curva real de carga-desplazamiento de línea de carga de la aleación de aluminio 2219-T87, la pendiente de las descargas en cada ciclo aparenta ser paralela para todos ellos, sin embargo, puede observarse una pequeña variación en la pendiente., conforme la fractura avanza debido a los ciclos de carga y descarga, la conformancia del espécimen aumenta y la pendiente de la curva de carga contra desplazamiento decrece.

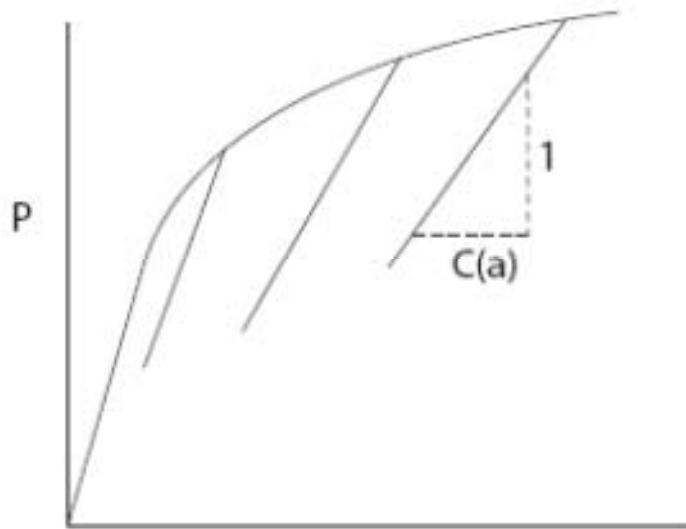


Figura 2.17 Gráfica de carga contra abertura de la grieta.

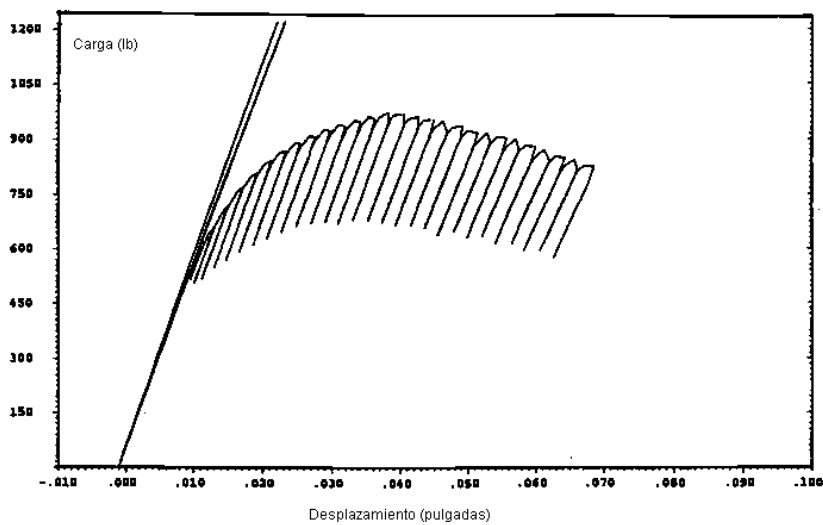


Figura 2.18 Curva carga-desplazamiento para la aleación 2219-T87.

2.6.1. Determinación de la curva $J-R$.

La curva $J-R$ se obtiene al graficar el valor de J contra la extensión de la fractura, para el espécimen tipo C(T) debe calcularse los componentes elásticos y plásticos

de J en un punto correspondiente a un desplazamiento dado a_i , y una carga P_i , el componente elástico de J , J_{el} se relaciona con el factor de intensidad de esfuerzos para deformación plana de modo que:

$$J_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \quad 2.72$$

K para una carga P_i está dada por:

$$K_i = \frac{P_i}{\sqrt{B_N W}} \cdot f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad 2.73$$

Donde $f\left(\frac{a_i}{W}\right)$ es el factor de corrección geométrico para una longitud de fisura a_i , este factor es cambiante por lo que debe utilizarse siempre el más reciente.

El factor de corrección geométrico se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_i}{W}\right) \left[0.866 + 4.64\left(\frac{a_i}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a_i}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a_i}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a_i}{W}\right)^4\right]}{\sqrt{\left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^3}} \quad 2.74$$

El componente plástico de J se estima mediante la siguiente ecuación:

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B_N b_0} \quad 2.75$$

Donde:

A_{pl} Es el área bajo la curva carga contra desplazamiento como se muestra en la Figura 2.19.

B_N Es el espesor neto del espécimen ($B_N = B$) si el espécimen no tiene ranuras laterales.

b_0 Es la longitud no fracturada dada por $(W - a_0)$.

η Equivale a $2 + \frac{0.522b_0}{W}$.

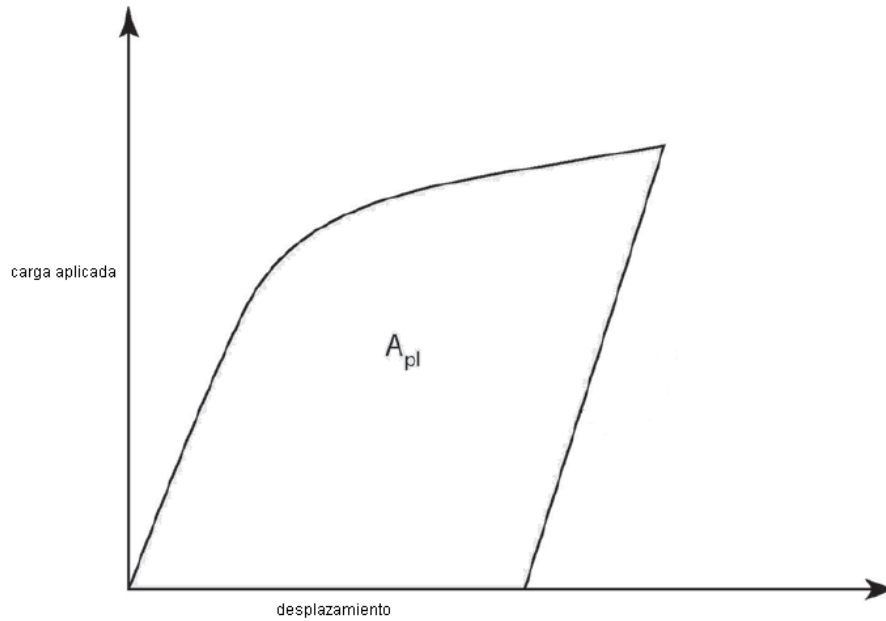


Figura 2.19 Definición del área para el cálculo de J.

Para al cálculo de la curva de resistencia, ambos componentes elástico y plástico en cada punto de la curva de carga contra desplazamiento deben ser calculados, el componente elástico esta dado por las ecuaciones 2.62 y 2.63, y el componente plástico

$J_{pl(i)}$ para un punto i está dado por:

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \left[1 - \gamma_{(i-1)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right] \quad \mathbf{2.76}$$

Donde:

$$\eta_{(i-1)} \text{ Equivale a } 2 + \frac{0.522b_{(i-1)}}{W}.$$

$$\gamma_{(i-1)} \text{ Est\u00e1 dado por } 1 + 0.76 \frac{b_{(i-1)}}{W}.$$

En la ecuaci\u00f3n 2.76, la cantidad $A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}$ es el incremento del \u00e1rea pl\u00e1stica abajo de la curva carga-desplazamiento registrada entre las l\u00edneas de desplazamiento constante en los puntos $i-1$ e i como se muestra en la Figura 2.20, el valor de $J_{pl(i)}$ representa el total de crecimiento de la fractura pl\u00e1stica J en el punto i y se obtiene sumando el valor calculado $J_{pl(i-1)}$ y el valor del incremento de J debido al incremento de carga como se muestra en la ecuaci\u00f3n 2.77:

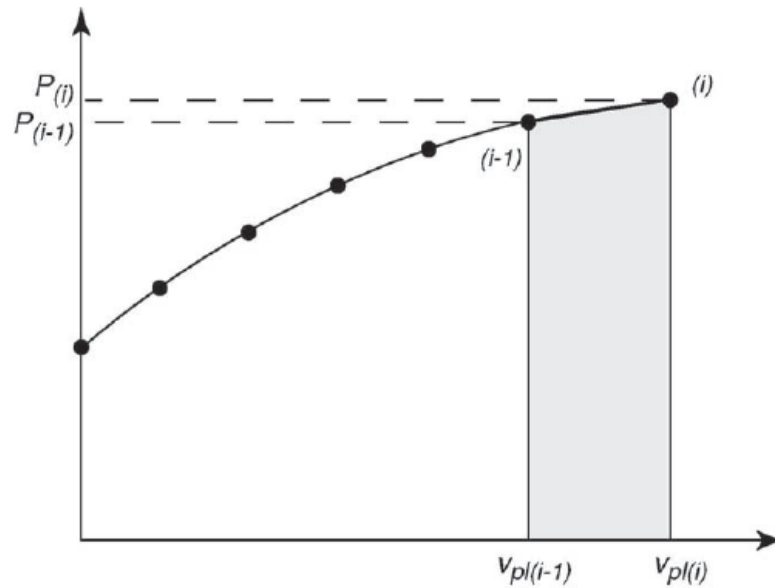


Figura 2.20 Definici\u00f3n del \u00e1rea pl\u00e1stica para el c\u00e1lculo de J.

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + \frac{[P_{(i)} + P_{(i-1)}] \cdot [V_{pl(i)} - V_{pl(i-1)}]}{2} \quad 2.77$$

Donde:

$V_{pl(i)}$ Es la parte plástica de la curva carga-desplazamiento, es decir:

$$V_{pl(i)} = V_i - (P_i C_{LL(i)})$$

C_{LLi} Representa la conformancia experimental, $\left(\frac{\Delta v}{\Delta P}\right)_i$ correspondiente a la extensión de fractura a_i

En la ecuación 2.77 el segundo término representa el área bajo la curva en cada ciclo de carga-descarga.

Cuando se da un incremento repentino en el desplazamiento con una reducción en la carga, se presenta una discontinuidad en el registro de la carga contra el desplazamiento, este registro se le conoce como *pop-in* en la Figura 2.21 se muestran diversos tipos de registros de la curva carga-desplazamiento, la figura tiene además líneas de construcción paralelas a la pendiente elástica con los valores de v_p , el *pop-in* se evalúa posteriormente cuando la carga se incrementa de nuevo, la aceptabilidad del *pop-in* se muestra en la Figura 2.22.

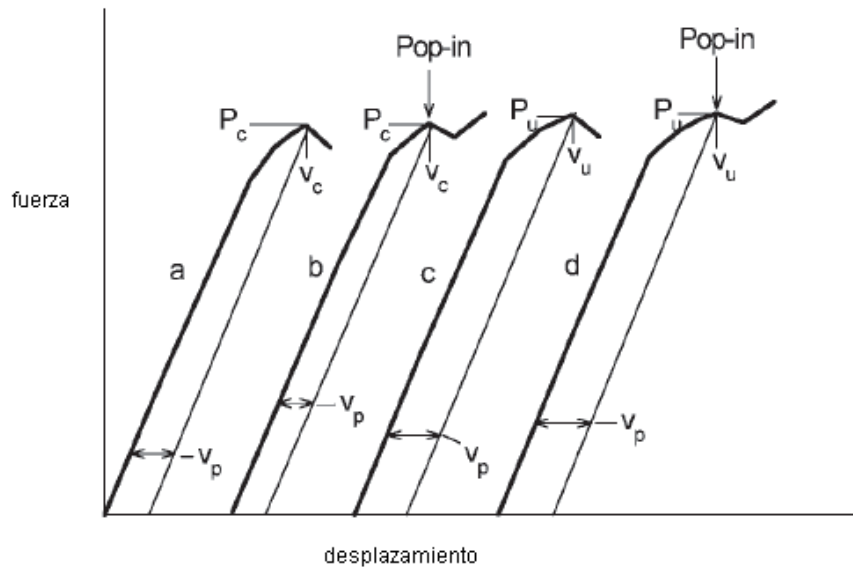


Figura 2.21 Tipos de registros de carga contra desplazamiento de línea de carga.

Se traza una línea con una pendiente reducida en 5% (línea punteada CF) con respecto de las líneas de construcción paralelas a la curva de carga-desplazamiento (OA) que pasan por el punto de inflexión B, si el punto de inestabilidad de la fractura (G) o “pop-in” está dentro de la región BCEF (Figura 2.22), se considera el pop-in como insignificante, de no ser así, el “pop-in” es significativo, en el caso (a) el punto de inflexión corresponde a la carga P_u o P_c es decir el punto B.

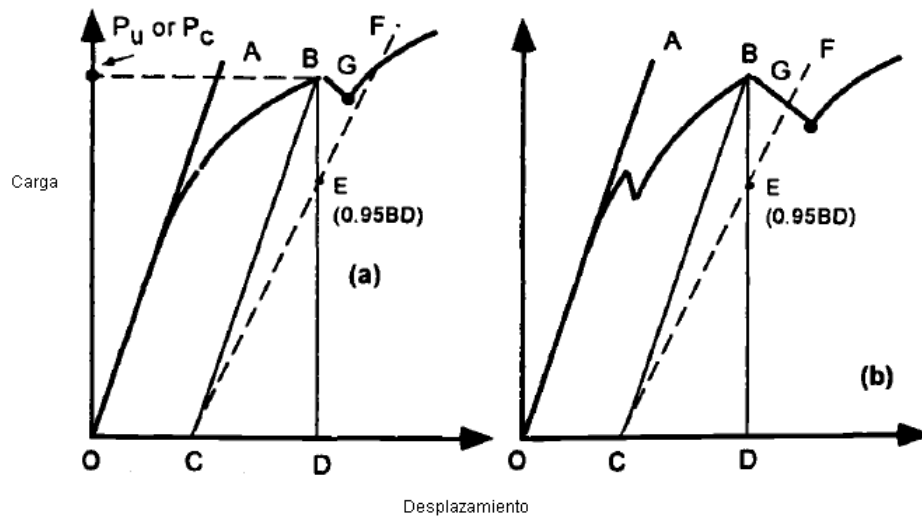


Figura 2.22 Aceptabilidad del pop-in.

La validez de la prueba J_{IC} tomado de la curva $J-R$ depende de varios requerimientos que deben cumplirse, el uso adecuado de los aparatos de prueba, los transductores de carga, la preparación del espécimen, etc. deben cumplir con el estándar respectivo de ASTM E1820, además, los datos deben ser analizados antes de convertirse a valores de $J-R$, también las longitudes de las fracturas deben medirse y compararse con los valores registrados, la forma de medición deben cumplir con los criterios de ASTM y los datos generados para la tenacidad a la fractura de la curva carga-desplazamiento de la línea de carga deben obtenerse a través de los criterios establecidos en el estándar, en el cual se norma la obtención del valor J_{max} , algunos valores de J que pueden ser ajustados, además, los datos deben estar dentro del rango de 0.5 y 1.5 mm también deben existir al menos cinco puntos en la región de aceptabilidad de los datos, la Figura 2.23 contiene las líneas de construcción y la definición de la región de aceptabilidad.

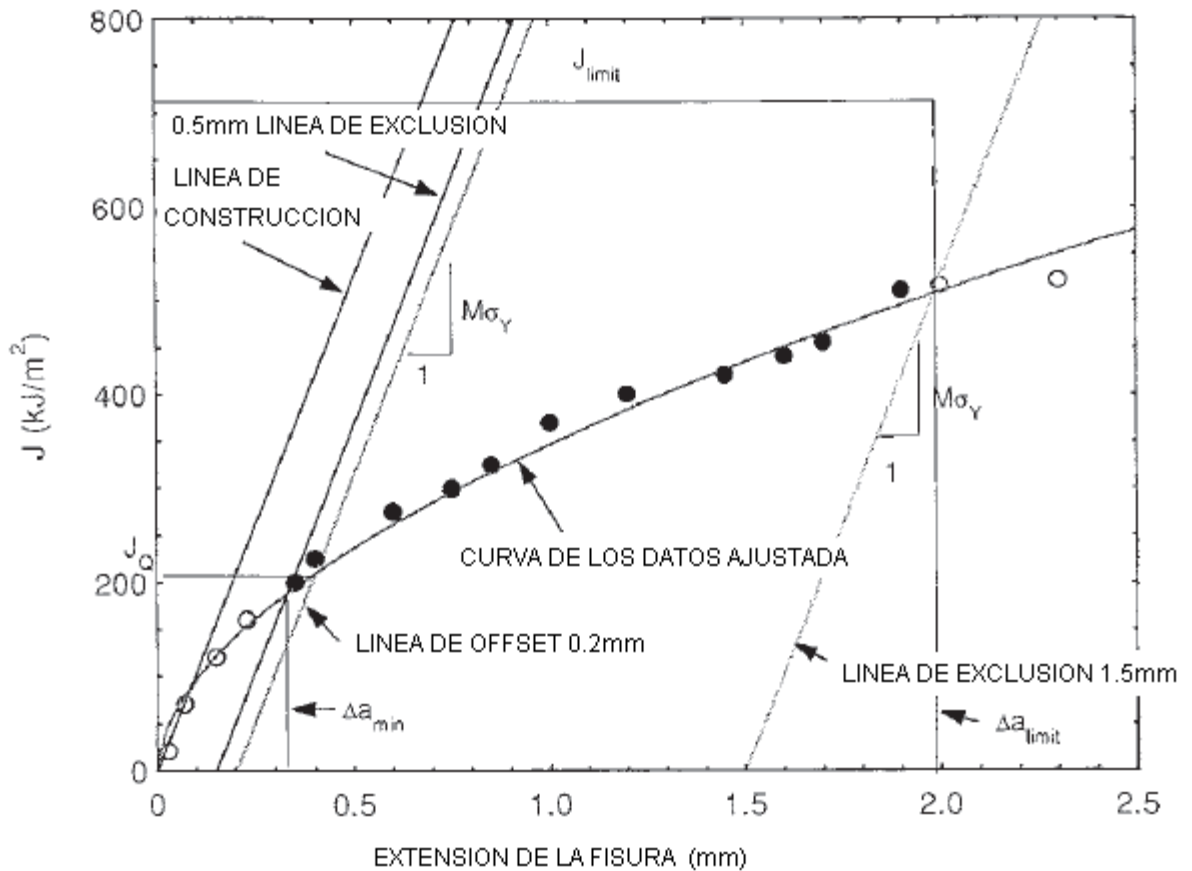


Figura 2.23 Definición de las líneas de construcción para aceptación de datos.

