



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL  
UMBRAL DE CRECIMIENTO DE GRIETA ( $\Delta K_{TH}$ ) EN EL  
ALUMINIO A319”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**ADRIANA MOLINA FLORES**

**DIRIGIDA POR**

**DR. FRANCISCO CARRIÓN VIRAMONTES**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2007**

**BIBLIOTECA CENTRAL UAQ**

No. Adq. H 714/23

No. Título \_\_\_\_\_

Clas. TS

669.722

M 722c

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“ ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL  
UMBRAL DE CRECIMIENTO DE GRIETA ( $\Delta K_{TH}$ ) EN EL  
ALUMINIO A319 “**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALURGICO**

**PRESENTA**

**ADRIANA MOLINA FLORES**

**DIRIGIDA POR**

**Dr. FRANCISCO CARRION VIRAMONTES**

**SINODALES**

**QM. SALVADOR ALVARADO BALLEZA**  
DIRECTOR

---

**QM. RAFAEL MORALES RIVERA.**  
SINODAL

---

**QM. RAFAEL FRIAS RUIZ.**  
SINODAL

---

## INDICE GENERAL

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
ÍNDICE GENERAL	ii
ÍNDICE DE CUADROS	iV
ÍNDICE DE FIGURAS	Vi
RESUMEN	iX
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
II.1 APLICACIONES Y PROPIEDADES DEL ALUMINIO	3
II.1.1 Efecto de los aleantes en las fundiciones de aluminio	6
II.1.2 Propiedades mecánicas del aluminio	9
II.1.3 Aluminio A319	14
II.1.4 Fundición de aluminio A319 en molde permanente	15
II.1.5 Fundición de aluminio	16
II.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE LA FRACTURA	19
II.2.1 Definiciones	19
II.2.2 Criterio de Griffith	21
II.2.3 Factor de intensidad de esfuerzos $K_I$	23
II.2.4 Método de la complianza para determinar el factor de intensidad de esfuerzos	26
II.2.5 Propagación de grieta por fatiga	28
II.2.6 Esfuerzo plano y deformación plana	34
II.2.7 Umbral de crecimiento de grieta	35
III. HIPÓTESIS	36
IV. OBJETIVOS	37
IV.1 General	37
IV.2 Específicos	37
V. METODOLOGÍA	38

V.1 Materiales	38
V.2 Métodos	39
V.3 Diseño experimental	39
V.3.1 Ensayo de dureza Brinell.	39
V.3.2 Análisis de microestructura.	42
V.3.4 Ensayo para determinación de complianza	46
V.3.4.1 Diseño de probeta	39
V.3.4.2 Manufactura de probetas de flexión en tres puntos	49
V.3.4.3 Ensayo para la complianza.	51
V.3.5 Ensayo del umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$ ,	61
V.3.5.1 Cálculo de la constante C para el control en $\Delta K$ decreciente.	61
V.3.5.2 Ensayo del umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$ .	63
V.3.5.3 Teñido térmico.	65
VI. RESULTADOS	68
VI.1 Análisis químico	68
VI.2 Ensayo de dureza Brinell del Aluminio A319	68
VI.3 Microestructura del aluminio A319	69
VI.4 Ensayo de determinación de complianza.	71
VI.5 Determinación de la complianza (C )	72
VI.6 Corrección por curvatura	73
VI.7 Ensayo del umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$ .	74
VII. DISCUSIONES	38
VII.1 Análisis químico	78
VII.2 Dureza	78
VII.3 Microestructura.	79
VII.4 Complianza	80
VII.5 Umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$ .	80
VIII. CONCLUSIONES	81
IX. BIBLIOGRAFIA.	82

## INDICE DE CUADROS

Contenido	Página
1. Clasificación de las aleaciones de aluminio.	4
2. Nomenclatura de los tratamientos	5
3. Elementos aleantes principales del aluminio y sus propiedades.	7
4. Impurezas en aleaciones de aluminio.	8
5. Elementos para aleaciones especiales de aluminio.	8
6. Propiedades mecánicas de fundiciones en molde permanente.	13
7. Propiedades mecánicas del aluminio A319	15
8. Valores de los coeficientes m y C de la ecuación de Paris.	33
9. Condiciones del ensayo de dureza Brinell.	39
10. Condiciones de montaje de las probetas.	42
11. Condiciones de análisis de imagen en la cuantificación de precipitados	46
12. Dimensiones de probetas de tensión.	47
13. Condiciones de prueba.	47
14. Dimensiones de las probetas de mecánica de fractura con tres puntos de apoyo normalizadas.	48
15. Proceso de manufactura de probetas de flexión en tres puntos de apoyo	49
16. Dimensiones de la probeta de flexión en tres puntos de apoyo.	53
17. Hoja de cálculo.	54
18. Condiciones de prueba.	58
19. Datos adquiridos del ensayo de complianza.	59
20. Datos calculados.	60
21. Hoja de cálculo para determinar C.	63
22. Condiciones del ensayo del umbral del crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$	64
23. Adquisición de datos en el ensayo del umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$ .	68

24. Análisis químico del Aluminio A319.	
25. Dureza del Aluminio A319.	68
26. Precipitados en la aleación A319	70
27. Funciones complianza de cada una de las curvas.	71
28. Datos para la obtención de la constante C.	72
29. Longitudes de la grieta final de la probeta 1.	73
30. Determinación del % de error por curvatura.	73
31. Composición química del aluminio A319.	78
32. Propiedades del aluminio A319.	78

## INDICE DE FIGURAS

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
1. Clasificación de las aleaciones de aluminio.	8
2. Propagación de grieta por fatiga.	9
3. Curva de material dúctil.	11
4. Curva de material semidúctil	12
5. Diagrama de fases Al-Si	14
6. Aluminio fundido	17
7. Lingotes de Aluminio	17
8. Principales mecanismos de fractura de los metales.	19
9. Aspecto de la fractura	20
10. Probeta que es fracturada por fatiga.	20
11. Placa con una grieta central que es deformada elásticamente.	22
12. Modos de carga de una pieza agrietada.	24
13. En un punto cualquiera de la punta de la grieta hay un estado de esfuerzos.	25
14. Complianza.	27
15. Tensión – Tensión.	29
16. Propagación de grieta por fatiga.	31
17. Esfuerzo plano y deformación plana.	35
18. Durómetro duplex modelo 713 SRD	40
19. (A) Analizador de imágenes y (B) Microscopio electrónico de platina invertida	41
20. Huella del indentador de bola en la probeta.	41
21. (A) Probetas montadas en acrílico y (B) Montadora hidráulica modelo Jean Wirtz-Hydropress, serie 9.03849.	42
22. Lijadora Modelo Dup Serie 9.03849	43
23. Pulidora de mesa de disco doble Modelo Dup Serie 9.029948	44
24. Microestructura del aluminio A319 a 500X	45

25. Dibujo de la probeta de tensión.	46
26. Diseño de probeta de mecánica de fractura del tipo de tres puntos de apoyo	48
27. Taladro fresador.	50
28. Rectificadora Chevalier para rectificado de probetas	50
29. Medición de la entalla	51
30. Pie de rey sobre la mesa de mármol donde se hicieron las marcas a las probetas	52
31. Probeta marcada a cada 0.25mm.	52
32. Grafica de la función complianza	55
33. Máquina servohidráulica Instron.	56
34. Dispositivo montado en la máquina serbohidráulica Instron.	56
35. (A) Probeta montada en la máquina serbohidráulica Instron y (B) Estereomicroscopio enfocado a la probeta montada.	57
36. Equipo de control para la máquina Instron.	58
37. Crecimiento de la grieta durante el ensayo	59
38. Gráfica que muestra los coeficientes de la complianza experimental	61
39. Gráfica que muestra el decremento de K con el decremento de la carga contra la longitud de la grieta	62
40. Probeta que se ensayo para determinar el $\Delta K_{TH}$	65
41. Teñido térmico de las probetas que se ensayaron para determinar el $\Delta K_{TH}$	66
42. Longitud de grieta final	66
43. Medición de la longitud de grieta final	67
44. Microestructura del aluminio A319	69
45. Microestructura del aluminio A319	70
46. Curvas de los ensayos de complianza y la del articulo	71
47. Curva para la determinación de la constante C.	72
48. Crecimiento de grieta vs número de ciclos	74
49. Carga (N) vs Número de ciclos	75

50. Curva del primer ensayo del umbral de crecimiento de grieta A319	75
51. Crecimiento de la grieta vs número de ciclos	76
52. Carga (N) vs número de ciclo	77
53. Curva del segundo ensayo del umbral de crecimiento de grieta A319	77
54. Microestructura del aluminio A319.	79

## RESUMEN

El aluminio A319 es un material ampliamente utilizado en la industria automotriz para la fabricación de partes por fundición y en particular para la fabricación de monoblocks, elementos sujetos a esfuerzos mecánicos y/o térmicos cíclicos cuya durabilidad depende fundamentalmente de su resistencia a la fatiga. Entre las propiedades mecánicas del aluminio, la que mejor determina la resistencia a la fatiga es la tenacidad a la fractura. Y de forma especial el Término ( $\Delta K_{TH}$ ) se define como el valor del rango del factor de intensidad de esfuerzos ( $\Delta K$ ) por debajo del cual una grieta no crece por fatiga. Para la determinación de este umbral se utilizara la norma: ASTM-E 399-90 "Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials". En ella, se considera como  $\Delta K_{TH}$  cuando la velocidad de crecimiento de grieta ha llegado a un valor de  $1 \times 10^{-10}$  m/ciclo. Determinar  $\Delta K_{TH}$  es importante porque nos establece un límite de esfuerzos para los cuales una grieta no crece por cargas cíclicas. El conocimiento de las propiedades de tenacidad es importante sí se utilizan nuevos materiales o cuando se busca reducir el peso, como se hace en la industria automotriz. Para la determinación del valor  $\Delta K_{TH}$  del aluminio A319, Se realizarán pruebas de tensión, dureza, análisis metalográfico y químicos, así como pruebas de mecánica de la fractura. En especial para determinar el  $\Delta K_{TH}$  se utilizará el método de la complianza.

## INTRODUCCIÓN

La industria automotriz es un sector estratégico para México, ya que la producción de automóviles se ubica entre las más importantes dentro del sector manufacturero por la demanda del mercado y el número de empleos que genera. Por consecuencia, la promoción de estudios de investigación y de desarrollo tecnológico es fundamental para mantener a esta industria con los niveles de productividad y competencia que actualmente requiere el mercado mundial. Estar preparado para los cambios que actualmente enfrenta la industria en aspectos ambientales, uso de nuevas tecnologías y materiales, y desarrollo de nuevos métodos y canales de venta, es esencial. Dentro de la compra de vehículos, el consumidor prefiere los autos armados en México o importados a través de las plantas armadoras instaladas en el país, por la facilidad de obtención de refacciones y de servicios en general. En cambio, para algunos vehículos de importación es difícil o casi imposible encontrar refacciones dentro del país, así que es necesario adquirirlas en el extranjero a costos muy altos.

Las innovaciones en la industria automotriz están enfocadas a tecnologías que permiten lograr materiales de bajo peso, resistentes al impacto, desgaste, abrasión y con durabilidad. Para conseguir lo anterior, se emplean materiales como el aluminio y sus aleaciones. El aluminio, llamado el metal del siglo XXI, es uno de los metales no ferrosos más importante, por ser elemento abundante en la corteza terrestre. Sus propiedades como el bajo peso específico y la combinación única de sus propiedades mecánicas, tales como su resistencia a la corrosión, su alta conductividad térmica, química y eléctrica, su superior conformabilidad, maquinabilidad, y su capacidad de reciclaje, así como su alta resistencia mecánica una vez que es aleado con otros metales, le permiten tener una gama de aplicaciones donde el único límite es la invención del hombre.

Entre los diversos usos que puede darse al aluminio en el campo automotriz están la elaboración de pistones, válvulas, cabezas de cilindros, engranes, monoblocks, elementos estructurales y en forma de placas o láminas para fabricar carrocerías,

remolques, etc. En otro tipo de industrias se emplea para la fabricación de artículos de cocina, perfiles para la construcción, electrodomésticos, entre otros.

Por sus propiedades, el uso del aluminio y sus aleaciones, es necesario estudiarlo para optimizar diseños y describir su comportamiento estructural presente y futuro. Para ello es necesario utilizar la mecánica de la fractura a fin de determinar parámetros tales como el factor de intensidad de esfuerzos ( $K_I$ ), el comportamiento de fatiga y el factor del umbral de crecimiento de grietas ( $\Delta K_{TH}$ ); con los cuales se puede predecir el comportamiento de un elemento estructural con base en condiciones de carga cíclica, tamaño de defectos o grietas y la geometría de la pieza. Pronosticar este comportamiento es importante para una mejor selección de material y para asegurar que cumpla con la función que se requiere, además de que permite hacer predicciones de vida útil, o establecer límites de esfuerzos cortantes, cargas de tensión o compresión.

Entre todos los tipos y aleaciones de aluminio, el A319 que es de nuestro interés tiene aplicaciones muy importantes, entre las que destacan la fabricación de monoblocks de motor y pistones. Debido al peso y las condiciones de fricción y temperaturas a las que se somete un monoblock, se requiere de un material como el aluminio A319 y determinar su umbral de crecimiento de grieta es un factor fundamental para predecir su comportamiento, determinar su capacidad para soportar las cargas de diseño, conocer su capacidad para cumplir con la vida media estimada, y determinar los criterios y procedimientos preventivos y de control de calidad, para evitar que ocurra una falla dentro de su vida útil.

## ANTECEDENTES

### II.1 APLICACIONES Y PROPIEDADES DEL ALUMINIO.

El Aluminio, de símbolo Al, elemento químico metálico, con número atómico 13, peso atómico 26,9815 perteneciente al grupo 3A del sistema periódico. Es uno de los metales mas abundantes en la naturaleza con un 7.5%. Nunca se encuentra en forma libre, por lo general se encuentra en vegetales en conjunto con otros minerales como el potasio, fósforo, etc. para su crecimiento y en rocas ígneas en forma de silicatos. Cuando estos minerales se disuelven es posible precipitar el aluminio en forma de arcilla, minerales, hidróxido de aluminio o en ambos, formando la bauxita, que es materia prima para la producción de aluminio. El aluminio puro es blando y tiene poca resistencia mecánica, pero puede alearse con otros elementos para aumentar su resistencia entre otras propiedades. En su ciclo vital, actualmente, el aluminio se encuentra en la etapa de madurez. Y su producción está estabilizada desde hace un par de décadas, debido a que es sustituido por nuevos materiales como polímeros o materiales compuestos, y en aplicaciones en las que hasta ahora se había utilizado el aluminio. Esto mismo ocurre pero en mayor proporción con los metales ferrosos donde su producción sí ha disminuido al ser sustituido por nuevos materiales o incluso por el Aluminio; es el caso de los automóviles o motocicletas (partes de chasis, monobloques, carrocería, entre otros).

Cuando se habla del aluminio se tienen en cuenta sus aleaciones y propiedades físicas y mecánicas (apartado II.1.2) siguientes:

- Bajo peso (densidad del Al  $2,70\text{g/cm}^3$  comparada con la del Fe  $7,90\text{ g/cm}^3$ ). (ASM, 1997).
- Resistencia a alta temperatura.
- Resistencia a la corrosión: debida a la película de alúmina.
- Reciclabilidad.

- Alta conductividad térmica y eléctrica; propiedades que hacen adecuado para la industria eléctrica.
- Baja temperatura de fusión (660°C), que unido a su elevada temperatura de ebullición hacen al aluminio idóneo para la fundición.
- Cristaliza en la red FCC (cúbica centrada en las caras) ò CCC (cúbica centrada en el cuerpo) sin sufrimiento de cambios alotrópicos, lo que le confiere una alta plasticidad.

Designación de aleaciones de Aluminio, Cuadro 1, y la nomenclatura de los tratamientos que recibe el aluminio, Cuadro 2.

Cuadro 1. Clasificación de las aleaciones de aluminio.

Aluminio puro (99%min)	1000
Aluminio - Cobre	2000
Aluminio - Manganeso	3000
Aluminio - Silicio	4000
Aluminio - Magnesio	5000
Aluminio - Magnesio y silicio	6000
Aluminio - Zinc	7000
Otros elementos	8000
Fuera de uso	9000

(ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America).

Cuadro 2. Nomenclatura de los tratamiento.

xxxx-H1	Endurecidos por deformación.
xxxx-H2	Endurecido por deformación y recocido parcial
xxxx-H3	Endurecido por deformación y estabilizado a baja temperatura de tratamiento térmico.
xxxx-H4	Tratados térmicamente.

(ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America).

En la Figura 1 se muestra una clasificación de las aleaciones de aluminio que se pueden encontrar.

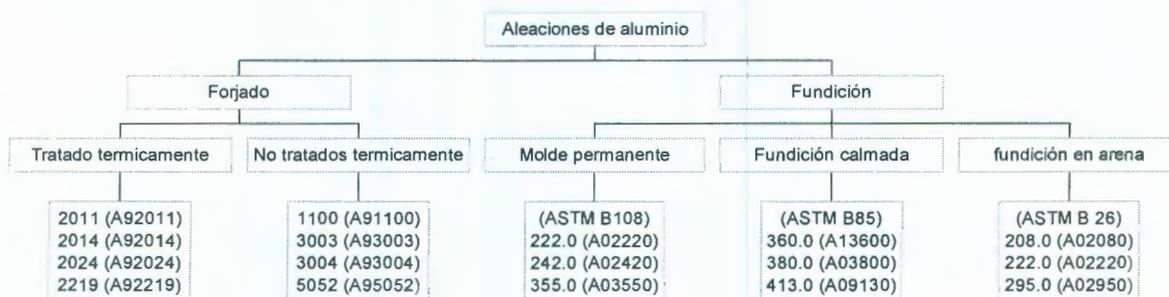


Figura 1. Clasificación de las aleaciones de aluminio, (ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America).

### II.1.1 Efectos de los aleantes en las fundiciones de Aluminio.

Clasificación de las fundiciones de aluminio, designado por Aluminum Association. (ASM, 1998).

- 1xx.x: Aluminio, 99.00%
- 2xx.x: Cobre
- 3xx.x: Silicio –cobre y/o magnesio
- 4xx.x: Silicio
- 5xx.x: Magnesio
- 7xx.x: Zinc
- 8xx.x: Titanio
- 9xx.x: Otros elementos

Las propiedades del aluminio dependen principalmente de los aleantes, con la excepción del aluminio de alta pureza (99.99% de pureza) donde el Fe y Si determinan sus propiedades mecánicas.

Cuadro 3. Elementos aleantes principales del aluminio y sus propiedades

ELEMENTOS ALEANTES	PROPIEDADES
Cu	De un 4 a 10% mejora la dureza y la resistencia, en la condición de fundición y con tratamientos térmicos.
Si	Su efecto en las aleaciones del aluminio es el de mejorar las características de la fundición como son: la fluidez, aumentar la resistencia a la tensión en caliente, aumenta la resistencia mecánica y a la corrosión, entre otros beneficios.
Mg	Es adicionado para dar resistencia a la aleación, al formar precipitados de Silicio-Magnesio ( $Mg_2Si$ ) en la matriz.
Mn	Reduce la solubilidad del Fe y Si en el aluminio, y altera la composición y morfología de los constituyentes de fase primaria del Al-Fe-Si. Muchas aleaciones contienen menos de 1% en peso.

(ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America).

Cuadro 4. Impurezas en aleaciones de aluminio.

ELEMENTOS ALEANTES	PROPIEDADES
Fe	Modifica la fase silicio por introducir varias fases Al-Fe-Si. Las más comunes, son las fases alfa y beta. Las aleaciones aluminio-silicio fabricadas por colada, típicamente tiene los niveles bajos de Fe para reducir la adhesión entre el molde y la fundición. Este elemento puede ser tolerado con niveles de 1.5 a 2 % en peso.
Cr	Mejora la resistencia a la corrosión en ciertas aleaciones de aluminio e incrementa la sensibilidad al temple con altas concentraciones

(ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America).

Cuadro 5. Elementos para aleaciones especiales de aluminio.

ELEMENTOS ALEANTES	PROPIEDADES
Ni	Se emplea generalmente con cobre para alcanzar temperaturas elevadas. Reduce el coeficiente de expansión térmico.
Sn	Cambia la morfología de los precipitados a mayor cantidad de Sn.
Cd	En concentraciones mayores a 0,1% mejora la maquinabilidad, su punto de volatilización es de 767 °C.

(ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America).

## II.1.2 Propiedades mecánicas del aluminio.

- Dureza: es la resistencia que opone un cuerpo al ser penetrado. En materiales de aluminio la dureza se mide en escala Brinell, los valores de la dureza Brinell se extienden desde  $HB = 15$  para aluminios purísimo blando hasta casi  $HB = 110$  para AlZnMgCu 1.5 endurecido térmicamente, (aleación 7075).
- Resistencia a la fatiga: depende de la composición, estado y procedimiento de obtención del material; hay que considerar la clase y frecuencia de trabajos de tracción, compresión, flexión y, especialmente, la configuración de los elementos constructivos como la distribución de fuerzas, tensiones máximas, superficie, etc. En la Figura 2 se ilustra una grafica en sus diferentes etapas de la propagación de una grieta por fatiga

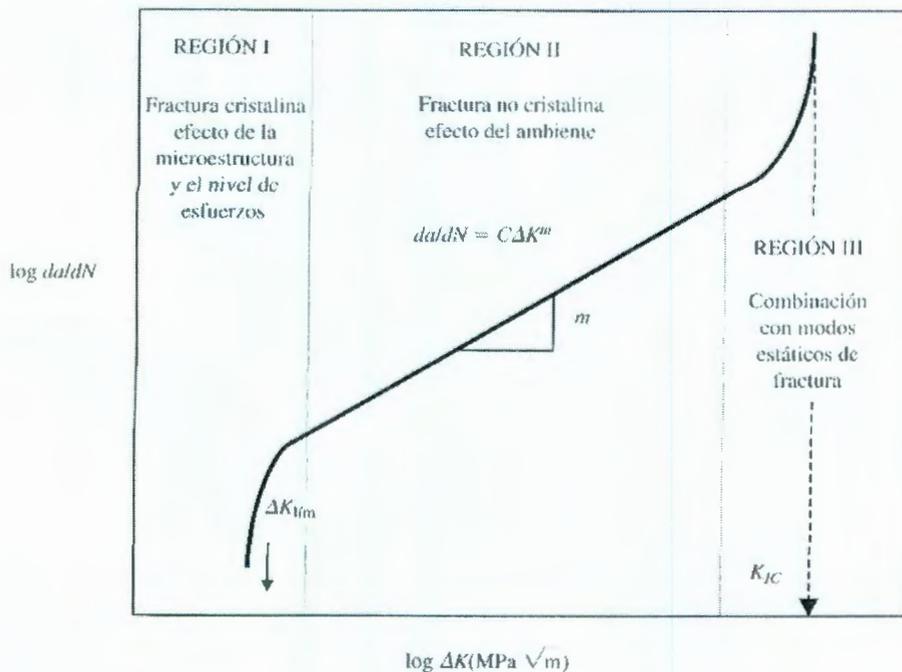


Figura 2. Propagación de grieta por fatiga,

(González, V. J. L. 2004. Mecánica de Fractura. 2da. ed., Editorial Limusa, México)

- Tenacidad: Es la capacidad para absorber energía hasta el punto de ruptura y se determina midiendo el área que queda bajo la curva de esfuerzo-deformación.
- El valor característico utilizado con más frecuencia es el de factor de intensidad de esfuerzos  $K_I$  definido para el estado de tensiones uniforme como la concentración de tensiones crítica en la punta de la grieta, que ocasiona la continuación del crecimiento de la misma. Los valores altos de  $K_I$  significan alta tenacidad, siendo favorables cuando son elevados los valores de resistencia a la tracción y el límite elástico. Desde el punto de vista cualitativo, el factor de intensidad de esfuerzos desciende al aumentar la resistencia.
- Esfuerzo de cedencia. Al menor valor del esfuerzo para el cual se produce una deformación permanente o deformación plástica.
- Esfuerzo último de tensión: es el mayor valor del esfuerzo en una curva esfuerzo vs deformación o al valor del esfuerzo para el punto de máxima carga en el ensayo (Figura 3).

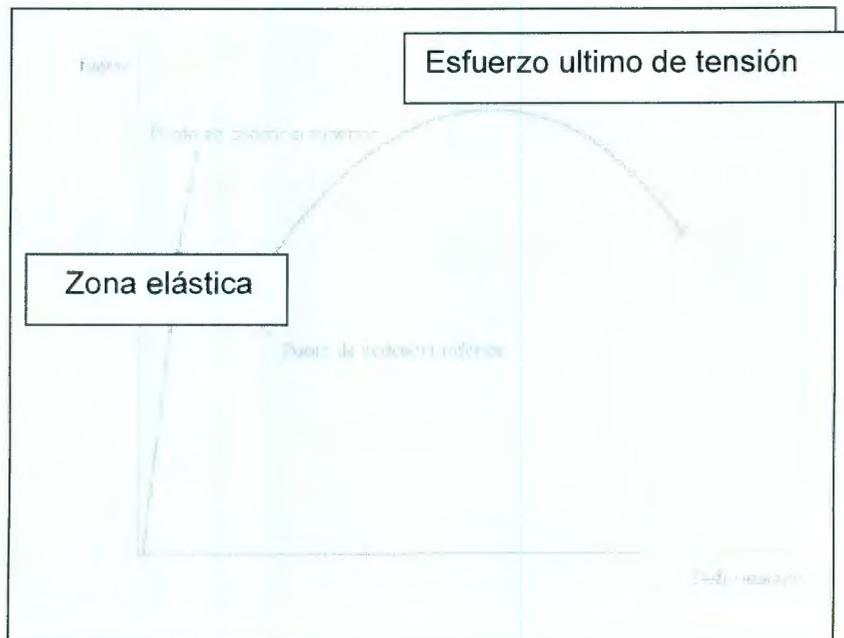


Figura 3. Curva de material dúctil, (González, V. J. L. 1998. Mecánica de Fractura, Bases y aplicaciones. 1º. Ed., Editorial Limusa, México).

Módulo de Young. Es una medida de la rigidez del material, entre mayor pendiente tenga la curva más rígido será el material.