2.7. El desplazamiento de apertura de grieta CTOD.

Debido a deformación plástica en la punta de la grieta, la agudeza original se redondea resultando en un radio finito en la punta de la fisura inicial que se desplaza conforme crece, este fenómeno se le conoce como desplazamiento de la abertura de la punta de la grieta, de ahí su nombre en inglés *Crack Tip Opening Displacement*, en 1961 Wells [56] propuso que el comportamiento de la fractura puede caracterizarse a través del CTOD, además, demostró que el concepto de CTOD era análogo al concepto de G_c y por lo tanto podía relacionarse también con el factor K_{IC} , debido a que la medición del CTOD puede realizarse aun existiendo flujo plástico delante de la fisura, por ejemplo en

los casos elastoplásticos o plásticos puros, el criterio puede utilizarse para establecer esfuerzos críticos de diseño.

ASTM E1290 y E1820 cubren el método estandarizado para la obtención del CTOD, $\delta[L]$ y representa el desplazamiento que ocurre como consecuencia de la deformación total elástica y plástica en diferentes localizaciones cerca de la punta de la fisura antes de la aplicación de la carga. Al igual que el parámetro J , la obtención del CTOD también se realiza con diferentes tipos de especímenes, el más utilizado es el C(T) ya descrito en 2.6.1 y el procedimiento es igual obteniéndose una curva similar solo que del tipo $\delta - R$, los criterios de aceptación también están normados, la Figura 2.24 muestra una curva típica obtenida.

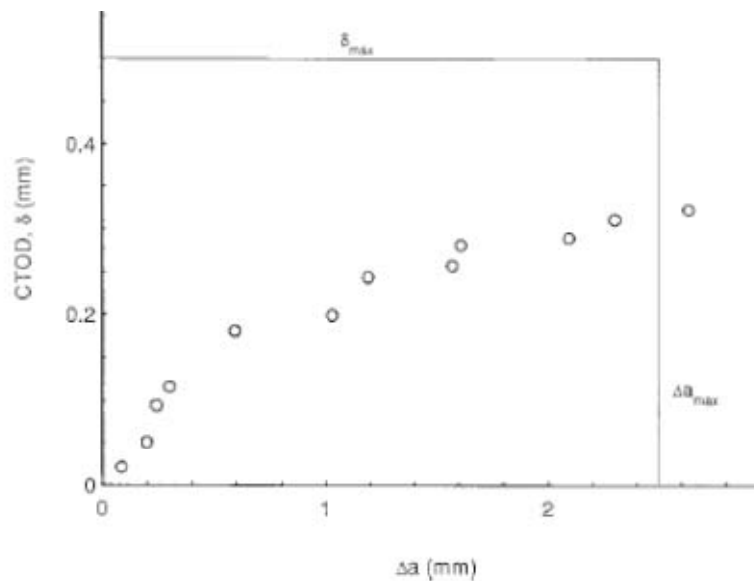


Figura 2.24 Curva típica $\delta - R$.

La porción elástica del CTOD se relaciona con los valores del factor de intensidad de esfuerzo, k de la siguiente manera:

$$CTOD_{el} = \frac{(1-\nu^2)K^2}{mE\sigma_{YSS}} \quad 2.78$$

Donde:

m Es el factor de proporcionalidad.

σ_{YSS} Es el esfuerzo de fluencia del material.

El factor de proporcionalidad, m , se asume que es independiente de la relación $\frac{a}{W}$.

Para la región plástica se tiene la siguiente relación con el parámetro J .

$$CTOD_{pl} = \frac{J_{pl}}{m\sigma_{fl}} \quad 2.79$$

Aquí, σ_{fl} representa el esfuerzo de flujo del material, típicamente el promedio del límite de fluencia y el esfuerzo último a la tensión.

2.8. Iniciación de la fractura en modo mixto.

La fractura de los elementos en los cuales la dirección de los esfuerzos principales varía en su geometría generalmente se propaga a lo largo de una superficie curva, debido a que la fisura se corre siguiendo la trayectoria de menor resistencia. La predicción de cuando y como ocurre la fractura y la posible trayectoria de la fisura es importante para analizar fallas potenciales, la fisura en estos casos generalmente están sujetos a una combinación de los modos de carga descritos en la sección 2.3.1 y varían a lo largo del frente de la grieta.

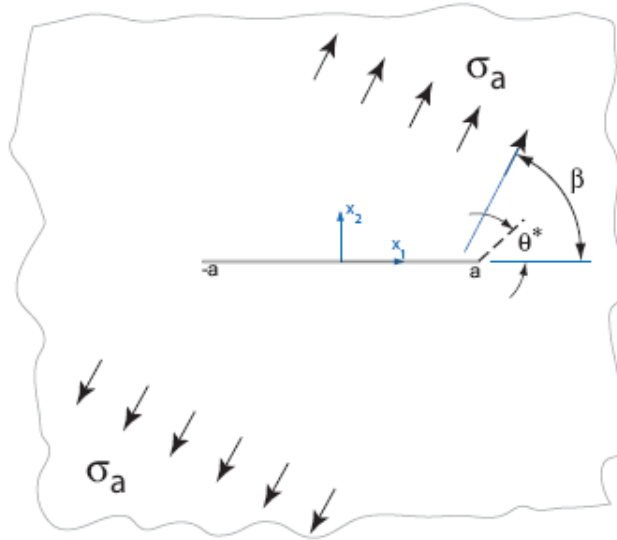


Figura 2.25 Fisura bidimensional sujeta a modo de carga mixto.

La Figura 2.25 muestra una fisura sujeta a la combinación de los modos I y II de carga (modo mixto), la fractura no se propagara en línea recta en un material isotrópico. Lejos de la fisura, los esfuerzos son: $\sigma_{22} = \sigma_a \text{sen}^2 \beta$, $\sigma_{12} = \sigma_a \text{sen} \beta \cos \beta$ y $\sigma_{11} = \sigma_a \cos^2 \beta$ y los factores de intensidad de esfuerzos están dados por $K_I = \sigma_a \sqrt{\pi a} \text{sen}^2 \beta$ y $K_{II} = \sigma_a \sqrt{\pi a} \text{sen} \beta \cos \beta$, existen diversas teorías que predicen el esfuerzo σ_a en el cual la fractura inicia además de la trayectoria de propagación algunas de ellas son la del esfuerzo circunferencial máximo y la de la razón de liberación de energía máxima, estas teorías se analizan en las secciones siguientes.

2.8.1. Teoría del esfuerzo circunferencial máximo.

La teoría del esfuerzo circunferencial máximo [58] postula que una fisura crecerá en la dirección θ , de máximo esfuerzo circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$, cuando $\sqrt{r} \sigma_{\theta\theta}(r, \theta)$ sea mayor o igual que un valor constante, si la constante es igual en el modo mixto al modo de carga I, se tiene que para el modo mixto puede definirse que:

$$\sqrt{r}\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) \geq \frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi}} \quad 2.80$$

El criterio direccional establece que la fractura se propagara en dirección θ cuando se cumplan las siguientes condiciones:

$$\frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial\theta} = 0, \quad \frac{\partial^2\sigma_{\theta\theta}}{\partial\theta^2} < 0 \quad 2.81$$

Si se combinan las ecuaciones del campo de esfuerzos presentados en la sección 2.2 para los modos de carga I y II, el esfuerzo circunferencial máximo (con coordenadas polares) puede escribirse como:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left(K_I \cos\frac{\theta}{2} \cdot \frac{1+\cos\theta}{2} - K_{II} \frac{3}{2} \text{sen}\theta \cos\frac{\theta}{2} \right) \quad 2.82$$

Al substituir la ecuación **2.82** en **2.80** y **2.81**, la dirección de la fractura y el lugar geométrico de la falla expresado en términos de $\left(\frac{K_I}{K_{IC}}, \frac{K_{II}}{K_{IC}}\right)$ puede determinarse.

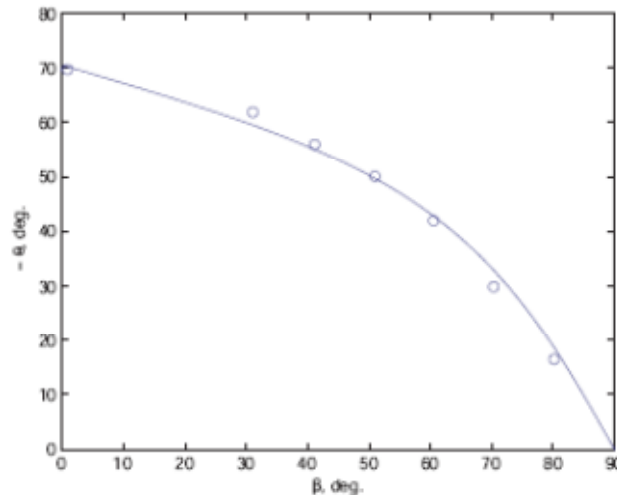


Figura 2.26 ángulo de propagación contra ángulo de la carga aplicada.

La Figura 2.26 muestra el ángulo de propagación estimado (línea continua) y los resultados obtenidos de manera experimental graficado contra el ángulo de aplicación del esfuerzo, la teoría predice con una muy buena aproximación el ángulo de propagación de la grieta además, la Figura 2.27 muestra la región geométrica de la falla.

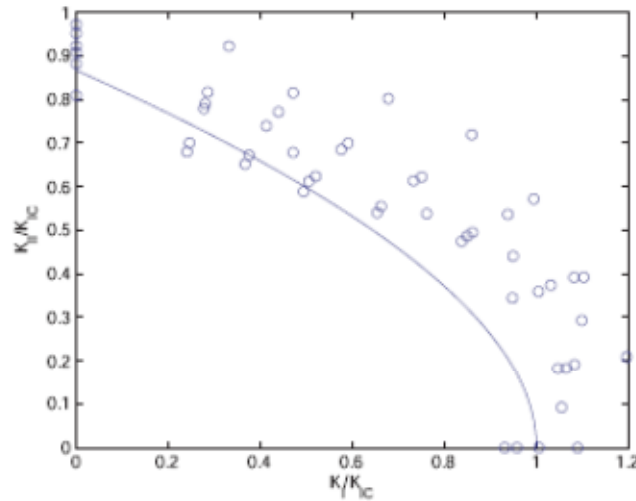


Figura 2.27 Región de falla pronosticada.

2.8.2. Teoría de la razón de liberación de energía máxima.

Este criterio establece que la fractura se propagará de manera tal que la liberación de energía sea máxima, equivale a afirmar que la fractura se propaga de tal forma que se minimice la energía potencial del cuerpo y corresponde básicamente a que el sistema termodinámico tiende siempre a su estado de energía mínimo., para los modos de carga mixtos I y II se ha considerado que la fractura se extiende con un ángulo θ y una longitud ε desde una fractura preexistente. El criterio [59] establece que la fisura se propaga con un ángulo θ de manera que:

$$\frac{\partial G(\theta)}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 G(\theta)}{\partial^2 \theta} < 0 \quad \text{y} \quad G(\theta) \geq G_c \quad \mathbf{2.83}$$

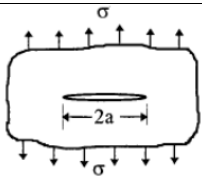
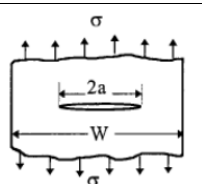
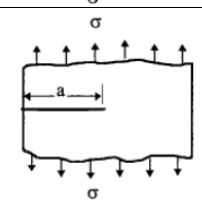
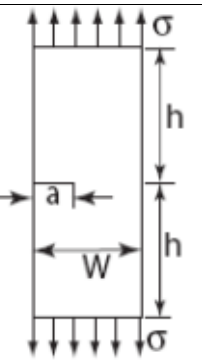
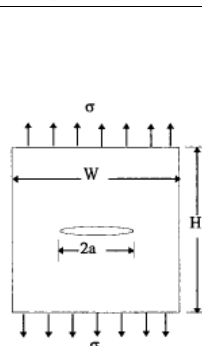
Donde:

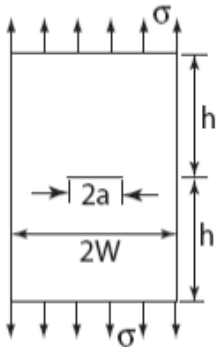
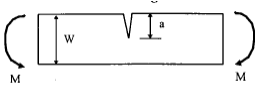

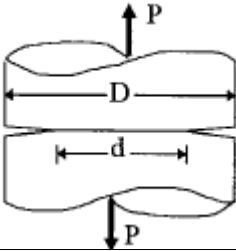
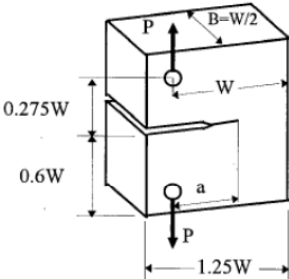
$$G(\theta) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon} (\Pi_z - \Pi) \quad 2.84$$

Π_z es la energía potencial de la fisura después de la propagación de la grieta y Π antes de la propagación.

2.9. Determinación de los factores de intensidad de esfuerzos.

En este capítulo se han descrito los campos de esfuerzos y los flujos energéticos, además se han analizado las deformaciones y los esfuerzos que se presentan en la vecindad de una grieta en una placa infinita, sin embargo, existen varios casos de grietas presentes en diferentes tipos de geometrías que pueden obtenerse por métodos analíticos como los descritos anteriormente, también pueden utilizarse tablas las cuales han sido elaboradas a través de los años por muchos investigadores, en la Figura 2.28 se presenta un ejemplo de ellas.

Geometría	Factor de intensidad de esfuerzos																		
	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$																		
	$K_I = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}} \sigma\sqrt{\pi a}$																		
	$K_I = 1.12\sigma\sqrt{\pi a}$																		
	$h/W > 1$ $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}F(a/W)$ $F(a/W) = 0.265(1 - a/W)^4 + \frac{.857 + .265a/W}{(1 - a/W)^{3/2}}$																		
	$K_I = f\left(\frac{a}{W}\right)\sigma\sqrt{\pi a}$ <table border="1" data-bbox="876 1260 1266 1587"> <thead> <tr> <th>a/W</th> <th colspan="2">$f(a/W)$</th> </tr> <tr> <td></td> <th>$h/W=1.0$</th> <th>$h/W=\infty$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1.12</td> <td>1.12</td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>1.37</td> <td>1.21</td> </tr> <tr> <td>0.4</td> <td>2.11</td> <td>1.35</td> </tr> <tr> <td>0.5</td> <td>2.83</td> <td>1.46</td> </tr> </tbody> </table>	a/W	$f(a/W)$			$h/W=1.0$	$h/W=\infty$	0	1.12	1.12	0.2	1.37	1.21	0.4	2.11	1.35	0.5	2.83	1.46
a/W	$f(a/W)$																		
	$h/W=1.0$	$h/W=\infty$																	
0	1.12	1.12																	
0.2	1.37	1.21																	
0.4	2.11	1.35																	
0.5	2.83	1.46																	

Geometría	Factor de intensidad de esfuerzos														
	$h/W > 3$ $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/W)$ $F(a/W) = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2W} [1 - .025(a/W)^2 + .06(a/W)^4]}$														
	$K_I = f\left(\frac{a}{W}\right) \bar{\sigma} \quad \text{where } \bar{\sigma} = \frac{6M}{BW^2}$ <table border="1" data-bbox="917 699 1177 1062"> <thead> <tr> <th>a/W</th> <th>$f(a/W)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.1</td><td>1.044</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>1.055</td></tr> <tr><td>0.3</td><td>1.125</td></tr> <tr><td>0.4</td><td>1.257</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>1.500</td></tr> <tr><td>0.6</td><td>1.915</td></tr> </tbody> </table>	a/W	$f(a/W)$	0.1	1.044	0.2	1.055	0.3	1.125	0.4	1.257	0.5	1.500	0.6	1.915
a/W	$f(a/W)$														
0.1	1.044														
0.2	1.055														
0.3	1.125														
0.4	1.257														
0.5	1.500														
0.6	1.915														
	$K_I = 2\sqrt{3} \frac{Pa}{c^{3/2}}$														
	$K_I = \frac{0.932P\sqrt{D}}{\sqrt{\pi d^2}} \quad \text{for } 1.2 \leq \frac{D}{d} < 2.1$														
	$K_I = Y \frac{P\sqrt{\pi}}{B\sqrt{W}}$ $Y = 16.7\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 104.7\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} +$ $+ 369.9\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 573.8\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} +$ $+ 360.5\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2}$														

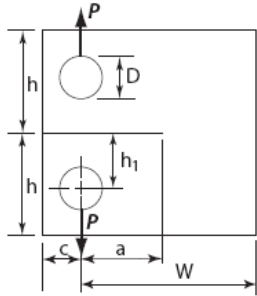
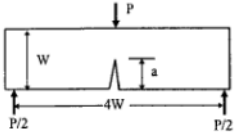
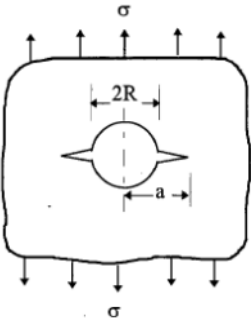
Geometría	Factor de intensidad de esfuerzos																								
	<p> $h = 0.6W, h_1 = 0.275W, D = 0.25W, c = 0.25W,$ thickness, $B = W/2$ </p> <p> $K_I = \frac{P}{WB} \sqrt{a} F(a/W)$ $F(a/W) = 29.6 - 185.5(a/W) + 655.7(a/W)^2 - 1017.(a/W)^3 + 638.9(a/W)^4$ </p>																								
	<p> $B = W / 2$ </p> <p> $K_I = Y \frac{4P\sqrt{\pi}}{B\sqrt{W}}$ </p> <p> $Y = 1.63\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 2.6\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 12.3\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2}$ $- 21.3\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 21.9\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2}$ </p>																								
	<p> $K_I = f\left(\frac{a}{R}\right) \sigma \sqrt{\pi a}$ </p> <table border="1" data-bbox="941 934 1177 1501"> <thead> <tr> <th>a/R</th> <th>$f(a/R)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.01</td><td>0.3256</td></tr> <tr><td>1.02</td><td>0.4514</td></tr> <tr><td>1.04</td><td>0.6082</td></tr> <tr><td>1.06</td><td>0.7104</td></tr> <tr><td>1.08</td><td>0.7843</td></tr> <tr><td>1.10</td><td>0.8400</td></tr> <tr><td>1.20</td><td>0.9851</td></tr> <tr><td>1.25</td><td>1.0168</td></tr> <tr><td>1.30</td><td>1.0358</td></tr> <tr><td>1.40</td><td>1.0536</td></tr> <tr><td>1.80</td><td>1.0495</td></tr> </tbody> </table>	a/R	$f(a/R)$	1.01	0.3256	1.02	0.4514	1.04	0.6082	1.06	0.7104	1.08	0.7843	1.10	0.8400	1.20	0.9851	1.25	1.0168	1.30	1.0358	1.40	1.0536	1.80	1.0495
a/R	$f(a/R)$																								
1.01	0.3256																								
1.02	0.4514																								
1.04	0.6082																								
1.06	0.7104																								
1.08	0.7843																								
1.10	0.8400																								
1.20	0.9851																								
1.25	1.0168																								
1.30	1.0358																								
1.40	1.0536																								
1.80	1.0495																								

Figura 2.28 Valores de intensidad de esfuerzos.

2.10. Fatiga.

La fatiga es el proceso de acumulación de daño en ambientes benignos causado por cargas fluctuantes. Si el daño ocurre en ambientes agresivos el fenómeno se le conoce como corrosión fatiga. El daño por fatiga se presenta en las regiones donde se presenta el esfuerzo máximo, después de cierto número de fluctuaciones el daño acumulado causa la iniciación y posteriormente la propagación de la grieta, este proceso generalmente causa la fractura de los componentes, la vida total de un componente estructural está dada por:

$$N_T = N_i + N_p \quad 2.85$$

Donde:

N_T Es la vida total por fatiga

N_i Vida de iniciación de la fractura

N_p Vida de propagación de la fractura

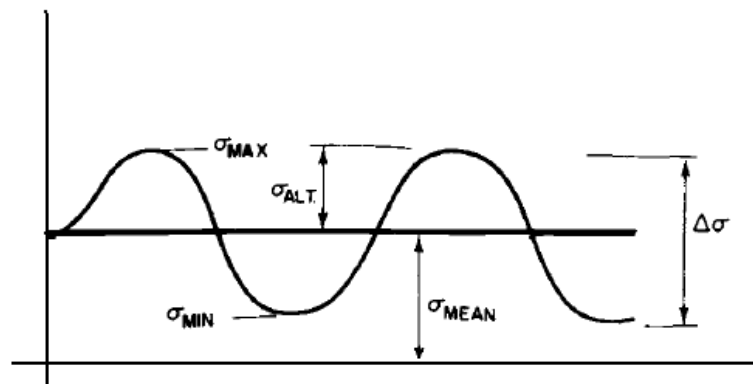


Figura 2.29 Terminología empleada en fatiga para carga de amplitud constante.

No existe una frontera bien delimitada entre la etapa de iniciación y la de crecimiento de la fractura, más aún, en algunos componentes estructurales con fisuras preexistentes la etapa de iniciación se ve reducida o incluso eliminarse por completo.

Las cargas para fatiga pueden ser de diferentes tipos, para una carga cíclica de amplitud constante (ver Figura 2.29) se tiene:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad 2.86$$

Donde:

$\Delta\sigma$ Es el rango de esfuerzos y el esfuerzo promedio esta dado por:

$$\sigma_{\text{promedio}} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad 2.87$$

La amplitud del esfuerzo está dada por:

$$\text{Amplitud} = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad 2.88$$

Y la razón del esfuerzo:

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad 2.89$$

La forma tradicional de estimar la vida total de un elemento estructural sujeto a cargas cíclicas es mediante el uso de los diagramas S-N (esfuerzo alternante contra número de ciclos) estos diagramas asumen que los especímenes se encuentran libres de defectos y la vida total es la suma de los ciclos requeridos para iniciar la fractura más los ciclos requeridos para la propagación., la etapa de iniciación se asocia con regiones localizadas de alta concentración de esfuerzos. El número de ciclos requeridos para lograr una pequeña fisura depende de la amplitud de la carga, del tamaño de grano del material y de la temperatura.

Cuando la amplitud de la carga es muy baja la etapa de iniciación se extiende y la mayor parte de la vida es consumida en la generación de la fractura., por el contrario, cuando la amplitud de la carga se eleva como en el caso de la fatiga de ciclos bajos, el número de ciclos utilizados en la etapa de iniciación es pequeño y se asume que la vida total es consumida en la propagación de la grieta.

Los procedimientos convencionales para estimar la iniciación de la fractura consisten en la obtención de curvas S-N mediante especímenes sin indentaciones, obteniéndose el número de ciclos para iniciación de la fractura, ver Figura 2.30.

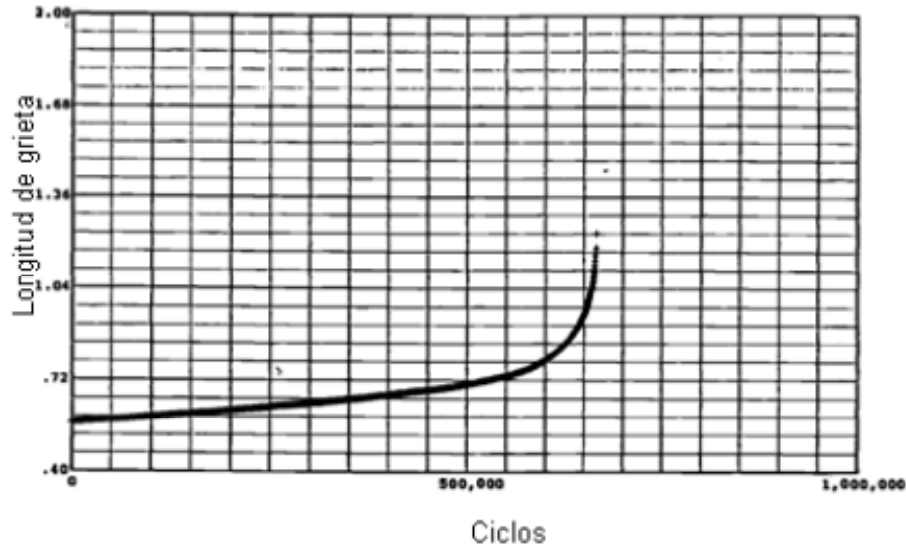


Figura 2.30 Curva S-N.

Al aplicar la Mecánica de la Fractura a componentes estructurales se parte del supuesto de defectos preexistentes o fracturas microscópicas y se analiza solo desde el punto de vista de la propagación de la grieta, la razón de crecimiento de la grieta por número de ciclos esta dado por:

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = f(\Delta K) \tag{2.90}$$

Donde:

Δa Representa el incremento de longitud de fisura.

ΔN El número de ciclos utilizado.

La ecuación 2.90 establece que la razón de crecimiento de la grieta es función del rango del factor de intensidad de esfuerzos, $f(\Delta K)$ se obtiene a través de pruebas

experimentales y los resultados pueden utilizarse en problemas estructurales con la razón de esfuerzos similares [53]. La Figura 2.31 muestra un ejemplo de estos datos obtenidos experimentalmente para un espécimen C(T).

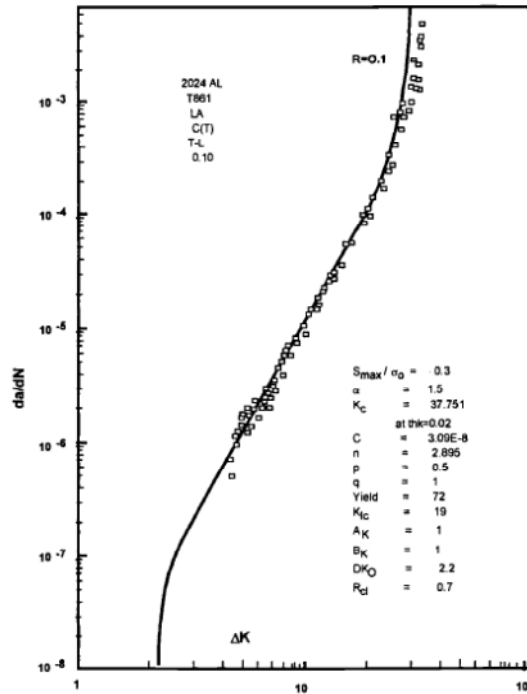


Figura 2.31 Datos experimentales para una aleación de aluminio 2024.

Todas las ecuaciones que describen $f(\Delta K)$ se basan en curvas ajustadas a datos experimentales, el incremento de longitud Δa se mide de manera periódica y se registra el correspondiente número de ciclos, con esta información, el crecimiento de fisura asociada a cierto número de ciclos se grafica representando así los datos experimentales.

Existen dos formas recomendadas por ASTM E647 para determinar la pendiente de la curva, el método de la secante en el cual se toman dos puntos y se realiza una interpolación lineal y el método polinomial en el que se toman al menos cinco puntos de los datos para el cálculo utilizando un polinomio grado 2 para interpolar la curva.

Las pruebas de propagación de fractura se realizan aplicando cargas cíclicas a especímenes para obtener la información de ciclos contra propagación de la grieta, en estas pruebas, la vida del espécimen disminuye conforme la grieta aumenta su longitud. La mayor parte de la vida del material se utiliza cuando la fisura es relativamente pequeña, pueden graficarse varias curvas de longitud de fractura contra vida del material, estas curvas se reducen a una sola al graficar los datos en términos de la razón del crecimiento de la fisura por ciclo de carga $\frac{da}{dN}$ y la fluctuación del factor de intensidad de esfuerzos.

La falla de componentes estructurales sujetos a ambientes agresivos puede ocurrir bajo cargas constantes o fluctuantes, en el caso de cargas estáticas el fenómeno es conocido como corrosión esfuerzo y para cargas fluctuantes el fenómeno es denominado corrosión fatiga.

La forma tradicional de análisis de la corrosión esfuerzo se basa en el tiempo requerido para el fallo en especímenes sujetos a esfuerzos constantes algo similar a la forma tradicional del estudio de la fatiga S-N en el que el número de ciclos es reemplazado por el tiempo requerido para el fallo, además, aquí también se combina el tiempo requerido para inicial la fisura así como el tiempo requerido para la propagación. La necesidad de separar las etapas de iniciación y propagación se debe a que los resultados experimentales muestran que algunos materiales aparentan cierta inmunidad al fenómeno corrosión esfuerzo al probarse especímenes pulidos mientras que presentan cierto nivel de susceptibilidad cuando se prueban especímenes previamente fracturados del mismo material.

La aplicación de la Mecánica de la Fractura al análisis de la corrosión esfuerzo utiliza el factor K_{EAC} (del inglés *Environment Assisted Cracking*) equivalente al factor de intensidad de esfuerzos., ASTM E1681 estandariza la prueba, el factor se establece para una temperatura y un ambiente agresivo dado., la Figura 2.32 muestra un espécimen de prueba mientras que la Figura 2.33 muestra resultados típicos de esta prueba.

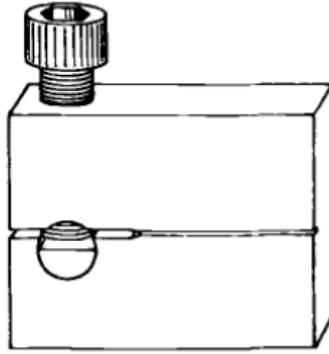


Figura 2.32 Espécimen C(T) para prueba de corrosión esfuerzo.

El daño por corrosión fatiga ocurre más rápidamente de lo que pudiera estimarse con la suma algebraica del daño por fatiga, corrosión o corrosión esfuerzo, la combinación de efectos individuales de cada condición hace que este fenómeno sea demasiado complejo de tal manera que no puede predecirse el comportamiento de componentes estructurales en estas condiciones, sin embargo se han logrado avances significativos utilizando la Mecánica de la Fractura en su análisis [24].

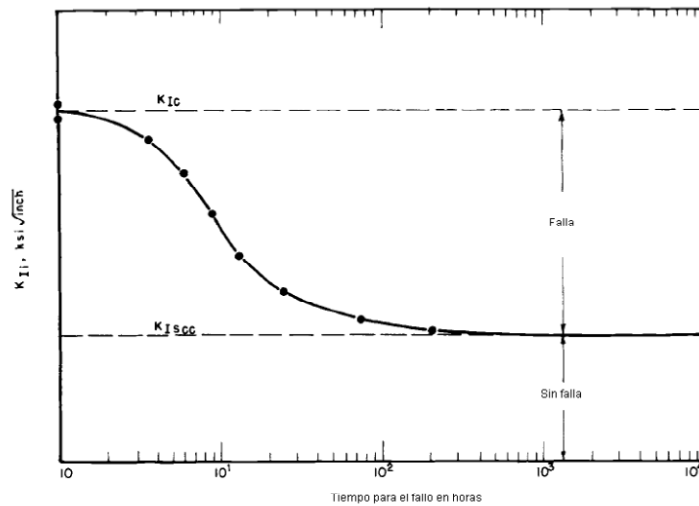


Figura 2.33 Curva típica de corrosión esfuerzo.