Al dar inicio el esfuerzo de tensión se ilustra gráficamente en la Figura 3, primero existe la zona elástica, donde el esfuerzo aplicado y la deformación producida dada por la pendiente de la curva en esta zona (línea recta de la Figura 3) esta zona es denominada ley de Hooke o Módulo de elasticidad o de Young.

En la Figura 4 se ilustra un material semidúctil donde puede hacerse la comparación con la Figura 3, que es un material dúctil y se hace notar diferencias la inicio, durante y al final de la curva esfuerzo vs deformación.

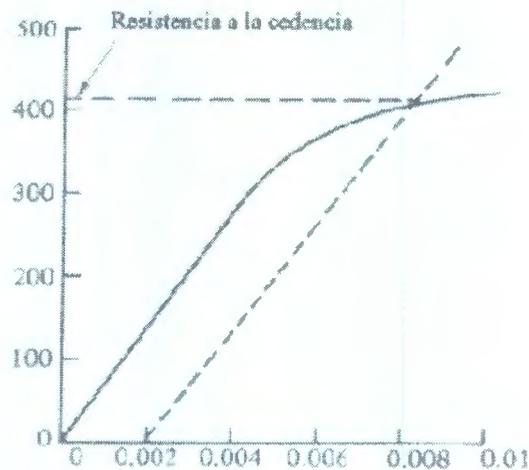


Figura 4. Curva de material semidúctil, (González, V. J. L. 1998. Mecánica de Fractura, Bases y aplicaciones. 1°. Ed., Editorial Limusa, México).

- Resistencia a la compresión y a la tensión: En los materiales de aluminio que son designados para la electricidad se admite un valor límite de compresión del 0,2% igual al valor del límite elástico de tensión, 0.02%. La resistencia a la compresión es importante principalmente en las piezas sometidas a este esfuerzo tales como cojinetes de fricción.
- La resistencia a la flexión en las aleaciones de aluminio se tiene en cuenta para las de fundición, en aquellos casos en que, al realizar el ensayo de tracción no es posible determinar el límite elástico con suficiente exactitud a causa de su pequeño valor.
- La resistencia al cizallamiento es importante para el cálculo de la fuerza necesaria para el corte. No existen valores normalizados. Generalmente está entre el 55 y 80 % de la resistencia a la tensión.

Cuadro 6. Propiedades mecánicas de fundiciones en molde permanente,

Elemento	Temperatura	Esfuerzo ultimo de tensión		0.2 % esfuerzo de tensión		Elongación 20mm (2in.), %
		MPa	ksi	MPa	ksi	
201.0	T43	414	60	255	37	17.0
	T6	448	65	379	55	8.0
	T7	469	68	414	60	5.0
204.0	T4	325 (248)	47 (36)	200 (193)	29 (28)	7 (5)
	T4	345 (275)	50 (40)	207 (165)	30 (24)	10 (6)
206.0	T4	385 (345)	56 (50)	262 (207)	38 (30)	12 (6)
	T6	430	62	265	38	17
	T71	415 (372)	60 (54)	345 (310)	50 (45)	5 (3)
	T7	436	63	347	50	11.7
213.0	F	207	30	165	24	1.5
222.0	T52	241	35	214	31	1.0
	T551	255	37	241	35	<0.5
	T65	331	48	248	36	<0.5
238.0	F	207	30	165	24	1.5
242.0	T571	276	40	234	34	1.0
	T61	324	47	290	42	0.5
249.0	T63	476	69	414	60	6.0
	T7	427	62	359	52	9.0
296.0	T4	255	37	131	19	9.0
	T6	276 (240)	40 (35)	179 (152)	26 (22)	5.0 (2)
	T7	270	39	138	20	4.5
308.0	F	193	28	110	16	2.0
319.0	F	185	27	125	18	2
	T5	207	30	180	26	2
	T6	248	36	165	24	2

(ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America).

### II.1.3 Aluminio A319.

Este es una aleación del tipo Al-Si, cuya composición química es:

3,0% a 4,0% Cu; 0,10% Mg max.; 0,50% Mn max.; 5,5% a 6,5% Si; 1,0% Fe max.  
1,0% Zn max.; 0,25% Ti max., 0,35% Ni max.; 0,50% de otros max.

En la Figura 5 se muestra el diagrama de fases del Aluminio y en el cual se ilustra la microestructura según el porcentaje de Si que tenga en el aluminio a analizar.

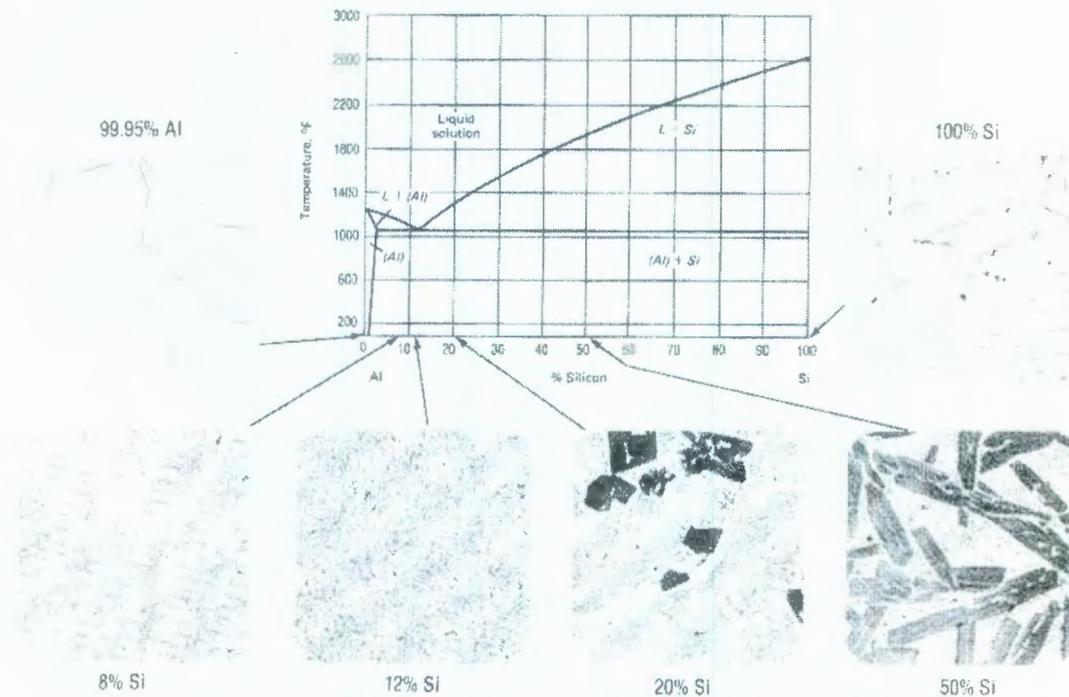


Figura 5. Diagrama de fases Al-Si, (ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America)

Cuadro 7. Propiedades mecánicas del aluminio A319,

CONCEPTO	CANTIDAD
Esfuerzo de tensión	235 MPa, 34ksi
Esfuerzo ultimo de tensión	130MPa, 19ksi
Elongación	2,5%
Dureza	85HB
Esfuerzo de fatiga	70 MPa, 10ksi
Esfuerzo ultimo de compresión	130 MPa, 19ksi

(ASM, 1998. Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America).

#### II.1. 4 Fundición del aluminio A319 en molde permanente.

Se vierte el metal fundido en un molde metálico permanente bajo gravedad y bajo presión centrífuga solamente. Las piezas fundidas así tienen una estructura de grano más fino, y son más resistentes que las piezas fundidas con moldes de arena, debido a que la velocidad de enfriamiento es más rápida. Además, las piezas fundidas en molde permanente poseen generalmente menores contracciones y porosidad que las piezas fundidas en arena. Sin embargo, los moldes permanentes tienen limitaciones de tamaño y para piezas complejas puede resultar difícil.

Cuanto más puro es el material, más fluido puede ser. El precio está condicionado, además, por los diferentes materiales aleados que contiene la chatarra. También

una parte del aluminio recuperado, en efecto, puede tener revestimientos, lacado, etc. (impurezas), con lo que su precio es más bajo y por los sofisticados sistemas de filtrado de humos que encarecen el reciclado. También hay que tener en cuenta que el aluminio está sujeto a la cotización de la Bolsa de Metales de Londres (BME) y del dólar.

En cualquier caso, gracias a que cotiza en Bolsa (BME), el aluminio se encuentra en el mercado abierto, y sus precios son los mismos en cualquier parte del mundo. Eso sí, la ley de la oferta y la demanda, como en cualquier otro sector, es la que dicta las pautas en cada momento.

→ Solidificación dendrítica, ejerce una influencia muy fuerte sobre las siguientes propiedades del aluminio:

1. La segregación de elementos aleables al aluminio.
2. La microestructura (tamaño de grano y fases presentes).
3. La solidez (porosidad en el metal).

#### II.1. 5 Fundición de aluminio.

El principio de fundición es simple: se funde el metal, se vacía en un molde y se deja enfriar (Figuras 6 y 7), existen todavía muchos factores y variables que se deben considerar para lograr una operación exitosa de fundición.



Figura 6. Aluminio fundido.

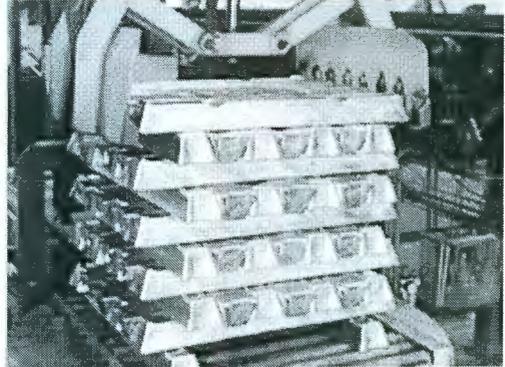


Figura 7. Lingotes de Aluminio.

(FEXA, 2004. [http://www.fexa.com.ar/el\\_aluminio\\_a.asp](http://www.fexa.com.ar/el_aluminio_a.asp)).

Las aleaciones de aluminio son fundidas principalmente mediante tres procesos: fundición en arena, molde permanente y fundición calmada. Nos enfocaremos a la fundición en molde permanente, considerando que el aluminio A319, objeto de nuestro estudio, es elaborado a través de este proceso.

→ Proceso de fundición: Primero se calienta el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido, después se vierte directamente en la cavidad del molde. En un molde abierto el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad abierta. En un molde cerrado existe una vía de paso llamada sistema de vaciado que permite el flujo del metal fundido desde afuera del molde hasta la cavidad, éste es el más importante en operaciones de fundición.

Cuando el material fundido en el molde empieza a enfriarse hasta la temperatura suficiente para el punto de congelación de un metal puro, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. Se requiere tiempo para completar este cambio de fase porque es necesario disipar una considerable cantidad de calor. El metal adopta la forma de cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y

características de la fundición. Al enfriarse la fundición se remueve del molde; para ello pueden necesitarse procesamientos posteriores dependiendo del método de fundición y del metal que se usa. Como ejemplo tenemos:

- El desbaste del metal excedente de la fundición.
- La limpieza de la superficie.
- Tratamiento térmico para mejorar sus propiedades.
- Pueden requerir maquinado para lograr tolerancias estrechas en ciertas partes de la pieza.

## II.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE LA FRACTURA

### II.2.1 Definiciones.

Fractura: “es la separación de un sólido bajo la acción de una carga externa, a través de un proceso de creación de nuevas superficies; las superficies de fracturas.”

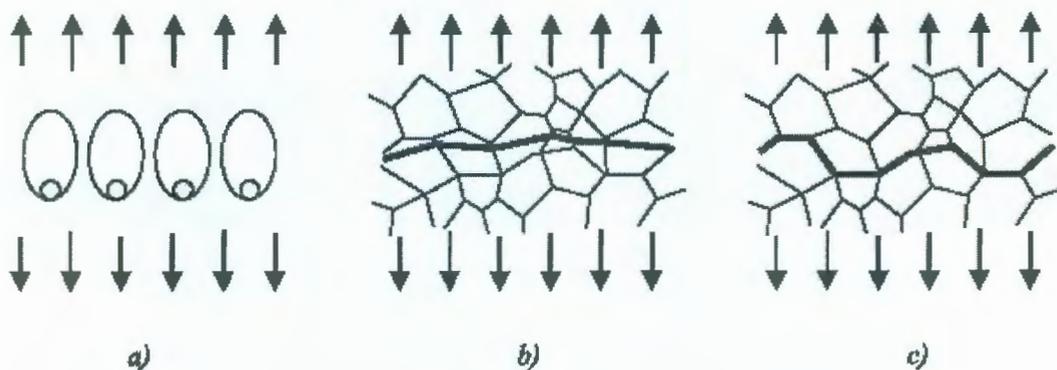


Figura 8. Principales mecanismos de fractura de los metales.

a) Fractura dúctil b) Clivaje c) Fractura intergranular.

(Kostes, D. 1994. Applied fracture mechanics. European Aluminium Association.Munchen).

Fractura frágil: “es la que ocurre cuando la deformación de la mayor parte del cuerpo es elástica, de manera que después de la fractura, los fragmentos de la pieza pueden volver a juntarse sin que haya cambios significativos en la geometría”

Fractura dúctil: “es la fractura que ocurre después de una apreciable deformación plástica del cuerpo, entendiéndose que los esfuerzos en una región relativamente grande de la pieza rebasaron el esfuerzo de cedencia o límite elástico” (González, 2004).