Se ha intentado generalizar una ecuación para predecir la iniciación de la fractura en ambientes corrosivos para algunos aceros a temperatura ambiente en una

solución de agua destilada con 3.5% de NaCl, los aceros que fueron sujetos a prueba [24] representaron un rango amplio de composición química, procesos termo-mecánicos, micro estructura cristalina y propiedades mecánicas tales como resistencia a la tensión, límite de fluencia, elongación, tenacidad a la fractura, etc., las frecuencias de carga utilizadas fueron 1.2, 12, 60, 120 y 300 Hz con razones de esfuerzos de -1, 1 y 0.5., la iniciación de la fractura se presento en el rango de 10^4 a 10^8 ciclos. La ecuación lineal (sistema inglés) que más se ajusto a los datos es:

$$N_i = 3.56 \times 10^{11} \left(\frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}} \right)^{-3.36} \quad 2.91$$

La Figura 2.34 muestra estos resultados, es necesario aclarar que si se utiliza el límite inferior de la grafica, las estimaciones son demasiado conservadoras, por el contrario, si los especímenes presentan severas concentraciones de esfuerzos el resultado en realidad es mucho menor que el estimado con la ecuación 2.91

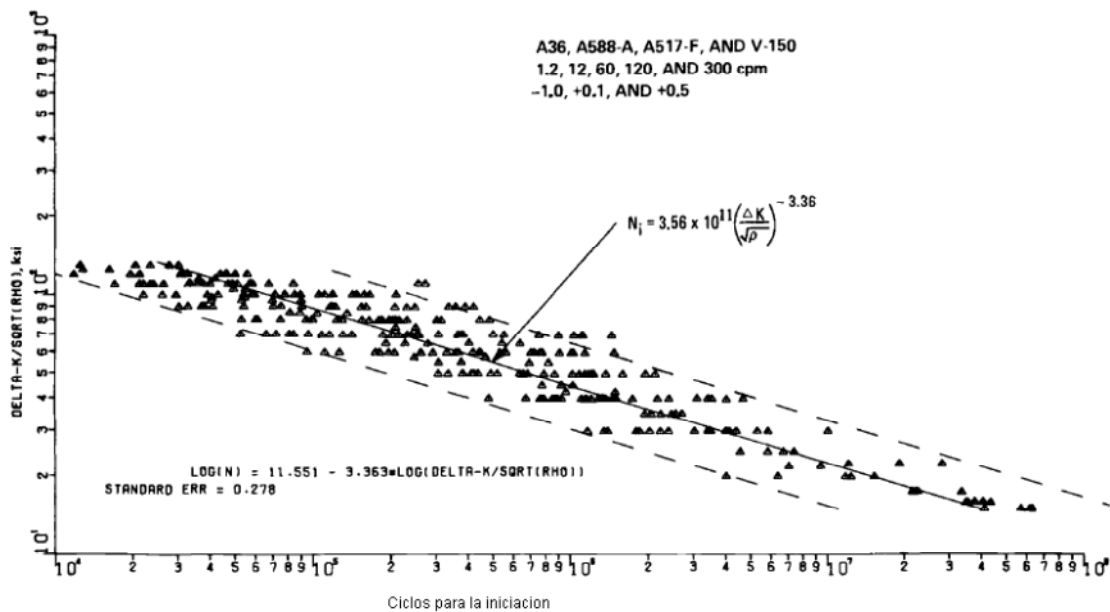


Figura 2.34 Iniciación de la fractura por corrosión fatiga de varios aceros.

La propagación de las grietas por corrosión fatiga es un fenómeno también complejo, el comportamiento del crecimiento en un ambiente benigno (fatiga) es un caso

especial de corrosión fatiga de los metales, la Figura 2.35 representa el comportamiento de dos metales A y B sujetos a cargas fluctuantes en un ambiente que no representa ningún efecto en comportamiento de la fractura del material por lo que el fenómeno de corrosión fatiga puede ser estudiado tomando como base este caso especial y posteriormente determinar el efecto de la corrosión fatiga en las regiones I, II y III. Sin embargo, debido a que K_{ISCC} (del inglés Stress corrosión Cracking) para un sistema ambiente-material define el valor de deformación plana K_I arriba del cual la fractura por corrosión esfuerzo puede ocurrir bajo cargas estáticas, el comportamiento de la propagación de la fractura por corrosión fatiga para un sistema ambiente-material puede ser alterado cuando el valor máximo de K_I , $K_{I_{max}}$ en un sistema de cargas cíclicas se vuelve más grande que K_{ISCC} , consecuentemente, la corrosión fatiga (propagación) puede dividirse en dos comportamientos, por debajo de K_{ISCC} y arriba de K_{ISCC} , (ver Figura 2.35).

Como ya se ha mencionado, la propagación de las grietas por corrosión fatiga es un fenómeno complejo, el comportamiento de componentes estructurales sujetos a este régimen se ve afectado por muchas variables, entre ellos la frecuencia de la carga, la forma cíclica, y la razón de los esfuerzos cíclicos aplicados., las pruebas de baja frecuencia son muy costosas y requieren de demasiado tiempo de prueba, por consiguiente, no existe un entendimiento claro del fenómeno, no obstante, se puede caracterizar con la información disponible, por ejemplo, la Figura 2.36 muestra el comportamiento de este fenómeno como función de la frecuencia de los ciclos de carga.

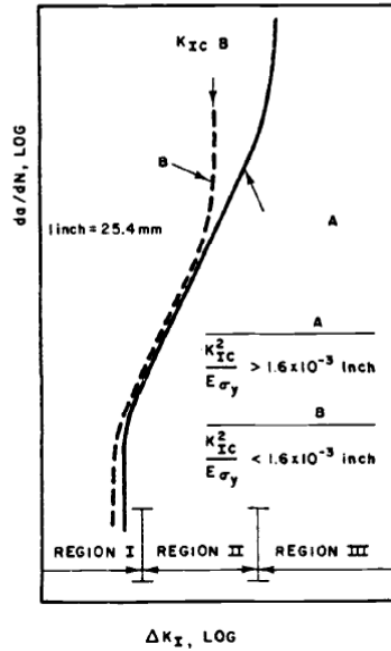


Figura 2.35 Representación esquemática del crecimiento de las grietas por fatiga.

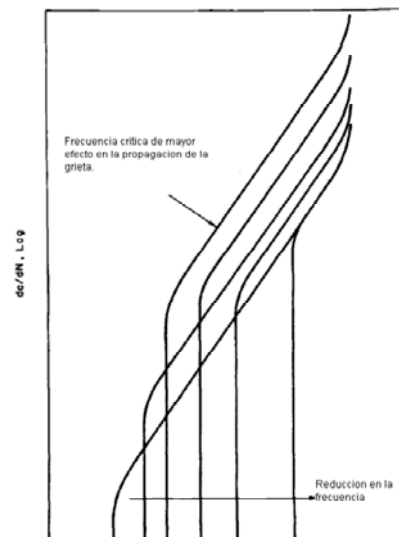


Figura 2.36 Representación idealizada de la corrosión fatiga en función de la frecuencia.

CAPÍTULO 3 Análisis Preliminares utilizando NASGRO, FRANC2D y ANSYS

En este capítulo se presentan las características del aluminio 6061-T651, su composición química y el ambiente al que fue expuesto, además se presentan los análisis numéricos y analíticos preliminares. Los especímenes utilizados son los denominados C(t), los estudios muestran las características de la fractura de forma analítica (NASGRO) y con los paquetes computacionales de análisis por elemento finito FRANC2D y ANSYS.

3.1. Aluminio 6061-T651.

El aluminio 6061-T651 tiene como características cualitativas alta resistencia, buena maquinabilidad y buena resistencia a la corrosión, los usos básicos son: acoplamientos, conectores, cilindros hidráulicos y componentes de válvulas. Otras denominaciones del mismo material bajo diferentes normas son:

- UNS A96061
- ISO ALMgLSiCu
- AD-33
- AA6061-T651

Las propiedades físicas se enlistan en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Propiedades físicas del aluminio 6061-T651

Resistencia a la tensión	45 Ksi
Resistencia a la fluencia	40 Ksi
Módulo de elasticidad	10,000 Ksi
Relación de Poisson	.33
Tenacidad a la fractura(def. plana)	26Ksi in ^{1/2}
Densidad	0.1 lb/in ³

La composición química del aluminio 6061-T651 se muestra en la Tabla 3.2 :

Tabla 3.2 Composición química de la aleación 6061-T651

Metal	Mínimo %	Máximo %
Silicio	0.4	0.8
Hierro	-	0.7
Cobre	0.15	0.4
Manganeso	-	0.15
Manganeso	0.8	1.2
Cromo	0.04	0.35
Zinc	-	0.25
Titanio	-	0.15
Otro	-	0.05
Total de otros		0.15
Aluminio		Remanente

3.2. Configuración de los especímenes.

Los especímenes de prueba se fabricaron utilizando normas internacionales para pruebas de fractura, específicamente el denominado C(t) en diferentes estándares de prueba de ASTM tales como E561 y E1290. Este espécimen consiste en una sola placa con las características que se muestran en la Figura 3.1 con un valor de W de 1.5 pulgadas y B 0.25 pulgadas.

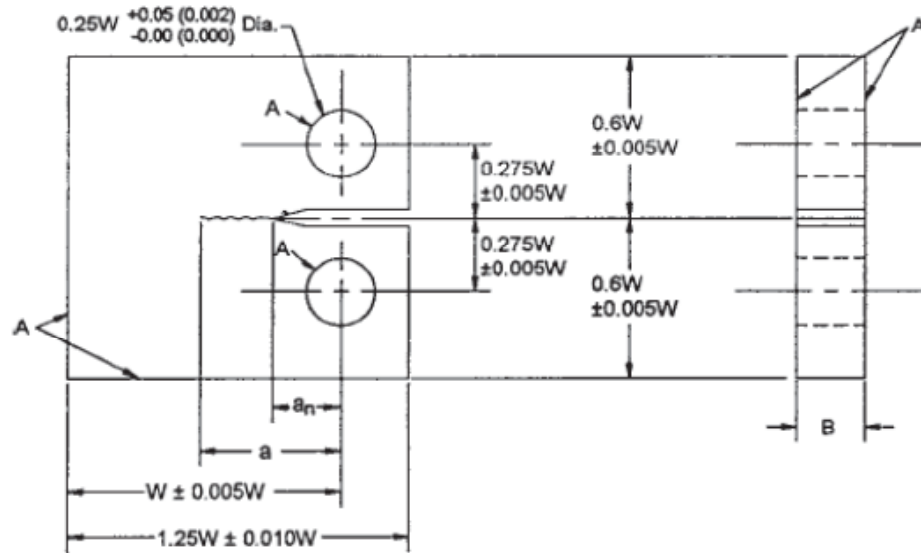


Figura 3.1 Especimen estándar ASTM C(t).

3.3. Ambiente de exposición de los especímenes sujetos a estudio.

El ambiente al que se expusieron los especímenes corresponde a los desechos líquidos del proceso de suministro de vapor endógeno en la planta de generación

geotérmica Cerro Prieto, este producto se le conoce como salmuera geotérmica y es básicamente el agua que se separa de la mezcla extraída del subsuelo, ésta mezcla es 98.751% del peso vapor de agua y el resto de productos químicos enlistados a continuación [60]:

- 1.187% CO₂
- 0.039% H₂S
- 0.008% NH₃
- 0.011% CH₄
- 0.002% N₂
- 0.001% H₂
- 0.0001% He
- 0.0001% Ar

Los materiales disueltos y en suspensión de la salmuera geotérmica se enlistan la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Composición química de la salmuera

Número de pozo	pH	Conductividad	Materiales disueltos y en suspensión del agua en ppm						
			Na	K	Ca	Mg	Fe	Li	Cl
403	5.22	16400	2880	630	94	0.05	0.80	6.10	5491

Los especímenes fueron ensayados a condiciones normales de ambiente de laboratorio para posteriormente ser expuestos a corrosión inmersos en la salmuera geotérmica in situ por un periodo de 30 días, de ésta manera, se comparan los resultados y cuantifica el efecto de la corrosión en el agrietamiento, además, se evaluaron mediante métodos analíticos y numéricos.

3.4. Herramientas utilizadas en los análisis preliminares.

Para los estudios no experimentales se han utilizado 3 herramientas:

- NASGRO
- FRANC2D
- ANSYS

La primera básicamente “mecaniza” el método analítico y las dos restantes utilizan el método de elemento finito en su análisis, éstas herramientas se describen brevemente a continuación.

3.4.1. Paquete computacional NASGRO.

Para el cálculo analítico de los factores de intensidad de esfuerzo se utilizó el paquete NASGRO, básicamente consiste en una recopilación de ecuaciones y tablas generadas a través de los años para diferentes configuraciones y tamaños de fisuras, en el caso específico de los especímenes tipo C(t), el paquete lo denomina como SS02 y se muestra en la Figura 3.2, las ecuaciones utilizadas en ésta configuración así como en otras se encuentran incluidas en la sección 2.9 del presente trabajo, para la determinación de las longitudes iniciales se utilizaron diferentes cargas y longitudes de manera iterativa hasta llegar a los resultados requeridos.

SS02

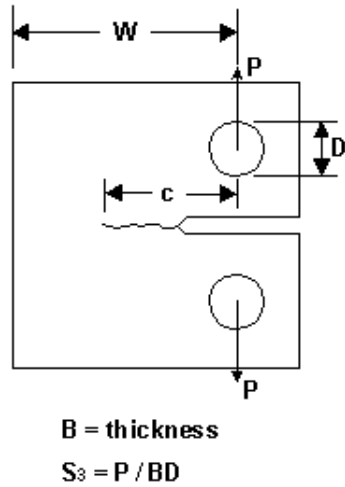


Figura 3.2 Espécimen C(t) en NASGRO.

3.4.2. Paquete computacional FRANC2D.

Este paquete de cómputo (*Fracture Analysis Code-2D*) fue desarrollado en la universidad Cornell en Estados Unidos y permite resolver problemas de Mecánica de la Fractura usando elementos finitos. El código FRANC2D permite modelar el comportamiento de la propagación de la grieta, la principal ventaja de FRANC2D estriba en que durante el análisis de la propagación, la topología del mallado está bien definida y al generarse nuevas superficies de grieta se da una edición localizada del mallado borrándolo en la vecindad de la punta para extender la fisura y crear posteriormente un nuevo mallado en la zona previamente borrada. El resultado es que en la propagación de la grieta la geometría del problema original se conserva y las operaciones de remallado operan directamente en la base de datos.

En la Figura 3.3 se muestra de manera conceptual la metodología utilizada por FRANC2D, en la etapa de pre-procesamiento se establece la geometría, los materiales, el mallado y las condiciones de frontera además de toda la información necesaria para el análisis, durante la generación del modelo la información se extrae de la base de datos y se convierte en información útil para analizarse, en ésta etapa se realiza la conectividad

además de optimizar el número de ecuaciones y la matriz de rigidez, además, se inicializa la estructura de los datos necesaria para el proceso de solución durante el cual se aplican las condiciones de frontera y se satisfacen las ecuaciones de equilibrio, el proceso es iterativo y conforme este se realiza, se monitorean los parámetros de fractura durante el análisis, la salida de este proceso es la etapa de transferencia de resultados en la cual se transfieren los datos para su post-procesamiento y el modelo de crecimiento.

La etapa final consiste en el desarrollo del modelo de crecimiento de la fisura en el que se utilizan algoritmos de extensión de la grieta usando la dirección estimada o introducida por el usuario, durante ésta etapa, se borra el mallado en la vecindad de la punta de la grieta y ésta se propaga. El algoritmo de remallado coloca una serie de elementos alrededor de la nueva punta y reconstruye la malla en la región borrada, posteriormente la grieta se propaga para finalmente regresar el modelo al equilibrio y representar de nuevo un punto de partida.

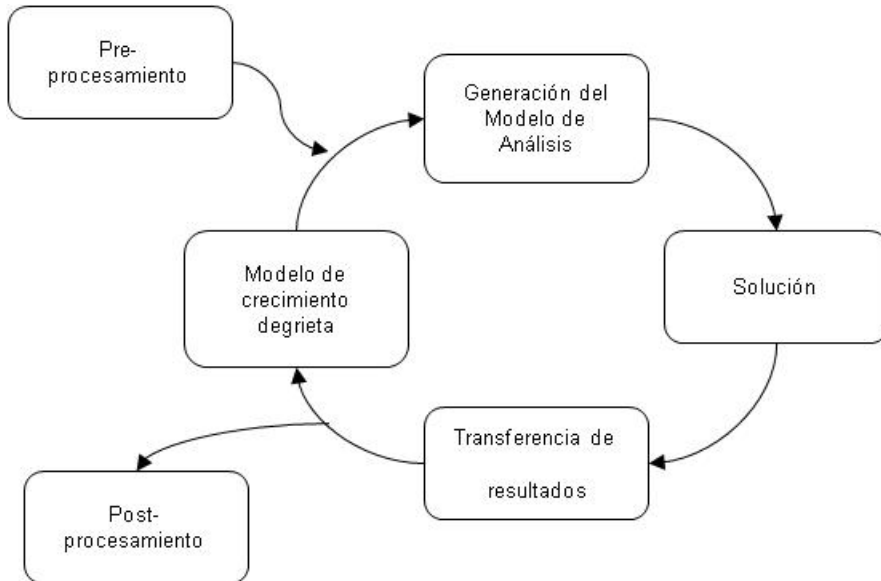


Figura 3.3 Metodología utilizada por FRANC2D.

3.4.3. Simulación de la fractura utilizando el paquete computacional ANSYS.

ANSYS utiliza una metodología convencional con elementos especiales realizando el análisis y posteriormente utiliza comandos durante el post-procesamiento para calcular los parámetros de la mecánica de la fractura, durante el modelado, se utiliza elementos triangulares de seis nodos que tienen como característica un comportamiento de desplazamiento cuadrático. El tipo de elemento utilizado en ANSYS se muestra en la Figura 3.4.

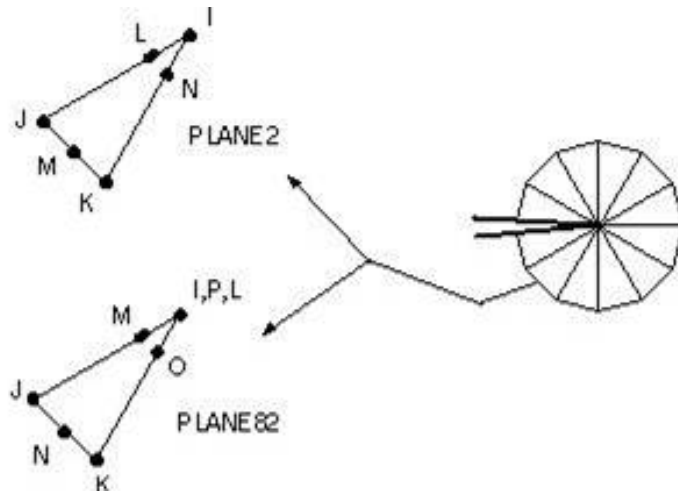


Figura 3.4 Elemento triangular utilizado por ANSYS.