Figura 9. Aspecto de la fractura, (González, V. J. L. 1998. Mecánica de Fractura, Bases y aplicaciones. 1°. Ed., Editorial Limusa, México).

Las aleaciones dúctiles presentan fractura de copa o fractura parcial de copa.

Fractura por fatiga: “es un proceso de agrietamiento progresivo que culmina en la fractura de un material sujeto a cargas repetitivas o fluctuantes, cuyo valor máximo es menor a la resistencia tensil” Figura 10. (González, 2004).

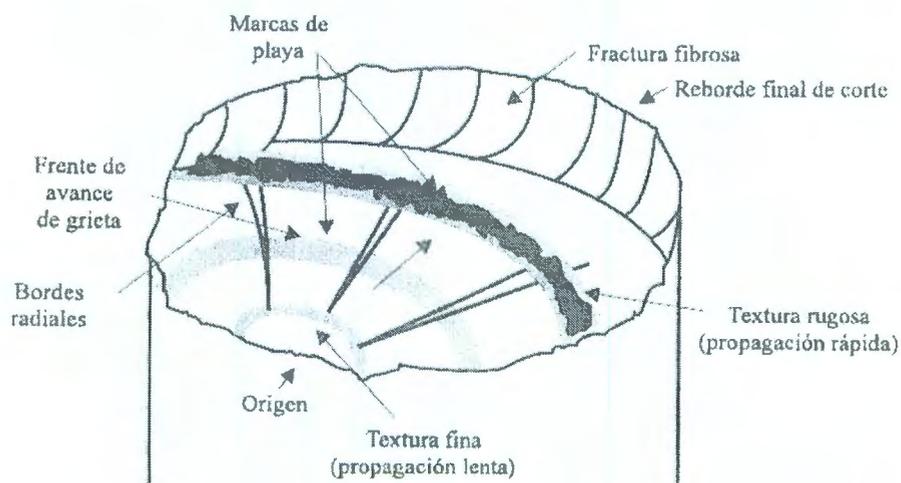


Figura 10. Probeta que es fracturada por fatiga, (González, V. J. L. 1998. Mecánica de Fractura, Bases y aplicaciones. 1<sup>ra</sup>. ed., Editorial Limusa, México).

### II.2.2 Criterio de Griffith

El inicio significativo para describir matemáticamente el fenómeno de la fractura fue hecho por Griffith, quien derivó una expresión para determinar el esfuerzo de fractura en materiales muy frágiles. Griffith partió del hecho de que un cuerpo deformado elásticamente almacena una energía potencial y propuso que esta energía almacenada es la fuerza impulsora del crecimiento de grieta, siempre y cuando la demanda de energía para la extensión de la grieta sea satisfactoria por la conversión de la energía elástica demandada.

Para una placa con una grieta central, que es deformada elásticamente como se muestra en la Figura 11. La energía potencial almacenada (U) es:

$$U = \frac{\pi\sigma^2\alpha^2}{E}$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo en la placa,  $\alpha$  el tamaño de la grieta y E el módulo de Young.

En un proceso de fractura completamente frágil (sin deformación plástica) la energía de fractura es la energía necesaria para crear dos superficies de fractura; una por cada cara de la grieta, de modo que la energía almacenada se convierte en energía de superficie ( $\gamma$ ); así el cambio de energía es:

$$\Delta U = U + 4\gamma_s\alpha$$

Al propagarse la grieta se requiere que la rapidez de conversión de energía almacenada al menos sea igual a la rapidez de creación de energía de superficie.

$$\frac{d\Delta U}{d\alpha} = 0$$

Al sustituir términos y resolver para el esfuerzo se obtiene la ecuación del esfuerzo de fractura de Griffith.

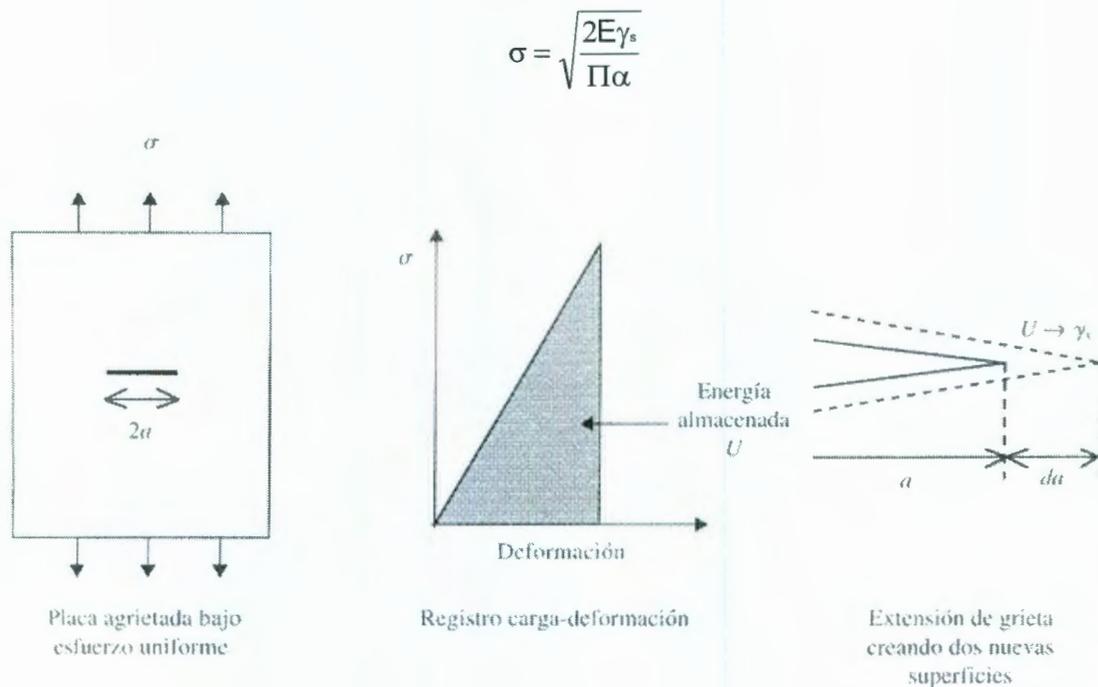


Figura 11. Placa con una grieta central, que es deformada elásticamente.  
 (González, V. J. L. 2004. Mecánica de Fractura. 2da. ed., Editorial Limusa, México).

Posteriormente Orowan e Irwin agregaron la componente de energía de deformación plástica, modificando la ecuación de Griffith al incluir el término  $\epsilon_p$  que representa la energía necesaria para deformar el material:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \epsilon_p)}{\Pi\alpha}}$$

Las aportaciones fundamentales de Griffith

1. La ecuación de Griffith provee una relación entre el esfuerzo de fractura y el tamaño de grieta, del tipo  $\sigma \propto \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}}\right)$ .

2. La fractura resulta de un proceso de conversión de energía, que no depende solamente del esfuerzo, sino también del tamaño de la grieta.

Esta última aportación sentó las bases de la mecánica de fractura moderna y por ello a Griffith se le llama “el padre de la mecánica de la fractura”.

### II.2.3 Factor de intensidad de esfuerzos $K_I$

La mecánica de la fractura es una teoría que se desarrolla bajo diferentes condiciones para hacer el análisis cuantitativo de cómo se va propagando una grieta, que a su vez introduce al campo de los esfuerzos que hay en la grieta y la energía que absorbe antes de fracturarse, además de que está aplicado en la zona elástico lineal; de aquí que existan tres modos de carga (Figura 8) y el caso general es la aplicación de los tres al mismo tiempo. El modo I es la abertura tensil, es la abertura de la grieta en la dirección perpendicular al plano de la fractura. El modo II es el corte deslizante, se refiere al desplazamiento de las superficies en sentidos opuestos, y en direcciones de avances de la grieta y el modo III es un corte tangencial, es el desplazamiento fuera del plano en dirección perpendicular a la dirección de avance.

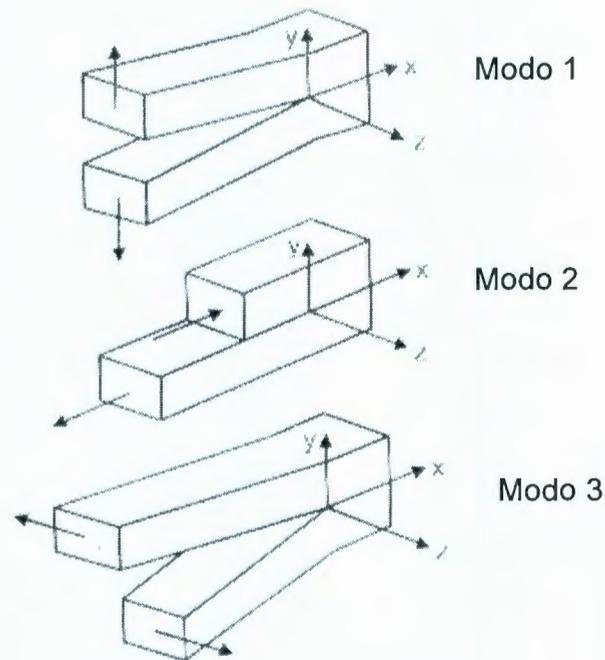


Figura 12. Modos de carga de una pieza agrietada, (Kostes, D. 1994. Applied fracture mechanics. European Aluminium Association, Munchen).

Hablando de los esfuerzos en la grieta del modo I podemos decir, que en una placa de espesor y esfuerzo de tensión en un punto cualquiera de la punta de la grieta hay un estado de esfuerzos  $\sigma$  como se muestra en la Figura 13. Si la placa es muy delgada el esfuerzo en la dirección z es cero. Entonces siendo los planos xy los esfuerzos mayores a cero se dice que tiene la condición de esfuerzo plano. En caso contrario, si la placa es muy gruesa, por el espesor del material, tiene contracción en la dirección z y se genera un estado de deformación plana. Las componentes del esfuerzo plano en un punto son:  $\sigma_x, \sigma_y$  y  $\tau_{xy}$ .

Las ecuaciones que describen los esfuerzos principales en la zona de la punta de la grieta para una placa delgada de dimensiones infinitas deformada elásticamente fueron establecidas por Irwin y Williams.

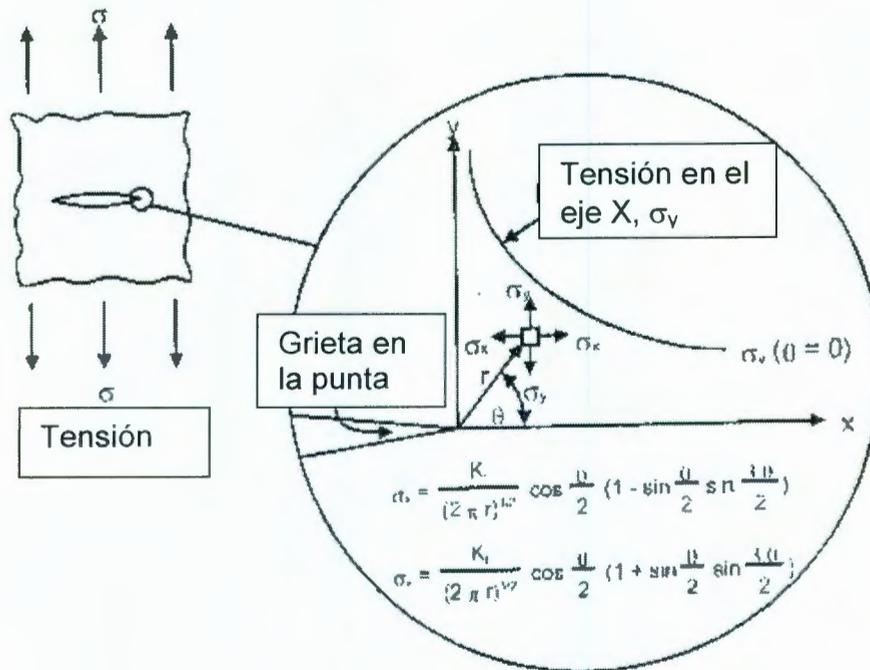


Figura 13. En un punto cualquiera de la punta de la grieta hay un estado de esfuerzos, (Kostes, D. 1994. Applied fracture machanics. European Aluminium Association, Munchen.

Para una grieta de cualquier longitud, los esfuerzos en la punta de la grieta se representan por  $K_I$  y se define como factor de intensidad de esfuerzos.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$K_I = (\text{esfuerzo}) \sqrt{(\text{distancia})}$$

$$K_I = (\text{MPa}) \sqrt{\text{m}}$$

Las expresiones para el factor de intensidad de esfuerzos, en particular para cuerpos de dimensiones finitas con geometrías complicadas. Los cuerpos no presentan esfuerzos uniformes en su sección transversal, forma que es expresada en función de la carga (P) en lugar de esfuerzo.

$$K_I = P g(B; W) f\left(\frac{a}{W}\right)$$

II.2.4 Método de la complianza para determinar el factor de intensidad de esfuerzos.

La complianza se define como el inverso de la rigidez; esto es, la complianza se incrementa cuando la rigidez disminuye. Es la habilidad de un material de deformarse elásticamente bajo carga, es decir, cuando se deforma el material cuando una carga se aplica.

En estudios de crecimiento de grietas por fatiga, la complianza del espécimen se incrementa cuando la grieta crece (Figura 10), porque la grieta reduce la rigidez en el espécimen.