3.5. Resultados.

3.5.1. Resultados Analíticos.

Los datos dimensionales de entrada utilizados por NASGRO están en la Figura 3.5, básicamente consiste en la aplicación de 750 lb de tensión (P) equivalente a un esfuerzo promedio de 8 Ksi, una vez alimentados los datos de entrada el paquete los procesa.

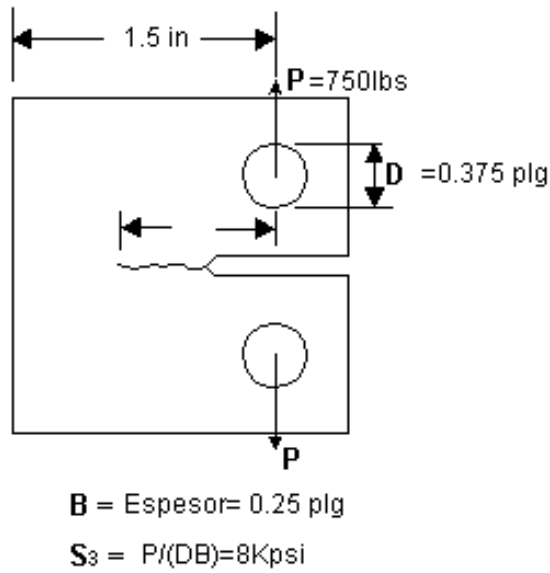


Figura 3.5 Datos dimensionales de entrada.

Tabla 3.4 Resultados para cada longitud de fisura

c	K	Sn	Sn/Sy
0.0	4.341	6.440	0.157
0.1	6.402	7.580	0.185
0.2	8.426	9.007	0.220
0.3	10.468	10.825	0.264
0.4	12.616	13.185	0.322
0.5	15.002	16.320	0.398
0.6	17.829	20.600	0.502
0.7	21.422	26.644	0.650
0.8	26.314	35.547	0.867
0.9	33.446	49.400	1.205
1.0	44.620	72.600	1.771

Al realizar el procesamiento de la información alimentada, el paquete arroja como salida el Factor de Intensidad de Esfuerzos, el esfuerzo en la sección neta, y el factor de seguridad para cada longitud de fisura alimentada; en la Tabla 3.4 se muestran los resultados arrojados. El paquete además calcula la longitud de grieta crítica en la cual ocurre la fractura inestable, la Tabla 3.5 muestra dichos resultados.

Tabla 3.5 Resultados arrojados por NASGRO

MODELO: SS02	
Diámetro del orificio D	0.375 pulg
Espesor B	0.250 pulg
Longitud W	1.500 pulg
FIS crítico	26.000 ksi*√(pulg)
Esfuerzo crítico	41.000 ksi
Esfuerzo aplicado	8.000 ksi
Solución final:	
Longitud crítica de grieta (determinada por el FIS)	0.7942 pulg

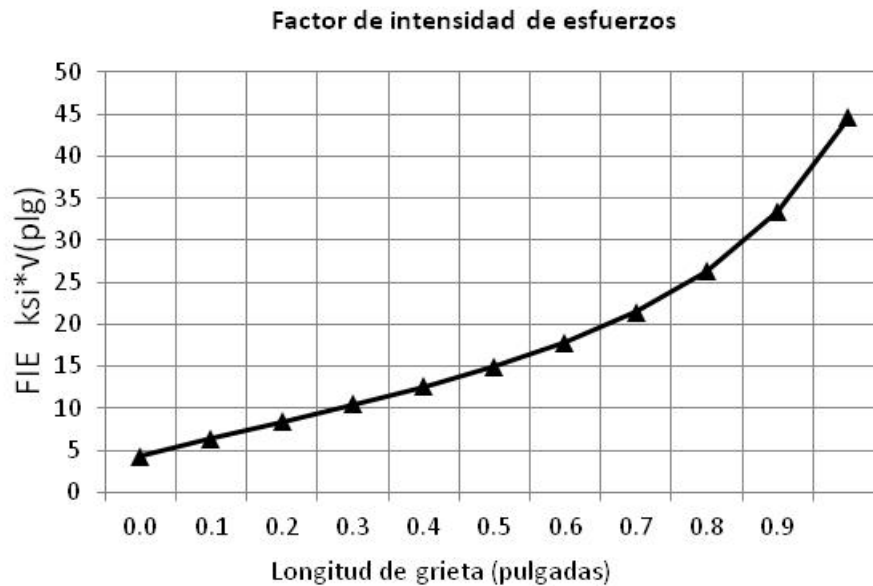


Figura 3.6 Valores de FIE contra longitud de fisura c.

Finalmente, en la Figura 3.6 se tienen los valores del factor de intensidad de esfuerzos calculado contra la longitud de la fisura. Además, la Figura 3.7 muestra los valores del esfuerzo nominal de la sección transversal S_n dividido entre el esfuerzo de fluencia S_y , se observa que la longitud crítica se presenta con un esfuerzo en la sección transversal inferior al límite de fluencia del material.

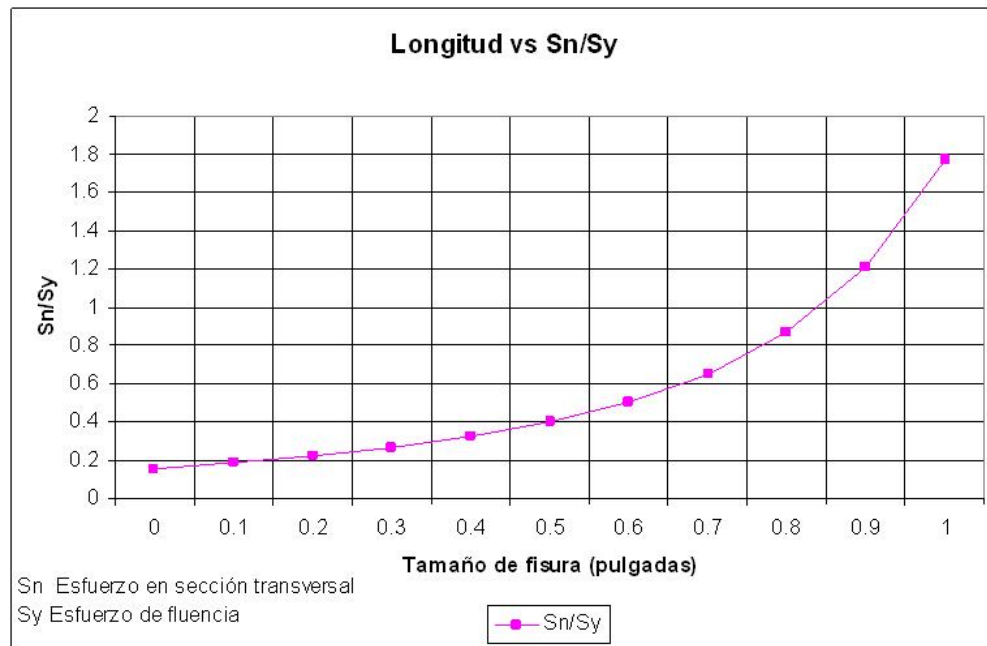


Figura 3.7 Valores de Sn/Sy contra longitud de fisura c.

3.5.2. Resultados mediante FRANC2D.

Para simular el comportamiento de la fractura en el espécimen, se modeló su geometría con una carga de esfuerzo promedio de 8 Ksi en los orificios. Se utilizó el programa de generación de mallados CASCA (distribuido junto con FRANC2D) para crear la configuración inicial del mallado, el proceso inicia con la creación de la geometría y las subdivisiones dentro de las condiciones de frontera del espécimen como se muestra en la Figura 3.8, el objetivo de éstas subdivisiones es crear un mallado más denso en el área de interés y así, obtener una mejor precisión en los datos de salida. Antes de asignar el tipo de elementos, las fronteras de cada subregión se dividen en segmentos dando como resultado lo mostrado en la Figura 3.9, posteriormente se genera el mallado seleccionando el tipo de elemento triangular en este caso, la Figura 3.10 muestra el mallado final con mayor densidad en el área donde se simulará la fisura.

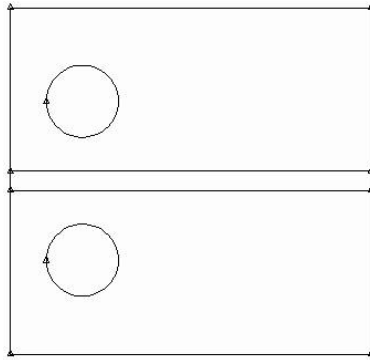


Figura 3.8 Geometría y subregiones dentro del espécimen.

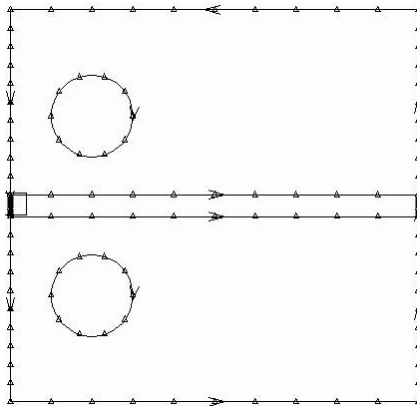


Figura 3.9 Subregiones divididas en segmentos.

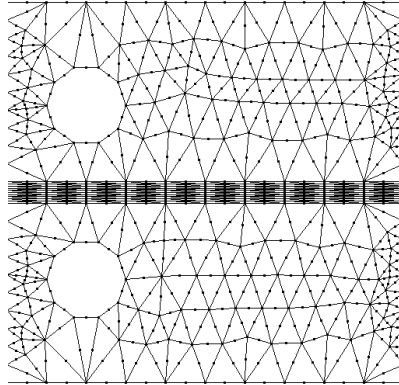


Figura 3.10 Mallado mediante CASCA.

Posteriormente, CASCA prepara los datos para ser utilizado por FRANC2D, aquí se aplican las cargas que fueron modeladas como una carga distribuida sobre la superficie de cada barreno.

La carga aplicada se distribuye de manera normal a la superficie del perno y se modeló como una carga distribuida de forma cuadrática sobre la mitad de los barrenos como se muestra en la Figura 3.11.

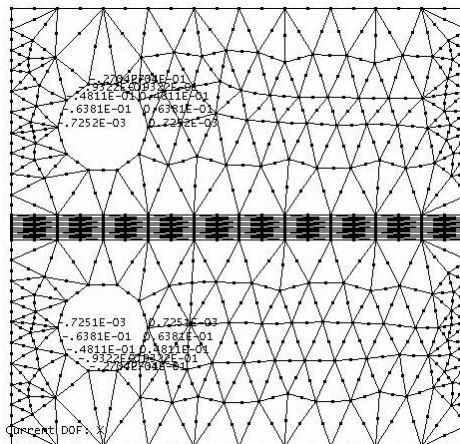


Figura 3.11 Distribución de las cargas aplicadas.

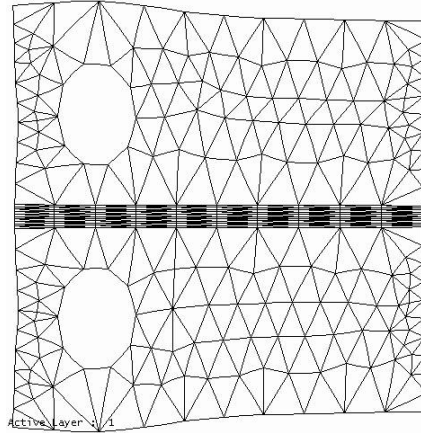


Figura 3.12 deformaciones antes de modelar la grieta.

La carga en este caso es de 750 lb y es equivalente a un esfuerzo aplicado de 8000 PSI utilizadas previamente en el método analítico. Una vez aplicadas las cargas se corre el análisis, el mallado deformado se muestra en la Figura 3.12 , posteriormente se modela la fisura a partir del extremo izquierdo especificando el punto de inicio y el de terminación, FRANC2D borra los elementos en la trayectoria de la fisura y genera un nuevo mallado como se muestra en la Figura 3.13. Finalmente el mallado incluyendo la punta de la grieta se muestra en la Figura 3.14.

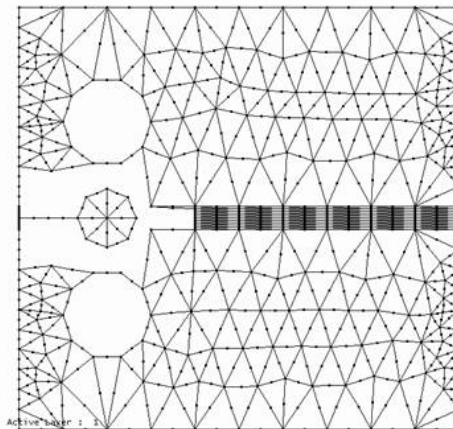


Figura 3.13 Secuencia de borrado de elementos y generación de nuevo mallado.

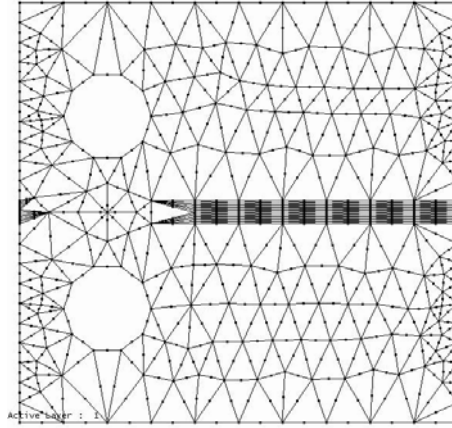


Figura 3.14 Mallado final mostrando la punta de la grieta.

Al tener definido el nuevo mallado incluyendo la grieta, se corre el análisis de nuevo. La Figura 3.15 muestra el espécimen con el campo de esfuerzos concentrados en la punta de la grieta.

La distribución de los esfuerzos en la punta de la grieta alcanza su máximo en las áreas de color rojo, sin embargo están muy por debajo de la fluencia del material para esta longitud de fisura inicial.

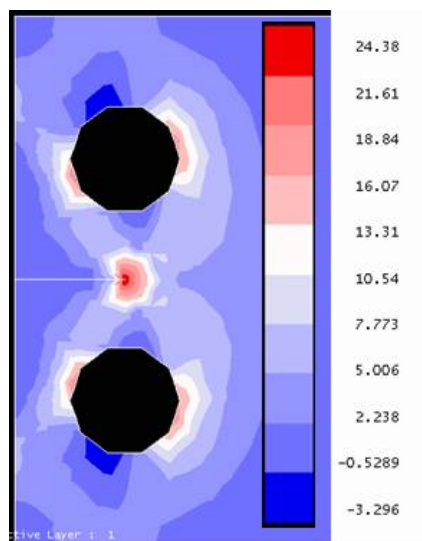


Figura 3.15 Campo de esfuerzos en la punta de la fisura.

Al igual que en el método analítico, en este caso se realizó la simulación para cada longitud de fisura correspondiente con un incremento de longitud de 0.1 pulgadas, el mismo procedimiento se aplica para cada incremento de longitud, en las Figura 3.16 y Figura 3.17 se muestran los resultados para las longitudes de fisura 0.8 pulgadas además de la secuencia del mallado, se observa que la concentración de esfuerzos se da en la punta de la grieta como era de esperarse.

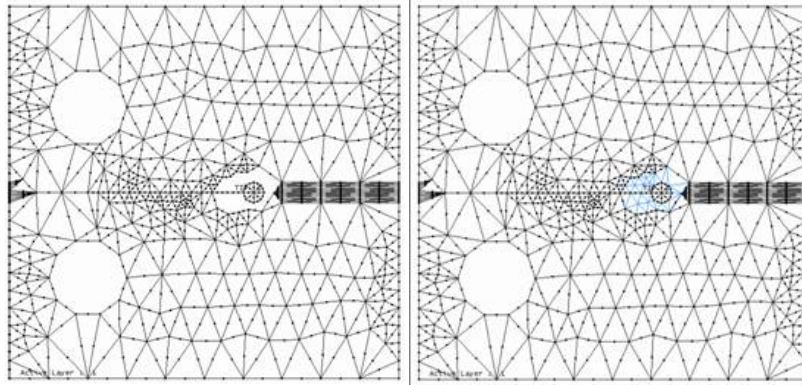


Figura 3.16 Generación del mallado para una longitud de fisura de 0.8 pulgadas.

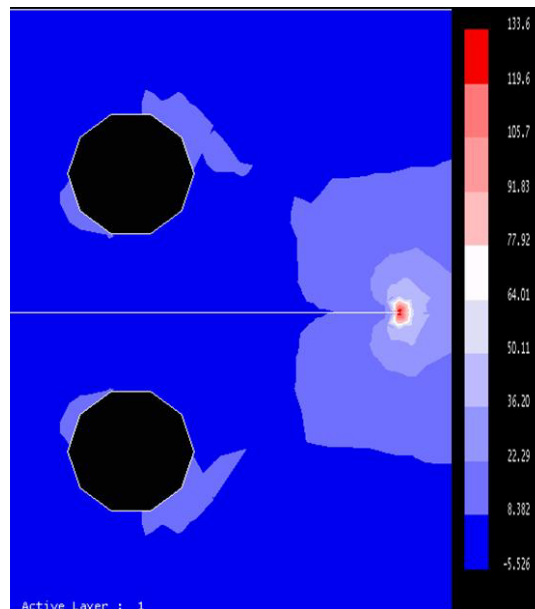


Figura 3.17 Campo de esfuerzos para una longitud de fisura de 0.8 pulgadas.