La complianza (C) es el inverso de la pendiente de la curva carga – desplazamiento

$$\left(C = \frac{\delta}{F}\right).$$

Para una placa sin agrietar la complianza está dada por:

$$C = \left(\frac{L}{WBE}\right)$$

Donde: C es complianza, L es la Longitud, W es el ancho, B es el espesor y E es el Módulo de Young.

Para una probeta agrietada

$$C = \left(\frac{v}{P}\right)$$

V es el desplazamiento de la abertura de la grieta a partir de la línea de carga o cara frontal y P es la carga.

La complianza se relaciona con la rapidez de liberación de energía mediante la siguiente expresión:

$$G = \frac{P^2 \partial C}{2B \partial a}$$

1. Se obtienen los valores a partir de los datos.
2. Graficar los valores de la complianza medidos para diferenciar tamaños de grieta.
3. Obtener la pendiente de esta curva en el punto correspondiente al tamaño de grieta deseada y sustituir en la ecuación anterior.

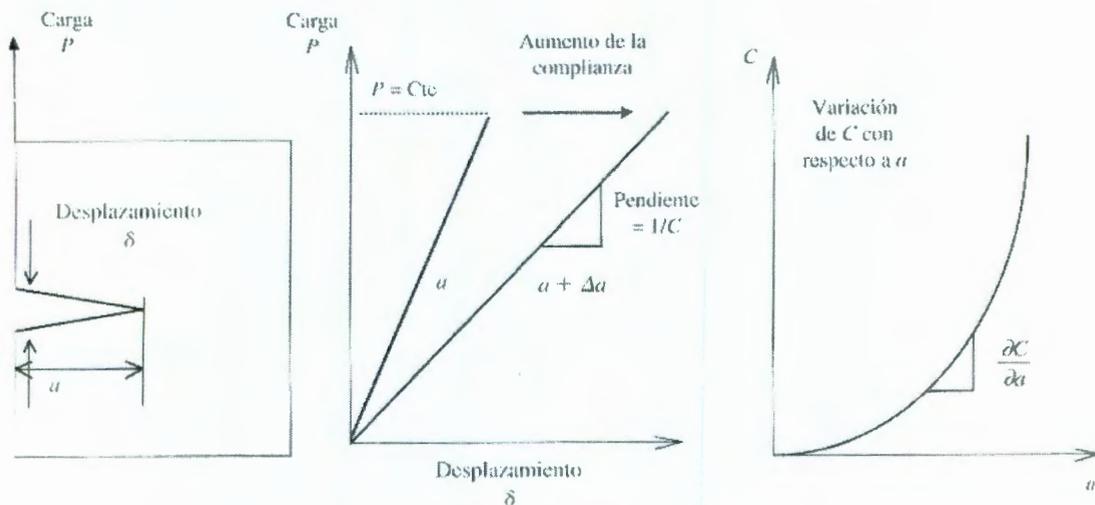


Figura 14. Complianza, (González ,V. J. L. 2004. Mecánica de Fractura. 2da. ed., Editorial Limusa, México).

Desventajas: se requiere una máquina que controle automáticamente la carga.

Ventajas: la interpretación de resultados es directa y el método es preciso y seguro.

### II.2.5 Propagación de grieta por fatiga.

La fatiga es un proceso de fractura retardada, en el cual un cuerpo es sometido a cargas cíclicas que produce la propagación de una grieta que transcurre deformándolo elásticamente hasta llegar a su tamaño crítico y causa la fractura final del cuerpo.

En las tres etapas, la rapidez de propagación de la grieta depende de la amplitud de la variación de los esfuerzos en la punta de la grieta (condición lineal elástica depende de  $K_I$ ).

$$\Delta K_I = K_{I_{\max}} - K_{I_{\min}}$$

Como  $K_I$  depende linealmente de la carga y  $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$  en general se tiene que:

$$\Delta K = \Delta P \beta \sqrt{(\pi \alpha)}$$

Si la amplitud y carga son constantes, el ciclo de carga queda completamente definido con la siguiente relación de cargas:

La amplitud se determina:

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

El esfuerzo promedio es:

$$\sigma = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2}$$

Forma de escribir también el ciclo de carga:

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$$

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$

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

La principal característica de la fatiga es el tipo de ciclo de carga. Éste puede variar dependiendo de la relación  $R$ , de la frecuencia y de la forma de variación de la carga.

La forma del ciclo de carga puede dividirse en cuatro tipos: Senoidal, Pulsante, Triangular y Aleatoria.

El valor de  $R$  indica el tipo de carga; para este trabajo es tensión-tensión (Figura 15).

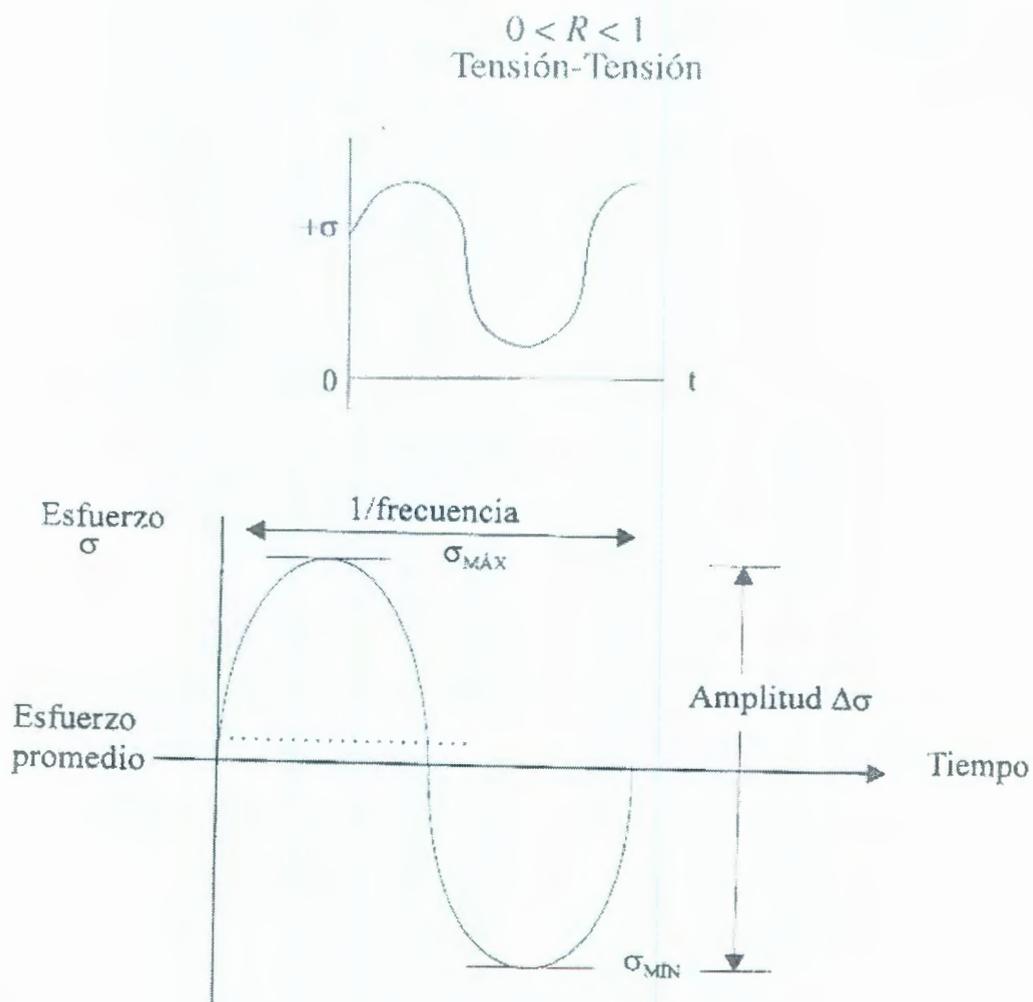


Figura 15. Tensión – Tensión, (González, V. J. L. 1998. Mecánica de Fractura, Bases y aplicaciones. 1ra. ed., Editorial Limusa, México).

La magnitud de la longitud en la grieta en un ciclo dependerá de los esfuerzos aplicados en la punta de la grieta, descritos por  $K_I$  de la siguiente manera donde  $\beta$  es un factor geométrico:

$$\Delta K_I = K_{MAX} - K_{MIN}$$

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \beta \sqrt{(\pi a)}$$

París (1962) notó que el incremento de longitud de grieta por ciclo  $\frac{da}{dN}$  depende de  $K_I$  como se muestra en la Figura 16, y se encuentra que en la propagación de una grieta por fatiga existen tres etapas bien definidas. En la etapa I hay un  $K_I$  debajo del cual la velocidad de propagación de grieta es nula; este valor es llamado límite o umbral de fatiga. En la etapa II,  $\log \frac{da}{dN}$  es proporcional a  $\log dK$  y se le ha llamado región de París. Y la etapa III que son valores de  $K_I$  cercanos a la tenacidad a la fractura, donde la propagación de la grieta por fatiga se combina con modos estáticos de falla.

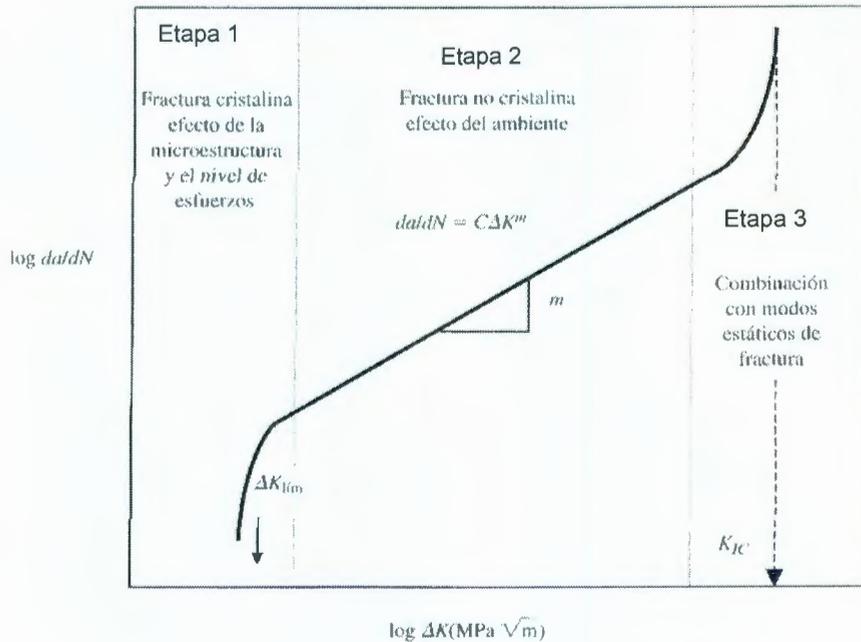


Figura 16. Propagación de grieta por fatiga, (González, V. J. L. 2004. Mecánica de Fractura. 2da. ed., Editorial Limusa, México).

El  $\text{Log} \left( \frac{da}{dN} \right)$  vs el  $\log K_I$  es quien describe mejor los efectos del medio ambiente,

los esfuerzos de tensión y microestructura.

Es muy común que la grieta por fatiga inicie en un concentrador de esfuerzos, que de forma genérica es una entalladura cuyo radio en la raíz es ( $\rho$ ). Se ha encontrado que la relación  $\Delta K_I / \rho$  controla el número de ciclos de iniciación de grietas  $N$ . El umbral de crecimiento de grieta, debajo del cual no crecen grietas. la vida de fatiga del componente es infinita. El umbral de crecimiento de grieta está relacionado con el esfuerzo de cedencia y con el radio de la raíz del concentrador de esfuerzos ( $\rho$ ).

Como tema de este proyecto nos interesa, particularmente, la etapa uno (la nucleación de la grieta) por lo que nos enfocaremos más a esta etapa.

La etapa 1 es el umbral de crecimiento de grieta,  $\Delta K_{TH}$ , que definimos como el límite debajo del cual no seguirá propagándose la grieta. Aquí  $\Delta K_I$  (el factor de intensidad de esfuerzos), una vez iniciada una grieta por fatiga se propaga por el efecto de la variación de esfuerzos en la punta de la grieta. Si la amplitud de la carga es constante, a medida que la grieta crece, el factor de intensidad de esfuerzos aumenta y consecuentemente la rapidez de propagación de la grieta aumenta. Este proceso transcurre hasta que el factor de intensidad de esfuerzos igual a tenacidad a la fractura del material ( $K_{IC}$ ) y ocurre la fractura final.

La mayor parte de la vida útil de un componente sujeto a condiciones de fatiga transcurre con una grieta propagándose a velocidad lenta: en la práctica se dice que durante la etapa de propagación transcurre aproximadamente el 90% de la vida en fatiga de un componente en servicio mientras que el 10% es consumido para iniciar la formación de grieta.

En la etapa II, el incremento de longitud de grieta por ciclos  $\frac{da}{dN}$  depende de  $\Delta K_I$ . de manera que en una prueba de fatiga bajo  $\Delta\sigma$  constante, la velocidad de crecimiento de la grieta por ciclo  $\frac{da}{dN}$  aumenta progresivamente, debido a que  $\Delta K_I$  aumenta.