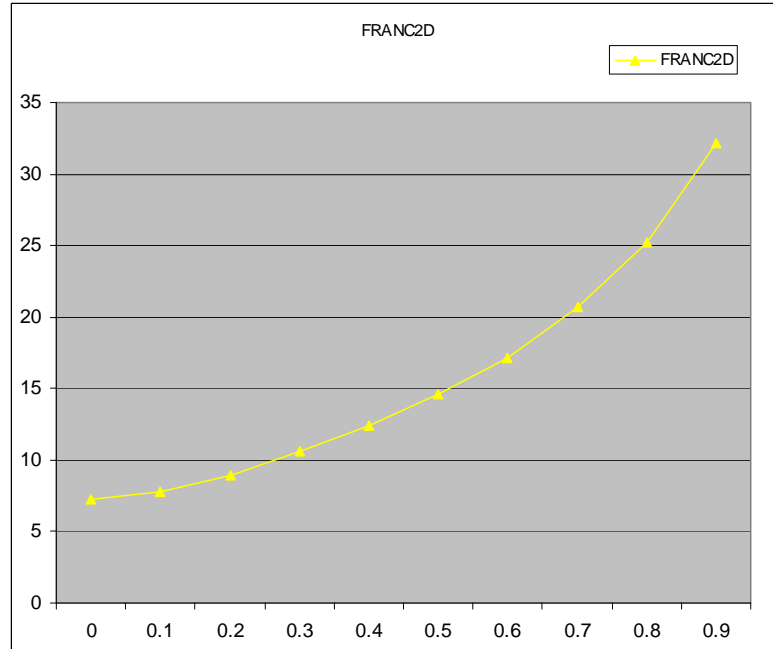


Figura 3.18 Valores de FIE ($KSI\sqrt{in}$) contra longitud de fisura a (in).

La salida de FRANC2D para cada una de las longitudes de grieta inicial se muestra en la Figura 3.18 y se enlista en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Resultados para una longitud inicial de fisura 0.0 pulgadas

Longitud (in)	FRANC2D (KSI√in)	G1 lb/in	J1 lb/in
0.1	7.815	0.0063	0.0062
0.2	8.986	0.0082	0.0081
0.3	10.61	0.0112	0.0113
0.4	12.42	0.0155	0.0154
0.5	14.63	0.0213	0.0214
0.6	17.14	0.0295	0.0296
0.7	20.68	0.0420	0.0428
0.8	25.19	0.0637	0.0634

Es importante mencionar que a medida que crece la longitud de la grieta, el factor de intensidad de esfuerzos aumenta hasta alcanzar la tenacidad de fractura del material de $26 \text{ KSI}\sqrt{\text{in}}$ a una longitud de grieta aproximada de 0.8 pulgadas. Por otra parte, aunque el valor de la razón de energía liberada G y la integral J aumentan, los valores son despreciables ya que se está considerando en esfuerzo plano (Tabla 3.6)

3.5.3. Resultados mediante ANSYS.

Para simular el comportamiento de la fractura en el espécimen, se modeló la geometría con una carga de esfuerzo promedio de 8 Ksi en los orificios. El proceso inicia con la creación de la geometría y la generación de un mallado más denso en la punta de la grieta y así tener una mejor precisión en los datos de salida, el tipo de elemento utilizado es el descrito en la sección 3.4.3.

Posteriormente se aplican las cargas distribuida sobre la superficie de cada barreno tomando como ventaja la simetría del espécimen y modelando únicamente la mitad.

La carga es de 750 lb y es equivalente a un esfuerzo aplicado de 8000 PSI utilizadas previamente en el método analítico. Una vez aplicadas las cargas se corre el análisis para posteriormente definir una trayectoria en la punta de la grieta y así determinar el Factor de Intensidad de Esfuerzos en la punta de la fisura.

Por otra parte, en la Figura 3.19, se muestran los esfuerzos principales de 44870 *PSI* en la punta de una grieta de 0.1 pulgadas mientras que, en la Figura 3.20, se tienen los esfuerzos principales de 97299 *PSI* para una longitud de grieta de 0.8 pulgadas.

Se puede observar en ambas figuras que los esfuerzos se concentran en la punta de la grieta.

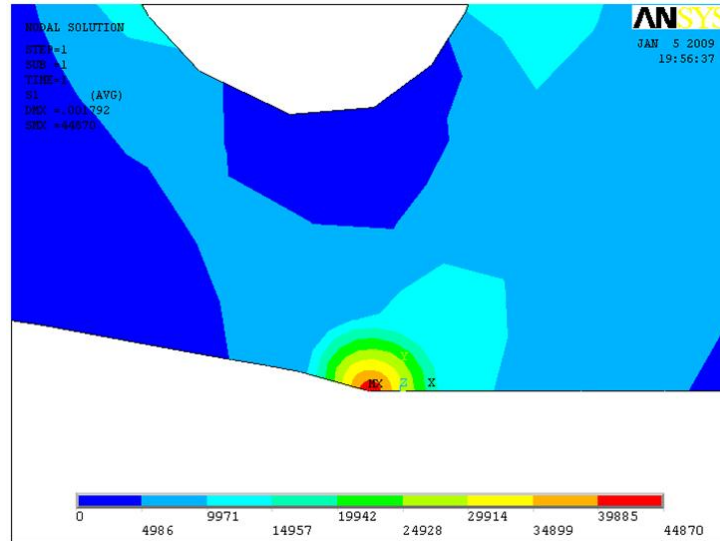


Figura 3.19 Campo de esfuerzos para una longitud de fisura de 0.1 pulgadas.

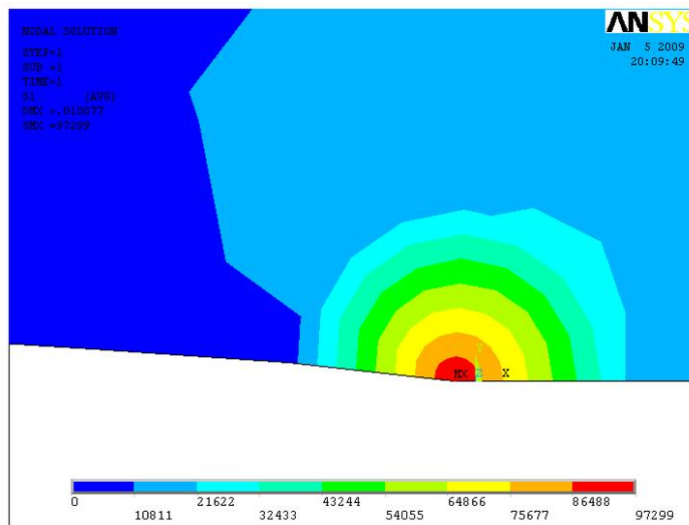


Figura 3.20 Campo de esfuerzos para una longitud de fisura de 0.8 pulgadas.

3.6. Resultados para el Aluminio 6061-T651.

La Tabla 3.7 muestra los resultados numéricos finales para el Aluminio sujeto de estudio, los valores del factor de intensidad de esfuerzos arrojados por cada uno de los métodos además de la energía potencial G y de la integral J arrojados por el análisis numérico (FRANC) antes de la propagación de la grieta, considerando el material virgen y una carga de tensión de 750 lb. En esta se aprecia que los valores de G y J son muy

parecidos, ya que los estudios fueron realizados en esfuerzo plano, para considerar la energía umbral total antes que se presentara la energía de superficie.

Se observa el aumento del FIE a medida que crece la longitud de la grieta. Es importante mencionar que el valor de la Tenacidad de Factura de 26 Ksi. in^{1/2} es presentado cuando la grieta alcanza una longitud aproximada de 0.8 pulgadas. La Figura 3.21 muestra estos valores de salida graficados.

Tabla 3.7 Resultado numéricos del Aluminio 6061-T651

Longitud (in)	NASGRO (KSI√in)	ANSYS (KSI√in)	FRANC2D (KSI√in)	G1 lb/in	J1 lb/in
0.1	6.4024	7.52	7.815	0.0063	0.0062
0.2	8.4262	8.83	8.986	0.0082	0.0081
0.3	10.4683	10.67	10.61	0.0112	0.0113
0.4	12.6159	12.63	12.42	0.0155	0.0154
0.5	15.0015	15.03	14.63	0.0213	0.0214
0.6	17.8292	17.81	17.14	0.0295	0.0296
0.7	21.422	21.34	20.68	0.0420	0.0428
0.8	26.3141	26.31	25.19	0.0637	0.0634

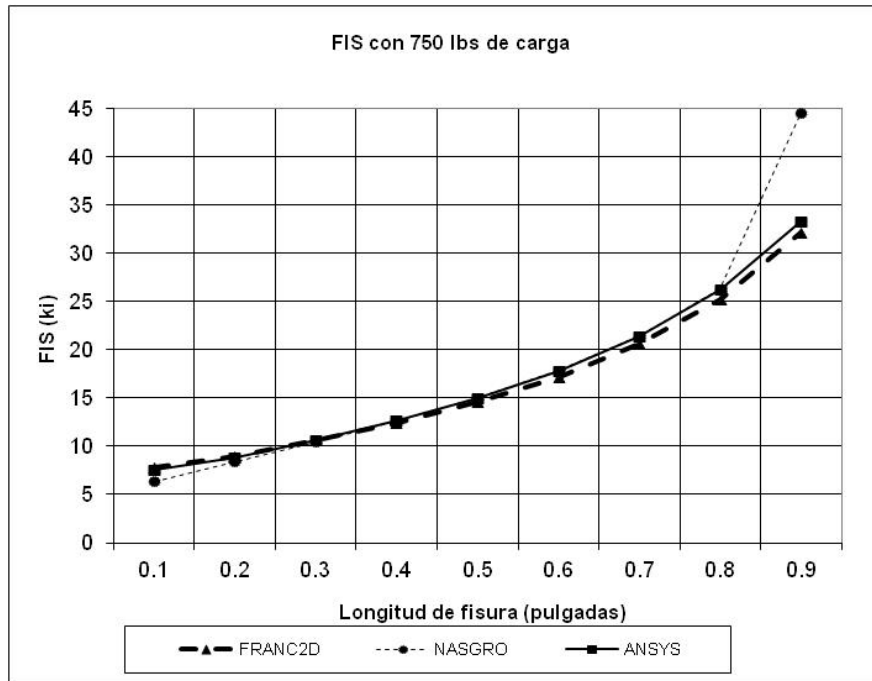


Figura 3.21 Valores de FIE contra longitud de fisura a diferentes métodos.

Además, para cada longitud de fisura en incrementos de 0.1 pulgadas se realizó el mismo procedimiento en NASGRO, ANSYS y FRANC2D determinándose la magnitud de la fuerza crítica para que se dé una fractura inestable, los datos se encuentran tabulados en la Tabla 3.8 y graficados en la Figura 3.22.

Tabla 3.8 Resultado numéricos del Aluminio 6061-T651 para $K = 26KSI\sqrt{in}$

Longitud (in)	NASGRO (lbs)	FRANC2D (lbs)	ANSYS (lbs)
0.1	3047	2485	2592
0.2	2311	2170	2250
0.3	1861	1840	1855
0.4	1547	1560	1549.9
0.5	1298	1330	1298.4
0.6	1093	1132	1093.1
0.7	909	945	909.4
0.8	740	770	745

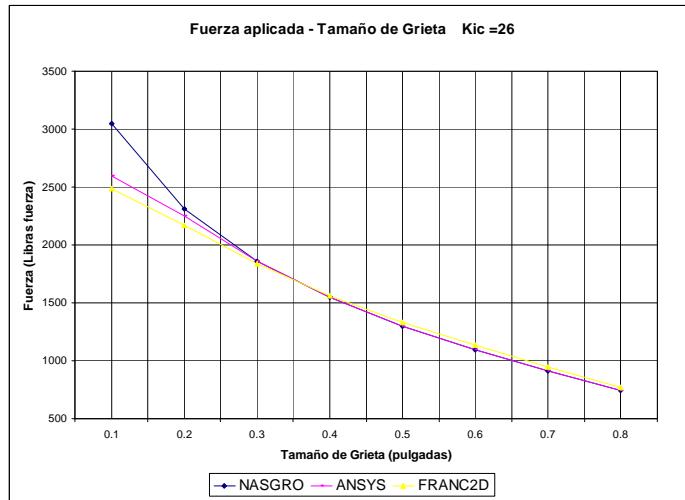


Figura 3.22 Valores de fuerza contra longitud de fisura a .

Los resultados obtenidos por las diferentes técnicas de análisis numérico y analítico coinciden en gran parte en las diferentes longitudes de grietas, por lo tanto, dichas técnicas serán consideradas para la comparación con los resultados experimentales del capítulo 4.

CAPÍTULO 4 Resultados Experimentales Finales de Fractura

En este capítulo se muestran las características de los especímenes fabricados para las pruebas experimentales así como los resultados obtenidos en los ensayos a tensión y de fatiga donde se comparan con los análisis numéricos del capítulo anterior. Además se presentan los resultados de los especímenes expuestos a la salmuera geotérmica considerando diferentes longitudes de grieta.

4.1. Fabricación de los especímenes de Aluminio 6061-T651.

Para llevar a cabo los ensayos de fractura en el presente trabajo, fue necesario elaborar especímenes tipo C(t) considerando la norma ASTM E-1820, como se muestra en la Figura 4.1. Para esto se consideró un valor W de 1.5 pulgadas y un espesor B de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

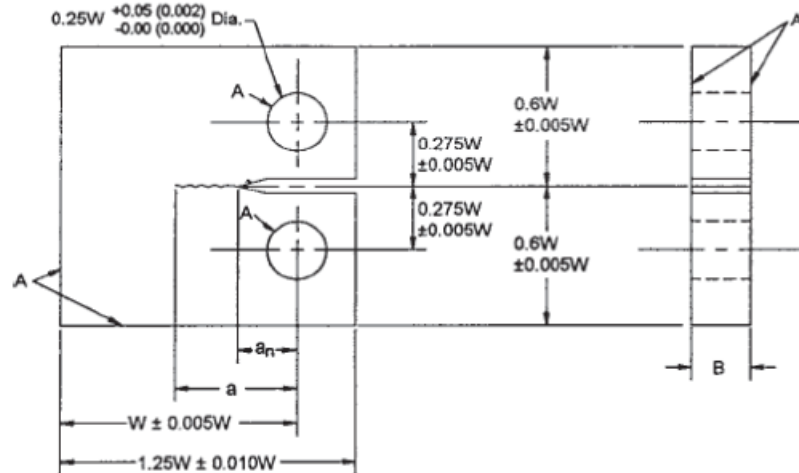


Figura 4.1 Dimensiones de los especímenes fabricados

En la Figura 4.2 se muestran los especímenes los cuales fueron fabricados en Aluminio 6061-T651.



Figura 4.2 Especímenes C(t) fabricados.

4.2. Análisis experimental de fractura.

Para realizar los primeros análisis experimentales de tensión, se utilizó el espécimen de la Figura 4.1, considerando diferentes longitudes de grietas de 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9 pulgadas; esto con el fin de obtener las curvas carga-desplazamiento para cada una de las longitudes de grieta mencionadas las cuales fueron el punto de partida para determinar las condiciones de carga en los análisis de fatiga mostrados en la sección 4.3.

Se utilizó una Máquina Universal de Ensayos Dinámicos tipo hidráulico MTS, con una capacidad de 5 toneladas, esta se encuentra controlada por una computadora personal que puede operar con características mínimas de 8 Mb En RAM, un disco duro de 500 Mb y una velocidad de 66 Mb, El sistema hidráulico consiste en una bomba de 10 HP que trabaja a 2500 PSI la cual funciona independientemente de la computadora.

La Figura 4.3 muestra un espécimen de Aluminio 6061-T651 fracturado bajo una carga de tensión cuasiestática donde se aprecia una gran deformación plástica en la punta de la grieta característica de una fractura elastoplástica. Mientras que de la Figura 4.4 a la Figura 4.8 se presentan las curvas carga-desplazamiento para las longitudes de grieta de 0.5 a 0.9 pulgadas, En estas se aprecia la existencia de una gran zona plástica y que al momento de la propagación inestable de la grieta esta cae de manera paulatina.



Figura 4.3 Muestra de especímenes ensayados a tensión.

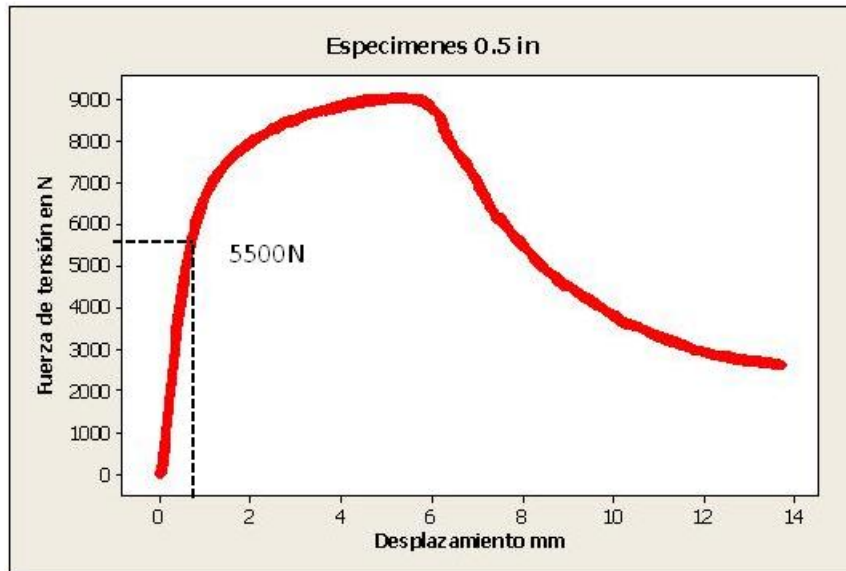


Figura 4.4 Ensayos de tensión en especímenes con fisura inicial de 0.5 pulgadas.

Es importante mencionar que para una grieta de 0.5 pulgadas, el límite elástico se presenta a una carga de 5500 N (Figura 4.4); para una grieta de 0.6 pulgadas fue de 4500 N (Figura 4.5); para una grieta de 0.7 pulgadas se presentó en 3500 N (Figura 4.6); para una grieta de 0.8 pulgadas de 3000 N (Figura 4.7) y para una grieta de 0.9 pulgadas el límite elástico se presenta con una carga de 2200 N (Figura 4.8).

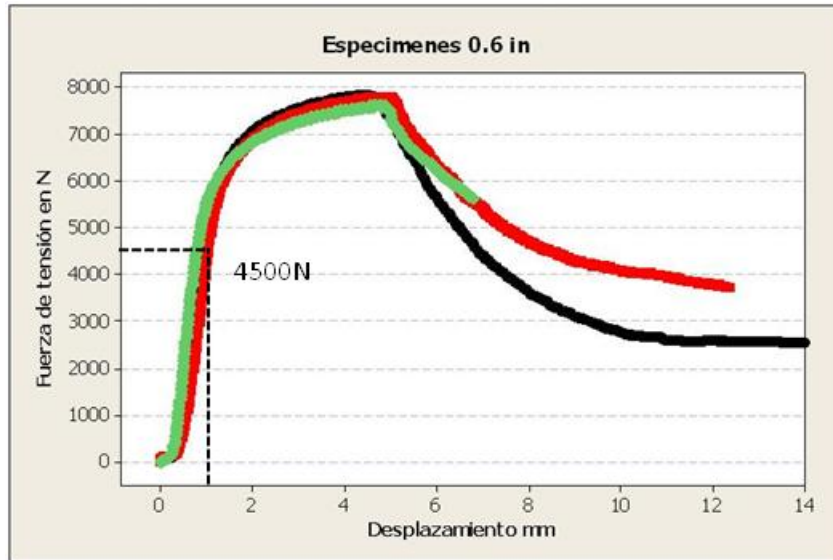


Figura 4.5 Ensayos de tensión en espécimes con fisura inicial de 0.6 pulgadas.

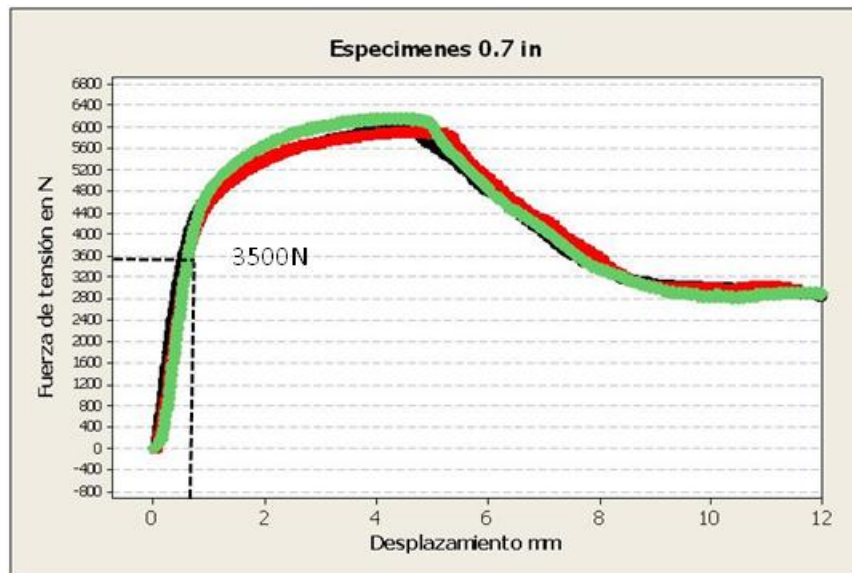


Figura 4.6 Ensayos de tensión en espécimes con fisura inicial de 0.7 pulgadas.

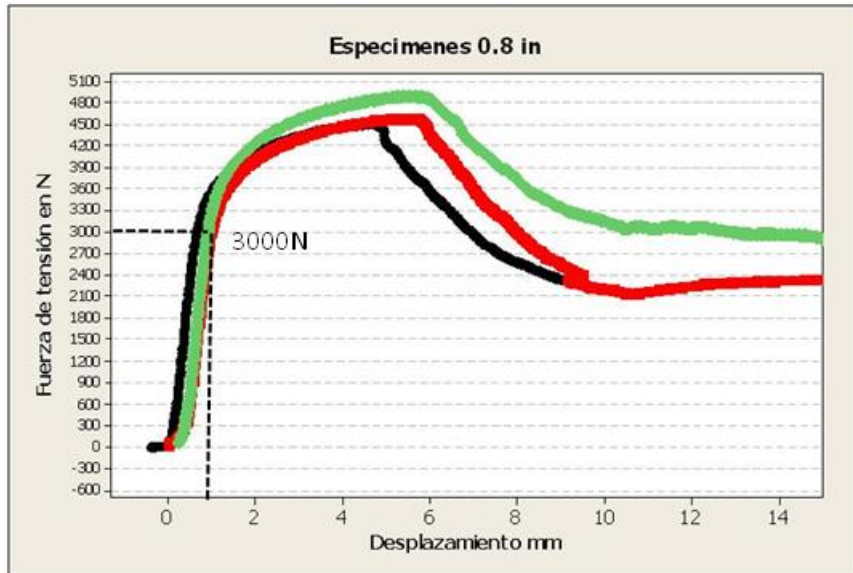


Figura 4.7 Ensayos de tensión en especímenes con fisura inicial de 0.8 pulgadas.

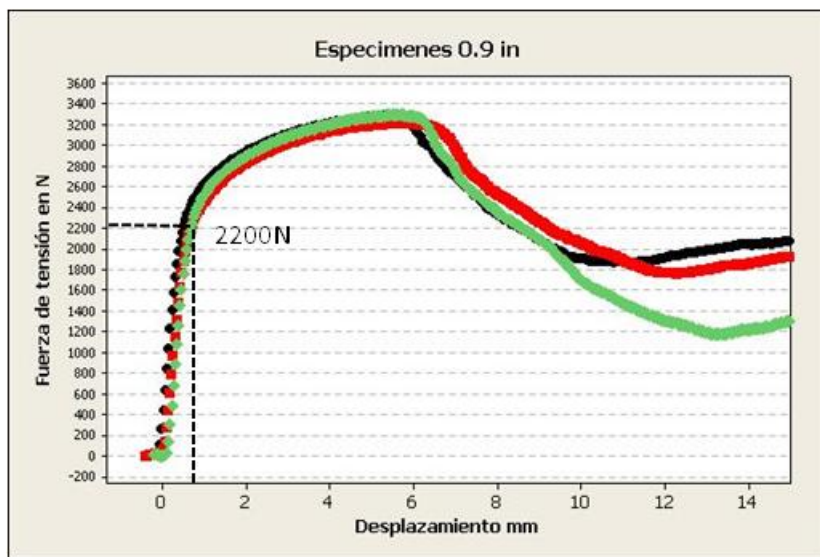


Figura 4.8 Ensayos de tensión en especímenes con fisura inicial de 0.9 pulgadas.

Además, en las graficas se observa un punto de inflexión en cada una de ellas en donde inicia la propagación de la grieta, estos puntos se han extraído y los resultados se muestran en la Tabla 4.1, en ella se observan las cargas críticas obtenidas de manera experimental, la primera columna muestra la longitud de grieta inicial en los especímenes ensayados mientras que las columnas restantes se dan los valores de carga crítica requerida para el inicio de la propagación de la grieta en newtons y libras fuerza respectivamente.

Tabla 4.1 Fuerza en la que se inicia la propagación de la grieta

Longitud de fisura	N	lbf
0.5	6000	1349
0.6	5000	1124
0.7	4000	899
0.8	3300	742
0.9	2400	540

La Figura 4.9 compara los resultados experimentales obtenidos con los que arrojan los análisis numéricos y analíticos ya descritos en el capítulo anterior, se observa que dichos resultados son congruentes. Es importante mencionar que solo muestra los resultados experimentales para las longitudes de grieta inicial de 0.5 a 0.8 pulgadas debido a que los especímenes fabricados en longitudes menores a 0.5 pulgadas fallaron en los orificios de montaje., en los casos en que la longitud de grieta inicial fue mayor a 0.8 pulgadas, la tenacidad a la fractura fue rebasada por lo que se presentaron grietas inestables.

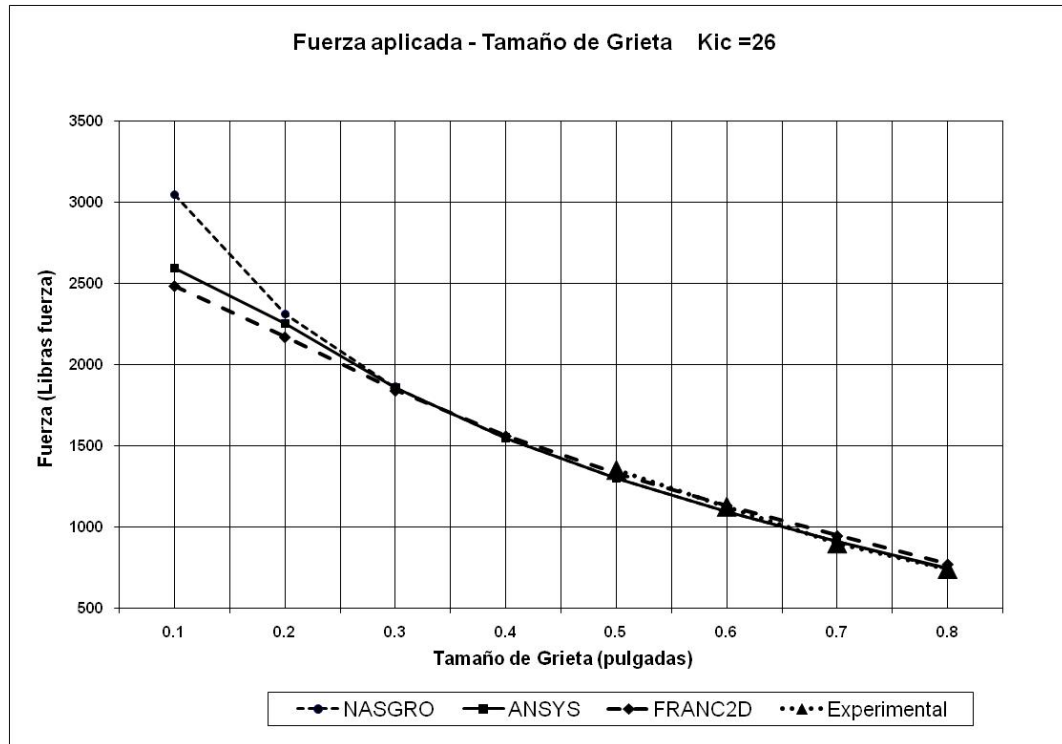


Figura 4.9 Comparación de resultados analíticos, numéricos y experimentales

4.3. Análisis Experimental de Fatiga.

Para llevar a cabo los experimentos de fatiga, fue necesario elaborar grupos de especímenes como los mostrados en la Figura 4.2, considerando diferentes longitudes de grietas. Esto con la finalidad de exponerlos al fluido geotérmico y poder evaluar el nivel de abrasión y corrosión que afecta al Aluminio 6061-T651.



Figura 4.10 Trampa de condensados

En la Figura 4.10 se tiene una trampa de condensados de la red de tubería de conducción de vapor de la Geotérmica Cerro Prieto, desviando el condensado para llegar hasta la vasija contenedora donde se encuentran alojados los grupos de especímenes de Aluminio 6061-T651, como se muestra en la Figura 4.11. Una vez alojados el grupo de especímenes, se dejaron expuestos al flujo geotérmico por un periodo de 30 días, para posteriormente retirarlos y llevarlos al laboratorio donde fueron limpiados de las impurezas adheridas a la superficie por medio de un baño de sosa cáustica.

Posteriormente, los ensayos de fatiga se realizaron bajo condiciones ambientales en el laboratorio antes y después de ser expuestos a la solución de salmuera geotérmica, en la Tabla 4.2 se presentan las condiciones de la prueba de fatiga. Para las longitudes de grieta de 0.5 a 0.8 pulgadas y en la Figura 4.12 se muestran sus características.



Figura 4.11 Especímenes en vasija de prueba

Tabla 4.2 Especímenes sujetos a ensayos de fatiga.

Longitud Inicial de grieta (plg.)	Precarga	Máximo	Medio	Frecuencia
0.5	100N	6100	5100	10 Hz
0.6	100N	3000	1600	10 Hz
0.7	100N	3000	1600	10 Hz
0.8	100N	2300	1200	10 Hz

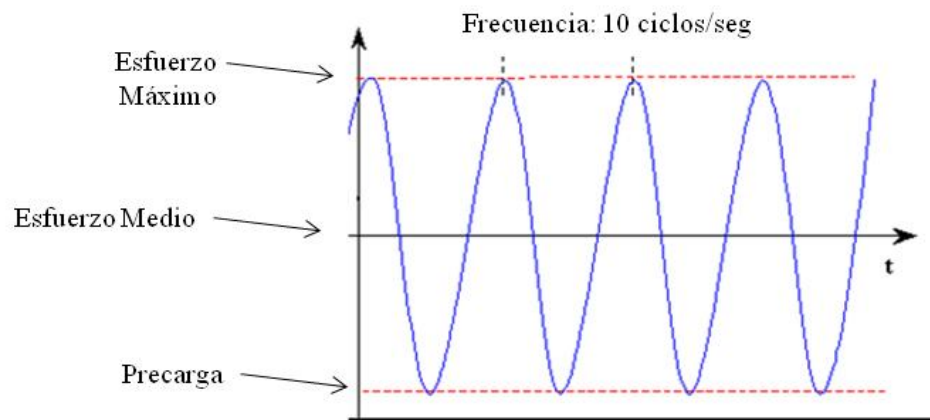


Figura 4.12 Características de la carga cíclica aplicada en los ensayos de fatiga

Para el análisis experimental de fatiga se llevaron a cabo dos grupos de experimentos, en el primero, se realizaron pruebas de fatiga en especímenes que no fueron expuestos al fluido geotérmico con el fin de obtener la vida de fatiga del material cuando este no ha sido dañado, en la Tabla 4.3 se muestran los ciclos obtenidos del análisis experimental de fatiga al inicio de la propagación de la grieta y al momento de la falla del material para longitudes de grieta de 0.5 a 0.8 pulgadas.

Tabla 4.3 Condiciones de fatiga del material virgen

Long. de grieta (plg.)	0.5	0.6	0.7	0.8
Pre-carga (N)	100	100	100	100
Máxima (N)	6100	3000	3000	2300
Media (N)	3100	1600	1600	1200
Frecuencia (Hz)	10	10	10	10
Inicio de Propagación (ciclos)	993	10928	4384	4270
Propagación inestable (ciclos)	1458	11728	4826	5053

El segundo grupo de experimentos fue realizado con los especímenes que fueron expuestos al flujo geotérmico por un periodo de treinta días. Se consideraron las mismas condiciones de carga y las mismas longitudes de grietas que en el primer grupo.

En la Tabla 4.4 se muestran las condiciones de carga y los ciclos obtenidos en los especímenes que fueron dañados al estar expuestos al flujo geotérmico, en esta se aprecia que los ciclos soportados para cada longitud de grieta fueron menores que los ciclos soportados por el material no dañado.

Tabla 4.4 Condiciones de fatiga del material expuesto

Long. de grieta (plg.)	0.5	0.6	0.7	0.8
Pre-carga (N)	100	100	100	100
Máxima (N)	6100	3000	3000	2300
Media (N)	3100	1600	1600	1200
Frecuencia (Hz)	10	10	10	10
Inicio de Propagación (ciclos)	767	6971	3822	3959
Propagación inestable (ciclos)	858	7654	4081	4593

En la Tabla 4.5 se presenta el porcentaje de vida que disminuyeron los especímenes expuestos en comparación con los especímenes no dañados hasta la falla del material.