Paris fue uno de los primeros investigadores en notar este comportamiento al presentar los datos  $\frac{da}{dN}$  contra  $\Delta K_I$  en la Figura 16. Paris encontró que la rapidez de propagación de grieta por fatiga presenta tres regiones bien definidas que corresponden a las etapas de crecimiento de la grieta en fatiga.

Durante la etapa I la rapidez de propagación de la grieta es fuertemente influida por el nivel de esfuerzos (o  $\Delta K_I$ ); la propagación de la grieta es cristalina. Como la zona plástica es muy pequeña, la etapa esta influida por su microestructura.

La región intermedia de la gráfica  $\log \frac{da}{dN}$  contra  $\log(\Delta K)$ , Paris encontró que para la gran mayoría de los materiales se cumple la siguiente relación:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m$$

Donde C y m son constantes empíricas. Esta ecuación es la base para muchas aplicaciones de la mecánica de fractura al análisis de la propagación de grieta por fatiga:

El exponente m de la ecuación de Paris varía de 2 a 5, dependiendo del material, mientras que la constante C es muy sensible al ambiente, como se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Valores de los coeficientes m y C de la ecuación de Paris.

Material	m	C(mm/ciclos)
Acero inoxidable austenítico	3.8	$10^{-12}$
Hierro nodular (tratado térmicamente)	3.5	$10^{-8}$
Aluminio 7021	2.5	$10^{-8}$

(González V. J. L. 2004. Mecánica de Fractura. 2da. ed., Editorial Limusa, México).

Partiendo de un tamaño mínimo detectable de grieta  $a_0$ , la grieta se propagará hasta alcanzar el tamaño crítico  $\alpha_c$  y entonces ocurrirá la falla. El tamaño crítico de grieta es calculado con la tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  y el esfuerzo máximo en el ciclo de carga  $\sigma_{MAX}$ , como:

$$\alpha_c = \left( \frac{K_{IC}^2}{\Pi Y^2 \sigma_{MAX}} \right)$$

Donde  $K_{IC}$  es la tenacidad a la fractura,  $\sigma_{MAX}$  esfuerzo máximo de tensión,  $\alpha_c$  tamaño de la grieta

## II.2.6 Esfuerzo plano y deformación plana

En la condición de esfuerzo plano, no hay componentes de esfuerzos perpendiculares a la superficie y la deformación tiene tres componentes normales. Dependiendo del espesor y de la magnitud de los esfuerzos en la punta de la grieta en una placa agrietada se pueden establecer dos estados de esfuerzos y deformaciones opuestos en la región próxima a la punta de una grieta, que son: esfuerzo plano y deformación plana.

Experimentalmente se ha encontrado que las condiciones de deformación plana, ocurren en cuerpos cuyo espesor  $B$  es mayor que la relación:

$$B > \frac{K_{IC}^2}{\sigma_0^2}$$

Como se muestra en la Figura 17 el  $K_{IC}$  varía con el espesor del espécimen de prueba, teniendo su mínimo valor precisamente en condiciones de deformación plana. Aunque no se sabe con exactitud la causa de esto, se dice que el menor tamaño de zona plástica y la mayor construcción plástica hacen que la energía global consumida en el proceso de fractura sea menor en condiciones de deformación plana. En deformación plana también se ha encontrado que el valor de  $R$  es constante e independiente de la longitud de grieta por lo que se puede considerar al  $K_{IC}$  en deformación plana como una propiedad del material. Como en el punto de inestabilidad ocurre cuando  $G = R$  y  $G$  es proporcional a  $K$ , en condiciones de deformación plana, se puede emplear indistintamente  $K$  o  $G$  y el criterio de energía se satisface. Al valor de  $K_I$  en este punto ( $K_{IC}$ ) se le denomina tenacidad a la fractura en deformación plana y es la principal propiedad de un material.

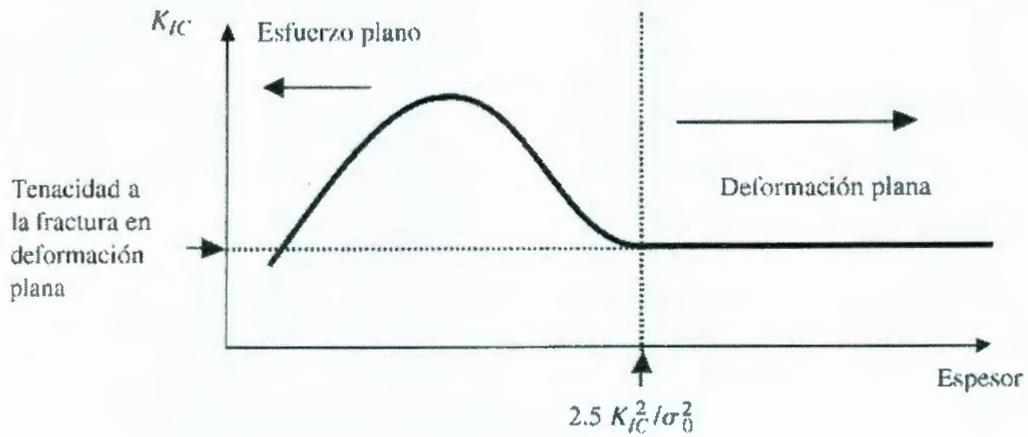


Figura 17. Esfuerzo plano y deformación plana,

(González, V. J. L. 2004. Mecánica de Fractura. 2da. ed., Editorial Limusa, México)

La orientación del esfuerzo cortante máximo también es mayor en la condición de esfuerzo plano en comparación con la deformación plana. También el tamaño de la zona plástica es mayor en esfuerzo plano. La predominación de esfuerzos cortantes produce que el material fracture preferentemente en la dirección de los esfuerzos cortantes produciendo fractura inclinada.

#### II.2.7 Umbral de crecimiento de grieta.

El umbral de crecimiento de grieta se considera que es cuando la grieta ya no seguirá propagándose y por lo tanto no habrá necesidad de remplazar la pieza por otra nueva.

Bajo norma está establecido que el umbral de crecimiento de grieta es cuando la propagación de la grieta ha llegado a  $1 \times 10^{-8}$  m/ ciclo por lo que estaríamos hablando del paso de un ciclo para que el tamaño de la grieta fuese de  $1 \times 10^{-8}$  m por tanto, y se considere estable y con esta condición se afirmaría que la grieta ha llegado a su umbral de crecimiento.

### **III. HIPÓTESIS**

La forma, tamaño y distribución de los precipitados en la fundición de aluminio, afecta el límite inferior para el crecimiento estable y el umbral de crecimiento de grieta.

#### **IV. OBJETIVOS**

General.

IV. 1 Mejorar el diseño de nuevos materiales y el diseño de los componentes mecánicos para el sector automotriz empleando la mecánica de la fractura.

Específicos.

IV. 2 Determinar el límite inferior para el crecimiento estable y el umbral de crecimiento de grieta en el Aluminio A319.

IV. 3 Evaluar la relación entre las propiedades físicas, químicas, mecánicas, metalúrgicas y el umbral de crecimiento de grieta.

## V. METODOLOGIA

### V.1. MATERIALES

#### Equipos y máquinas herramientas

- Aluminio A319
- Analizador de imágenes
- Calibrador de alturas
- Cortadora de disco sumergible, Modelo Jean Wirtz-Cuto 35
- Durómetro HYTOM
- Equipo de metrología dimensional
- Máquina servo hidráulica Instron y sus dispositivos.
- Material para preparación metalográfica
- Mesa de mármol
- Microscopio Estereoscopio, Olympus
- Microscopio Metalográfico, Olympus
- Rectificadora de superficies planas Chevalier FSG-1224AD y sus dispositivos
- Sierra cinta horizontal
- Sierra cinta vertical FUHO, Modelo PMC-F300, Motor ½ H.P. Serial No. 930030
- Taladro-Fresador Emco-FB-2 y sus dispositivos
- Torno paralelo horizontal Maximat Super 11, EMCO
- Mufla

Herramientas y accesorios para equipos de maquinado.

## V.2 MÉTODOS

Se basará en las normas:

- ASTM-E8M-00 para la fabricación de probetas estandarizadas de tensión redondas.
- ASTM-E399-90 “Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials” para la fabricación de probetas estandarizadas de mecánica de la fractura de tipo de flexión en tres puntos de apoyo y para determinar la función complianza.
- ASTM-E647-00 “Estándar test method for measurement of fatigue crack growth rates” para ensayos de complianza y umbral de crecimiento de grieta  $\Delta K_{TH}$  por fatiga y el tratamiento de resultados obtenidos.
- Manual de uso del Durómetro HYTOM.

## V.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

### V.3.1 Ensayo de dureza Brinell.

Se determinó en el A319 la dureza donde las condiciones del ensayo se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Condiciones del ensayo de dureza Brinell.

Precarga	10 kgf
Carga	31,25 kgf
Tiempo	2 s
Diámetro del indentador de bola	2,5 mm



Figura 18. Durómetro duplex modelo 713 SRD, (Foto, tomada por el autor en el laboratorio del Instituto Mexicano del Transporte, IMT).

Se hicieron seis mediciones en probeta con el durómetro duplex, Figura 18, después en el analizador de imagen, Figura 19, se midió el diámetro de la huella del penetrador como se muestra en la Figura 20.



(A)



(B)

Figura 19. (A) Analizador de imágenes y (B) Microscopio electrónico de platina invertida OLYMPUS, Mod PMG3-F, Serie 09005, (Fotos, tomadas por el autor en el laboratorio del IMT).

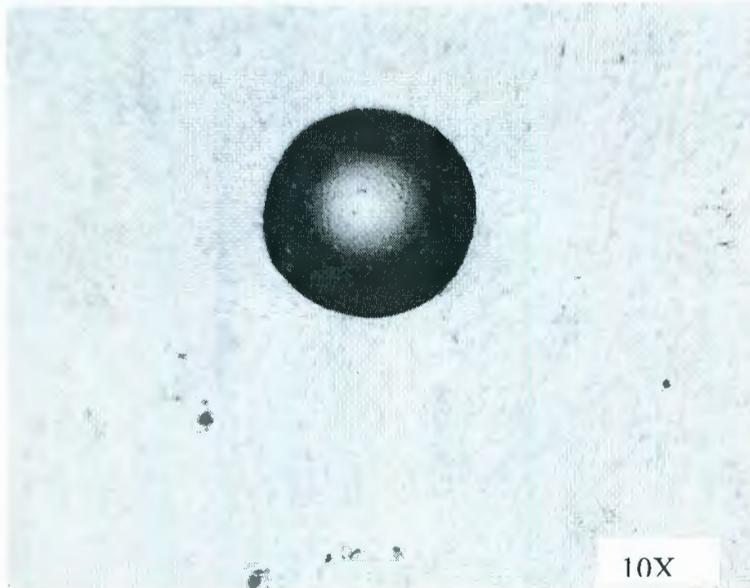


Figura 20. Huella del indentador de bola en la probeta, (Foto, tomada por el autor).

Con el dato obtenido se sustituye en la fórmula siguiente para obtener la dureza del Aluminio A319.

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Donde: D es diámetro del penetrador de bola en mm, d es el diámetro de la huella en mm, F es la carga aplicada y HB es la dureza Brinell.

### V.3.2 Análisis de microestructura.

Montaje de probetas: Se cortaron muestras del aluminio A319 y se montaron en acrílico, Figura 21 bajo las condiciones del Cuadro 10.



(A)



(B)

Figura 21. (A) Probetas montadas en acrílico y (B) Montadora hidráulica modelo Jean Wirtz-Hydropress, serie 9.029948, (Foto, tomada por el autor).

Cuadro 10. Condiciones de montaje de las probetas.

Resina	Temperatura (°C)	Presión (bars)	Tiempo (min)
Acrílico	180-220	90-100	15-20

Preparación de reactivos. Se prepararon dos soluciones la A y B, la solución A contenía 6 g de NaOH disuelto en 50 ml de agua, y la solución B contenía 3 gotas de HF disuelto en 50 mL de agua.

Se hizo un desbaste fino, Figura 22, en cada una de las muestras ya montadas, primero por la lija 1000 después dando un giró de 90° y desbastándola por la liga 2000 en húmedo.



Figura 22. Lijadora. Modelo Dup Serie 9.03849, (Foto, tomada por el autor).

Una vez logrado el acabado liso, siguió con el pulido grueso, sobre un disco con paño de nylon y girando a 300 RPM, Figura 23, utilizando como abrasivo una pasta de diamante de 6 micras y, finalmente el pulido fino, sobre un paño, utilizando alúmina con granos de 1  $\mu$ m.

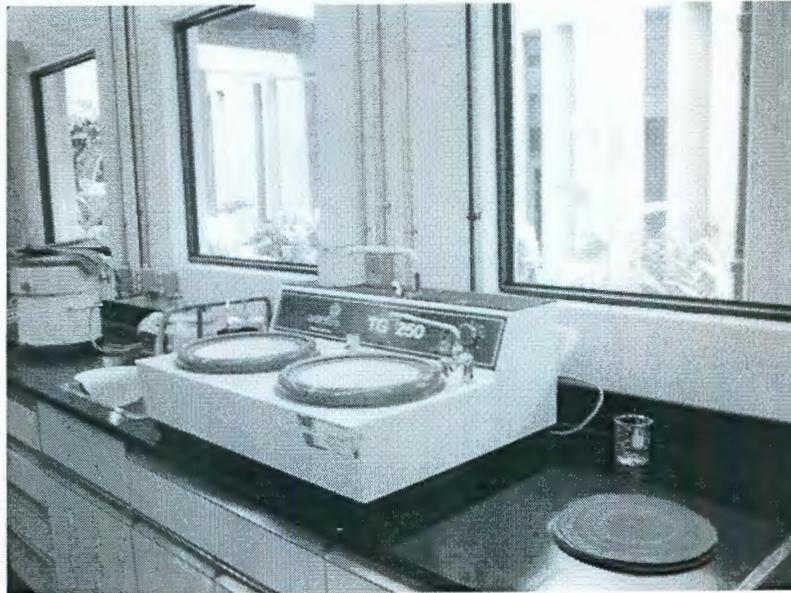


Figura 23. Pulidora de mesa de disco doble. Modelo Dup Serie 9.029948.  
(Foto, tomada por el autor).