Tabla 4.5 Porcentaje de vida reducido del material expuesto

Longitud de grieta (pulgadas)	Cantidad de ciclos		% de vida reducido
	Material no dañado	Material dañado	
0.5	1458	858	31.95
0.6	11728	7654	35.49
0.7	4826	4081	14.12
0.8	5053	4593	8.19

Es importante mencionar que a medida que crece la longitud de la grieta, el porcentaje de vida reducido es menor, debido a que predominan las condiciones globales (carga, geometría, longitud de grieta) sobre el nivel de corrosión y abrasión de la superficie del material.

4.4. Cálculo de la deformación plástica.

Se obtuvieron las curvas carga-desplazamiento para cada longitud de grieta de 0.5 a 0.8 pulgadas, para calcular J en condiciones elásticas y plásticas considerando la metodología recomendada por ASTM en el estándar E1820.

En la Tabla 4.6 se presentan los resultados de J arrojados por los análisis numéricos y experimentales en el rango elástico al momento de presentarse la tenacidad de la fractura del material de $26 \text{ Ksi}\sqrt{\text{in}}$ bajo los niveles de carga reportados en la Tabla 4.1. Como era de esperarse, los valores de J son muy parecidos debido a que son valores registrados antes de la propagación de la grieta (rango elástico).

En la Tabla 4.7 se muestran los valores obtenidos, donde J representa las deformaciones plásticas registradas en los análisis experimentales, y se puede ver que a medida que la grieta crece el valor de J disminuye, debido a que se va reduciendo el área bajo la curva y por consiguiente la energía necesaria para su propagación inestable.

Tabla 4.6 Resultados numéricos y experimentales de J

	Numérico	Experimental
Longitud de la grieta Pulgadas	Integral J (libras-pulgada)	Integral J (libras-pulgada)
0.5	0.0675	0.060238
0.6	0.0677	0.060240
0.7	0.0673	0.060238
0.8	0.0669	0.060238

Tabla 4.7 Valores de J en deformación elastoplástica

Grietas (Pulgadas)	" J " (Lb-in)
0.5	2140.54
0.6	1305.67
0.7	1166.65
0.8	956.72

En la Figura 4.13 se muestran las curvas carga-desplazamiento para especímenes de 0.5 y 0.8 pulgadas donde se aprecian la diferencia en las áreas bajo la curva, por medio de las cuales se calcula el valor de J .

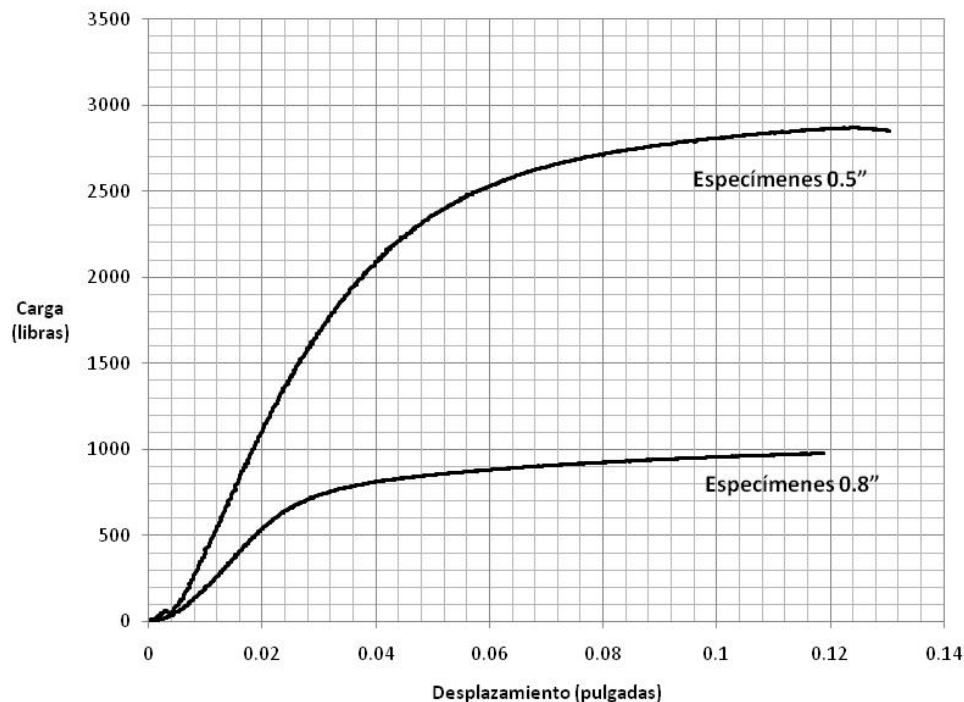


Figura 4.13 Curvas carga-desplazamiento para en especímenes 0.5 y 0.8 pulgadas

4.5. Efectos del fluido en la dureza del material.

La Tabla 4.8 muestra la dureza del material antes y después de ser expuesto al fluido geotérmico por un periodo de 30 días y se observa un endurecimiento promedio del 33.9%, mientras que en la Figura 4.14 se tiene un espécimen del material expuesto con múltiples devastaciones y picaduras superficiales generadas por la solución alcalina esto se puede ver a detalle en la Figura 4.15, estos daños provocan una disminución en la vida de fatiga del material como lo arrojan los resultados experimentales.

Tabla 4.8 Dureza del aluminio antes y después de ser expuesto al medio corrosivo

DUREZA ROCKWELL B	
Sin Exposición	Expuesto
30	56
44	67
39	64
42	64
24	41
26	62
31	40
41	42
39	53



Figura 4.14 Espécimen atacado por la salmuera geotérmica



Figura 4.15 Detalle de un espécimen atacado

Conclusiones

- Los resultados demuestran que el aluminio 6061-T651 se endurece al estar expuesto al medio corrosivo y sufre una devastación superficial.
- Los análisis numéricos y experimentales coinciden con la carga máximas para que se presente la tenacidad de fractura del material de $26 \text{ Ksi. in}^{1/2}$, en las longitudes de grieta de 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8 plg.
- Con los análisis numéricos se puede predecir el comportamiento de la fractura en especímenes expuestos a medios corrosivos.
- En los casos donde la longitud de la grieta es menor de 0.6 plg, la vida de fatiga del material expuesto disminuye alrededor de un 30%, mientras que en longitudes de 0.7 y 0.8 plg, la vida de fatiga del material bajó alrededor de 12% cuando es expuesto al medio corrosivo, esto consecuencia de los daños superficiales generados por la solución alcalina los cuales provocan la disminución en la vida de fatiga del material como lo arrojan los resultados experimentales.
- Los valores presentados de J y G por los análisis numéricos y experimentales en el rango elástico son congruentes.
- La energía absorbida por los materiales elastoplástica para la propagación de la fractura es mayor que en los materiales frágiles.

Trabajo futuro.

Se plantea como trabajo futuro lo siguiente:

- Cambiar el tipo de material a frágil.
- Evaluar fatiga térmica.
- Obtener la caracterización de los materiales.
- Realizar análisis de fatiga considerando las condiciones en fluido geotérmico.

REFERENCIAS

- [1] Ávila Aldapa, Rosa Mayra. Los Pueblos Mesoamericanos. Mexico, DF : Instituto Politecnico Nacional, (2002).
- [2] Lund, Jay R. and Byrne, Joseph P. Leonardo Da Vinci's Tensile Strength Test: Implications for the Discovery of Engineering Mechanics. Davis, CA : Department of Civil and Environmental Engineerin, University of California, (2000).
- [3] Galilei, Galileo. Dialogues Concerning Two New Sciences. New York : The Macmillan Company, (1914).
- [4] Todhunter, Isaac. A history of the Theory of Elasticity and of the Strenght of Materials. Londres : Cambridge University Press, (1886).
- [5] Mariotte. Traité du mouvement des eaux. s.l. : Mariottes Collected Works. second ed. The Hague, The Netherlands , (1686).
- [6] Rice, James R. Mechanics. Londres : Enciclopedia Britanica Volumen 23, (1992).
- [7] Leibniz, G. W. Demonstrationes novae de Resistentia solidorum. s.l. : Acta Eruditorum Lipsia, (1684).
- [8] Bernoulli, James. "Veritable Hypothese de la resistance des Solides, avec la demonstration de la Courbure des Corps qui font ressort. Geneva, Italia : s.n., (1705).
- [9] Euler, Leonhard. Sur la force des Colonnes. s.l. : Memories de l'Academie de Berlin Tom XIII, (1757).
- [10] Young, Thomas. A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts. London, Eng. : s.n., (1807).
- [11] Coulomb, Charles August. Recherchers Theoriques et Experimentales sur la force de torsion. Histirie de l'Academie, Paris Fracia : s.n., (1784).
- [12] Cauchy, A. L. Recherches sur l'équilibre et le mouvement interieur des corps solids ou fluids, élastique ou non élastique. s.l. : Bulletin de la sociétée de Philomatique January. Paris, Francia, (1823).
- [13] Rice, James R. Mechanic of Solids. s.l. : Publicado como una sección del artículo Mechanics en la Enciclopedia Británica décimo quinta edición., (1992).

- [14] Love, HA. E. A treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. s.l. : Segunda edicion, University Press, Cambridge., (1906).
- [15] Kirkaldy, D. An Experimental Inquiry in to Relative Properties of Wrought-iron Manufactured at Essen, Rhenish Prussia, and Yorkshire, England. London : Testing and Experimenting Works, 99 Southwark Street., (1876).
- [16] —. An Experimental onto the Mechanical Properties of Steel, of Different Degrees of Hardness, and Under Various Conditions. London : Testing and Experimenting Works, 99 Southwark Street, London, (1873).
- [17] Kirsh, G. Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. s.l. : V.D.I. 42, (1898).
- [18] Kolosov, Yuri Vasilievich. On an application of complex function theory to a plane problem of the mathematical theory of elasticity. s.l. : Doctoral dissertation, Dorpat, Yuriev.3, (1909).
- [19] Inglis, Charles. Stress in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. s.l. : Proc Int Naval Architects 60, (1913).
- [20] Griffith, Alan Arnold. The Theory of Rupture. s.l. : Biezeno CB, Burgers JM, editors. Proc First Int Congr Appl Mech. Delft: Technische, (1924).
- [21] Roylance, D. Introduction to Fracture Mechanics. Massachusetts : Department of Materials Science and Engineering. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, (2001).
- [22] Irwin, George R. Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate. s.l. : ASME Trans J Appl Mech 24., (1957).
- [23] Orowan, E. Notch brittleness and strength of solids. s.l. : Trans, Inst Eng Shipbuilders Scotland , (1945).
- [24] Barsom, J. M. and Rolfe, S. T. Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics. West Conshohocken, PA. : American Society of Testing Materials , (1999).
- [25] Irwin, George R. Fracture dynamics. Fracturing of metals. Cleveland, OH : American Society of Metals, (1948).
- [26] Ceriolo, L. and Di Tommaso, A. Fracture Mechanics of Brittle Materials: a Historical Point of View. Venecia, Italia : Venice University Institute of Architecture, Dpt. of Architectural Construction, (1998).

- [27] Irwin, George R., Kies, J. A. and Smith, H. L. Fracture strengths relative to onset and arrest of crack propagation. Philadelphia, PA : ASTM Transactions, Vol. 58, American Society for Testing and Materials, (1958).
- [28] Raducanu, R. Over the Evolution of Fundamental Ideas of Fracture Mechanics. Rumania : publicado en Applied Science vol. 7, Balkan Society of Geometers, (2005).
- [29] Rivlin, R. S. and Thomas, A. G. Rupture or rubber. I. Characteristic energy for tearing. s.l. : Journal of Polym Sci Vol. 10, (1953).
- [30] Cotterell, B. The past, Present and Future of Fracture Mechanics. s.l. : Artículo publicado en la revista Engineering Fracture Mechanics, (2002).
- [31] Mc Evily, A. J. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention. s.l. : Department of Metallurgy and Materials Engineering, the University of Connecticut, Publicación de Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc., (2002).
- [32] Withey, P. A. Fatigue Failure of the Havilland Comet I. s.l. : Artículo publicado en la revista Engineering Failure Analysis Vol. 4, (1997).
- [33] Balankin, A. Mecánica de la Fractura: Pasado, Presente y Futuro. s.l. : Artículo publicado en la revista Científica Instituto Politecnico Nacional, (2000).
- [34] Hearn, E. J. The Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials. s.l. : (3rd Edition) Mechanics of Materials, Volume 2, (1997).
- [35] Theocaris, P. S. and Gdoutos, E. E. A photoelastic Determination of KI Stress Intensity Factors. Inglaterra : Artículo publicado en Engineering Fracture Mechanics Vol 7, Pergamon press. , (1975).
- [36] Guagliano, M., Sangirardi, M. and Vergani, L. Photoelastic Methods to Determine KI, KII and KIII of Internal Cracks Subject to Mixed Mode loading. s.l. : Artículo publicado en International journal of fatigue afiliada a European Structural Integrity society, (2005).
- [37] Pacey, M. N., James, M. N. and Patterson, E. A. On the Use of Photoelasticity to Study Crack Growth Mechanism. Plymouth, Inglaterra : Departamento de Ingeniería mecánica y Marina, universidad de Plymouth, (2000).

- [38] Barenblatt, G. I. Equilibrium cracks Formed during Brittle Fracture rectilinear Cracks in Plane Plates. Moscu : PMM Vol 23, No 4, Moscu, (1959).
- [39] On Some General Concepts of the Mathematical Theory of Brittle Fracture. s.l. : PMM Vol 28, No 4, pag. 630-643 , (1964).
- [40] Willis, J. R. A Comparision of the fracture Critieria of Griffith and Barenblatt. s.l. : J. Mech. Phys. Solids, Vol 15. Pergamon Press Ltd Great Britain, (1967).
- [41] Dugdale, D. S. Yielding of steel sheets containing slits. s.l. : Journal of Mech. Phys. Solids 8, (1960).
- [42] Theocaris, P. S. and Gdoutos, E. Verification of the Vality of the Dugdale-barentblatt Model by the Method of Caustics. s.l. : Publicado en Engineering Fracture Mechanis vol. 6 pag. 523-535 (1974).
- [43] Paris, P. C., Tada, H. and Donald, J. K. Service Load Fatigue damage- a Historical Persective. s.l. : Publicado en International Journal of fatigue vol 21., (1999).
- [44] Wells, A. A. Welding and Fracture. s.l. : Publicado en Material Science and Engineering vol 4. Netherlands, (1969).
- [45] Rice, James R. A path-independent integral and approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. s.l. : ASME Journal of Applied mechanics 35 , (1968).
- [46] Chan, S. K., Tuba, I. S. and Wilson, W. K. On the finite Element Method in Linear fracture mechanics. s.l. : Publicado en Engineering Fracture Mechanis vol. 2 Pergamon Press Gran Bretaña., (1970).
- [47] Liebowitz, H. and Moyer, E. T. Finite Element Method in Fracture Mechanics. s.l. : Publicado en Computers and Structures vol. 31 pag. Pergamon Press Gran Bretaña, (1989).
- [48] Timbrell, C., Chandwani, R. and Cook, G. State of the Art in Crack Propagation. s.l. : Journee Scientifique , Les methodes de dimensionnement en fatigue, Zentech Internatonal Limited, (2004).
- [49] Newman, J. C. The Merging of Fatigue and Fracture Mechanics Concepts: A Historical Perspective. s.l. : Progress in aerospace Science Pergamon Press vol. 34 , (1998).
- [50] Gangloff, R. P. Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation- Second Edition. s.l. : ASTM International stck: MNL20-2nd (2005).

- [51] Griffith, Alan Arnold. The phenomenon of Rupture and flow in Solids. London : Phil Trans Royal Society, (1920).
- [52] Wilson, C. D. Linear Elastic Fracture Mechanics Primer. s.l. : Structures and Dynamics Laboratory, NASA Technical Memorandum 103591, (1992).
- [53] Farahmand, Bahram. Fracture Mechanics of Metals, Composites, Welds and Bolted Joints, application of LEFM, EPFM, and FMDM Theory. s.l. : Kluwer Academic Publishers Boston / Dordrecht / London, (2001).
- [54] NASA. Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software manual NASGROW. (2008).
- [55] ASTM. E1820- Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness Stress Analysis of cracks. s.l. : ASTM International, (2007).
- [56] Wells, A. A. Unstable Crack Propagation in Metals-Cleavage and Fast Fracture. s.l. : Cranfiel Crack Propagation Symposium, Vol 1, (1961).
- [57] Panontin, T. L., Makino, A. and Williams, J. F. Crack tip opening displacement estimation formulae for C(T). s.l. : Publicado en Engineering Fracture Mechanics vol. 67 Pergamon Press Gran Bretaña, (2001).
- [58] Erdogan, F. and Sih, C. G. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. s.l. : Journal of Basic Engineering Vol 85, (1963).
- [59] Wu, C. W. Maximum energy release rate criterion. s.l. : Journal of Elasticity Vol. 8, (1978).
- [60] Miranda, H. Análisis del Fenómeno Corrosión en Tuberías de Acero al Carbono Transportadoras de Fluido Geotérmico en Cerro Prieto, UABC Facultad de Ingeniería, Mexicali, B.C. Octubre (2008).