Ataque químico: Se cubrió la probeta con la solución A durante un par de segundos e inmediatamente después se agregó la solución B durante 3 minutos, para posteriormente ser enjuagada. Se observó la microestructura al microscopio y utilizando en el analizador de imágenes, Figura 24.

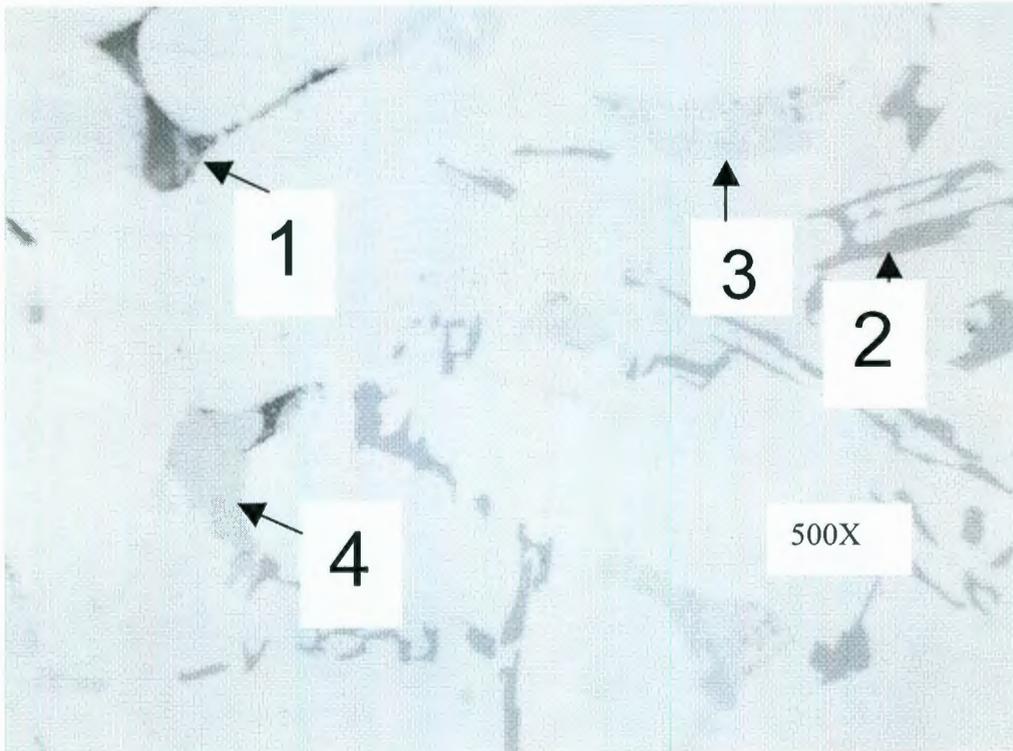


Figura 24. Microestructura del aluminio A319 a 500X, (Foto, tomada por el autor).

Se cuantificaron los precipitados del aluminio A319 tomando fotos a 500X en el analizador de Imágenes Image & Plus y las condiciones fueron como se indica en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Condiciones de análisis de imagen en la cuantificación de precipitados.

Precipitado	Balance			Segmentación
	Brillo	Contraste	Gamma	
1) Al <sub>5</sub> FeSi	62	52	1,0	0-130
2) αAl + Si	62	52	1,0	0-177
3) Al <sub>2</sub> Cu	62	52	1,0	0-200
4) αAl + Si + Al <sub>2</sub> Cu + Al <sub>5</sub> Mg <sub>6</sub> Cu <sub>2</sub> Si <sub>6</sub>	62	52	1,0	0-219

#### V.3.4 Ensayo para determinación de complianza.

##### V.3.4.1 Diseño de probeta.

El diseño de probetas de mecánica de la fractura del tipo flexión en tres puntos de apoyo se hizo bajo la norma: ASTM-E 399-90 "Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", dicha norma dice que:

$$2,5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 = B$$

Donde B es el espesor,  $\sigma_{ys}$  es el esfuerzo de cedencia y E es el módulo de Young, para poder determinar este valor se tomo el  $K_{IC}$  típico de los aluminios, 20MPa, y el esfuerzo de cedencia que se me proporcionó del aluminio el cual se determinó con 10 probetas con la siguiente geometría, Figura 25.



Figura 25. Dibujo de la probeta de tensión.

Se manufacturaron 10 probetas de tensión redondas del aluminio A319 con dimensiones que se muestran en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Dimensiones de probetas de tensión.

Descripción	Dimensión
G (longitud calibrada)	20 ± 0,1 mm
D (diámetro de probeta)	4 ± 0,1 mm
R (radio de entalla o sección reducida)	4 mm
A (longitud de sección reducida)	24 mm
L (longitud de probeta)	72 mm

Donde las condiciones de ensayo se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Condiciones de prueba.

Parámetro del ensayo	
Velocidad de carga	2kg/s
Celda de carga	10ton
Extensómetro	5mm

Tomando el esfuerzo de cedencia y el factor de intensidad de esfuerzo las probetas de tensión las probetas de mecánica de la fractura del tipo flexión en tres puntos de apoyo a manufacturar tendría las dimensiones siguientes (Cuadro 14).

Cuadro 14. Dimensiones de las probetas de mecánica de fractura con tres puntos de apoyo normalizadas.

Parámetros	Dimensiones (mm)
B ( espesor)	7 mm
W (ancho)	14 mm
L (longitud total)	60 mm
N (Abertura de entalla)	2 mm
a (Longitud de entalla)	6 mm

La medida  $a$  no entra en los parámetros normalizados por la norma E399, como solución al problema se manufacturaron probetas no normalizadas guardando una relación del 0.5% entre el ancho y el espesor.

$$\frac{B}{W} = 0.5$$

Y su geometría es como se muestra en la Figura 26.

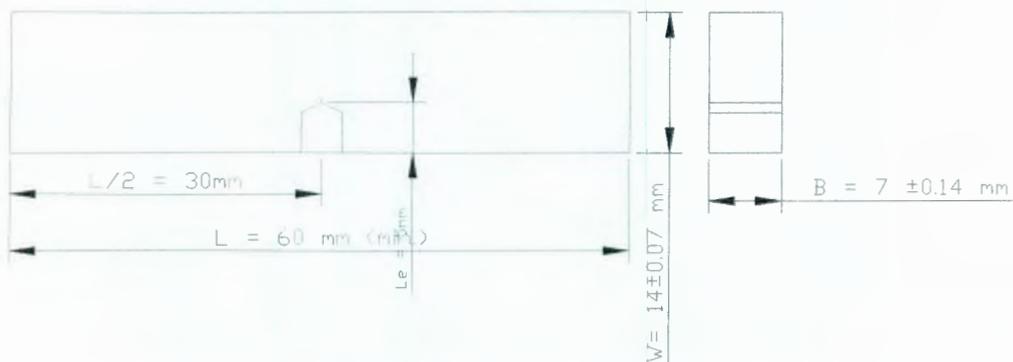


Figura 26. Diseño de la probeta de mecánica de fractura del tipo de tres puntos de apoyo (Dibujo elaborado por el autor).

#### V.3.4.2 Manufactura de probetas de flexión en tres puntos.

El maquinado de las probetas de flexión en tres puntos de apoyo se realizó como se describe en la Cuadro 15.

Cuadro 15. Proceso de manufactura de probetas de flexión en tres puntos de apoyo

PASO	DESCRIPCIÓN
1	Habilitar el material (Que el material este en dimensiones para maquinar)
2	Colocar la pieza y realizar el fresado cara "A"
3	Realizar el fresado en el lado A
4	Colocar la pieza y realizar el fresado cara "B"
5	Realizar el fresado en el lado B, hasta dimensión final
6	Colocar la pieza y realizar el fresado cara "C"
7	Colocar la pieza y realizar el fresado cara "D"
8	Realizar el rectificado cara "A"
9	Realizar el rectificado cara "B"
10	Realizar el rectificado cara "C"
11	Realizar el rectificado cara "D"
12	Asignar clave de identificación a las probetas
13	En el taladro-fresador, realizar la entalla asegurando que exista paralelismo y perpendicularidad entre la probeta y la prensa; además se debe asegurar que la entalla o muesca termine en punta Realización de la muesca que es donde ira sujeto el extensometro.
14	Desbastar la probeta, hasta eliminar las rayas adquiridas durante el rectificado, con lijas: 1000, 1200 y 2000
15	Pulir a espejo la probeta de Mecánica de Fractura
16	Marcar a $a_0$ y enseguida con pasos de 0.5 mm utilizando la mesa de mármol y el Vernier de alturas
17	Tomar las dimensiones finales de la probeta, utilizando el equipo o instrumento adecuado
18	Proteger a la probeta

Las Figuras 27 y 28 ilustra la maquinaria empleada en el maquinado de las probetas de flexión en tres puntos de apoyo.



Figura 27. Taladro fresador, (Foto, tomada por el autor en el taller de máquinas y herramientas del IMT).

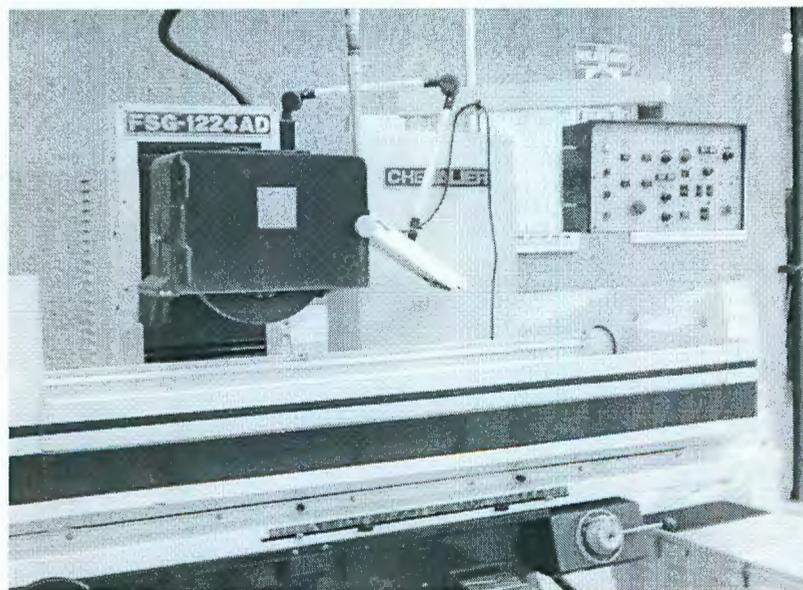


Figura 28. Rectificadora Chevalier para rectificado de probetas, (Fotografía, tomada por el autor en el IMT, 2005).

#### V.3.4.3 Ensayo para la complianza.

En este apartado se describe la metodología para la calibración de una probeta que no esta normalizada. El procedimiento con el que se realiza la calibración puede ser mediante mediciones ópticas y registros manuales, o mediante un proceso de mediciones automatizado; éste último requiere del conocimiento de la función de la complianza para programarse en el sistema servo-hidráulico. Cabe aclarar que el método óptico puede ser más sencillo, sin embargo, en algunos casos es poco práctico pues el ajuste en pruebas de  $\Delta K$  decreciente es lento y tiene un mayor error en la medición.

Se ensayaron 4 probetas para determinar la función complianza, en la máquina servohidráulica Instron. El diseño de probeta se muestra en el apartado V.3.4.1, y la figura 26 muestra las probetas de ensayo, las cuales se pulen a espejo y se mide la longitud de entalla ( $a_0$ ), Figura 29. Posteriormente, se hizo un marcado empezando en la punta de la entalla, seguida de marcas de 0,25 mm entre cada una; como se muestra en la figura 30, para que fuera visible el avance de la grieta y poder medir la longitud de la misma visualmente.

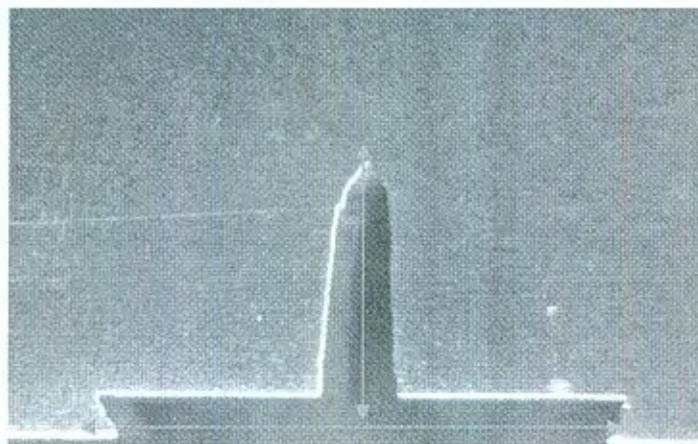


Figura 29. Medición de la entalla, (Foto, tomada por el autor).



Figura 30. Pie de rey sobre la mesa de mármol en donde se hicieron las marcas a las probetas, (Foto, tomada por el autor).

Dado que el marcado de la probeta no es del todo preciso, se midió con el analizador de imágenes la distancia entre cada una de las marcas; es decir, de la base de la probeta a la 1ª marca, después de la 1ª a la 2ª, y así consecutivamente, figura 31. Lo anterior se realiza para medir la longitud exacta de la grieta y tener un mayor control en el monitoreo visual del crecimiento de la grieta.

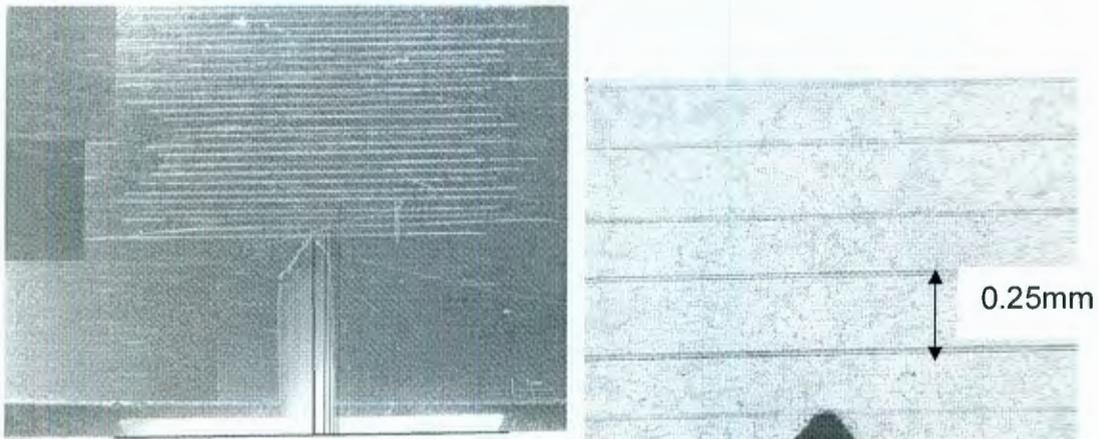


Figura 31. Probeta marcada a cada 0.25mm, (Foto, tomada por el autor).

Antes de realizar el ensayo se miden los parámetros en el siguiente cuadro 16.

Cuadro 16. Dimensiones de la probeta de flexión en tres puntos de apoyo.

Descripción	
B= Espesor	7,00mm
W= Ancho	14mm
a= Longitud de entalla	5mm
S= spam	56mm
R= Pmin/Pmax	0,1mm
a/w =	0,33mm
f(a/W)=factor geométrico	1,665mm

Se calculó el factor de forma con la ecuación:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left\{ \frac{3\sqrt{\frac{a}{W}}}{2\left(1+2\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[ 1.99 - \frac{a}{W}\left(1-\frac{a}{W}\right) \left[ 2.15 - 3.93\frac{a}{W} + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right] \right] \right\}$$

Se elabora una hoja de cálculo, Cuadro 17 donde se realiza a partir de un  $\Delta K$  dado y después se calculó  $\Delta P_{MAX}$  y  $\Delta P_{min}$  con las siguientes formulas:

$$\Delta K = \left( \frac{(\Delta P)(S)}{B(W)^{\frac{3}{2}}} \right) f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$\Delta K = \left( \frac{(P_{max} - P_{min})(S)}{B(W)^{\frac{3}{2}}} \right) f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$P_{\max} = \left( \frac{\Delta K(B)(W)^{3/2}}{(1-R)(S)f\left(\frac{a}{W}\right)} \right)$$

Las unidades de  $P_{\max}$  están dadas en Newtons (N), por lo que se convierte a kg-f.

Para calcular  $P_{\min}$  se utiliza la ecuación siguiente.

$$P_{\min} = RP_{\max}$$

Cuadro 17. Hoja de cálculo.

$\Delta K$	$\Delta P$	$P_{\max}$ en N	$P_{\min}$ en N	$P_{\max}$ en kg-F	$P_{\min}$ en kg-F
5,054	651,8651	<b>724,295</b>	<b>65,1865</b>	73,8574	6,6471

Se tomó como referencia inicial la complianza reportada del artículo que lleva por título, 1980, "Towards standardizing a sub-size specimen for fatigue crack propagation behaviour of a nuclear pressure vessel steel", que presenta una probeta con dimensiones cercanas a las probetas utilizadas para este estudio, Figura 32.

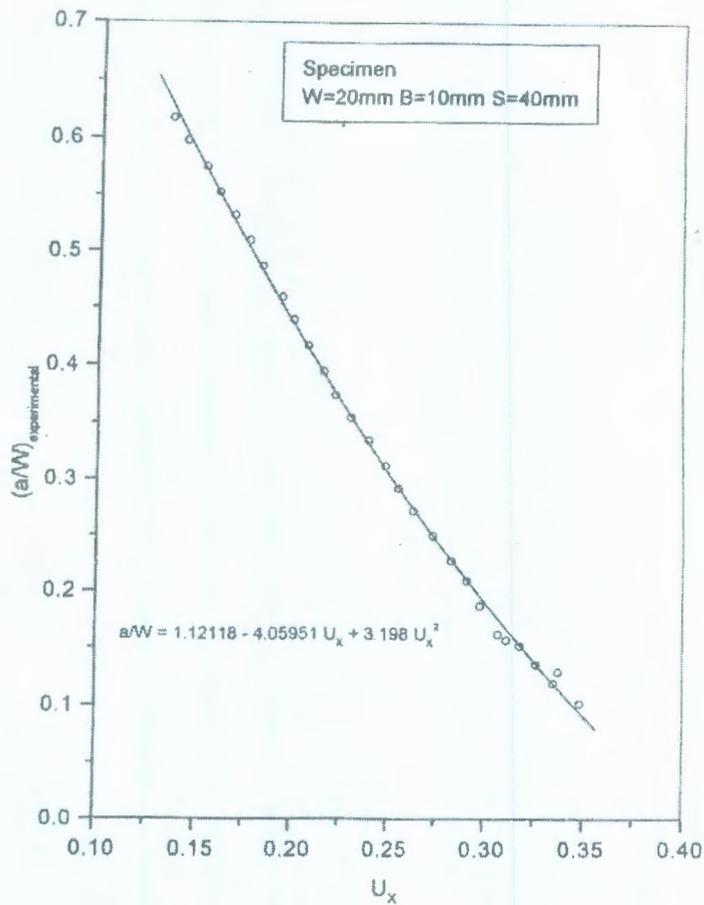


Figura 32. Gráfica de la función complianza.

( "Towards standardizing a sub-size specimen for fatigue crack propagation behaviour of a nuclear pressure vessel steel" )

Una vez que se tienen todos los datos anteriores para cada una de las probetas a ensayar se procedió a montar el dispositivo en la máquina Instron, Figura 33.

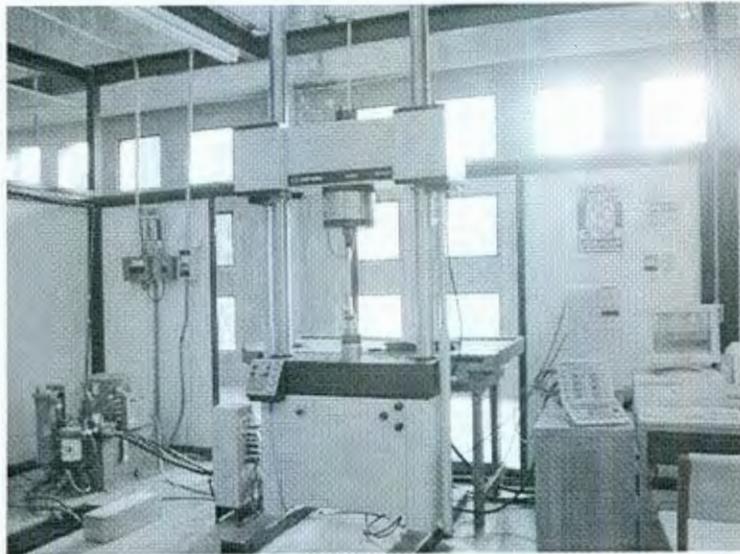


Figura 33. Máquina servohidráulica Instron, (Foto, tomada por el autor en el laboratorio del IMT).

Se coloca el dispositivo en la máquina Instron para probetas de tensión en tres puntos de apoyo (Figura 34).

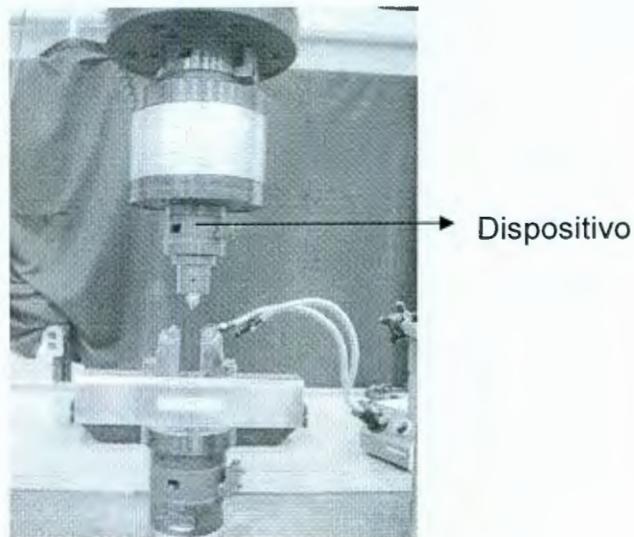


Figura 34. Dispositivo montado en la máquina servohidráulica Instron, (Foto, tomada por el autor).

Se colocó la probeta de mecánica de fractura a ensayarse de forma alineada con la celda de carga como se muestra en la Figura 35.



(A)



(B)

Figura 35. (A) Probeta montada en la máquina servohidráulica Instron y (B) Estereomicroscopio enfocado a la probeta montada, (Foto, tomada por el autor).

Se calibró la probeta de forma óptica de la siguiente manera: se utiliza un ocular de estereomicroscopio que tiene una regla calibrada y se mide las distancias que hay entre las marcas de la probeta, siempre al mismo aumento, esto con el fin de monitorear el crecimiento de la grieta de forma óptica. Una vez teniendo los datos antes mencionados se procede a introducir en el software los parámetros siguientes, Cuadro 18:

Cuadro 18. Condiciones de prueba.

$\Delta K$	constante
Frecuencia	10Hz
$\Delta P$	651,8651N
a/W del articulo	$1.12118-4,05951U+0,3198U^2$
R	0.1
Tipo de onda	Senoidal



Figura 36. Equipo de control para la máquina Instron.

Se inicia la prueba y los datos que se adquirieron se muestran en la Cuadro 19 como ejemplo y el crecimiento de la grieta, Figura 37.

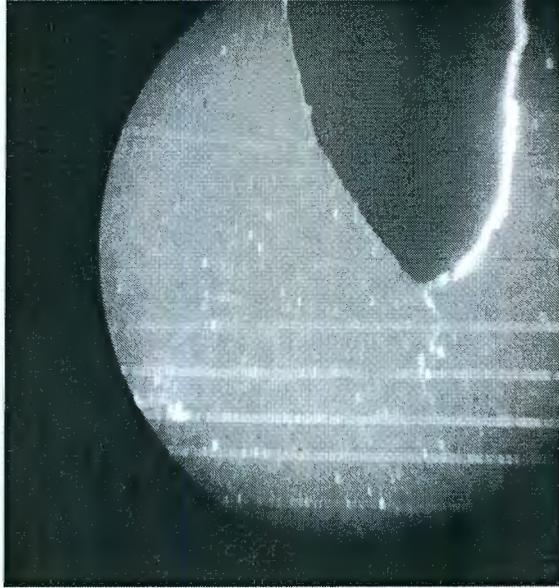


Figura 37. Crecimiento de la grieta durante el ensayo, (Foto, tomada por el ocular del estereomicroscopio).

Cuadro 19. Datos adquiridos del ensayo de complianza.

Ciclos	a (mm)	$\frac{EvB}{P}$	$\frac{da}{DN}$ mm ciclo	$\Delta P(N)$	$\Delta K(MPa\sqrt{m})$	R
833	8,18	36,48	3,255E-4	473.9	9.498	0.1046
1015	8,212	36,94	1,1973E-4	475.9	9.631	0.1024
1063	8,212	36,94	1,401E-4	476.5	9.641	0.09969
1420	8,24	37,35	1,42E-4	473.3	9.658	0.1047
1739	8,268	37,75	1.112E-4	478	9.834	0.09852

En el Cuadro 20 se muestran los datos calculados es decir la función de transferencia  $U_x$

Cuadro 20. Datos calculados.

<b>U<sub>x</sub></b>
0.14459987
0.14382662
0.14382662
0.14314835
0.14249629

Donde:  $\frac{EvB}{P}$  es la complianza normalizada,  $\frac{da}{DN}$  es la velocidad de propagación de la grieta,

Como primer paso se estima  $U_x$  con base a la siguiente expresión

$$U_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{B_{eff}EV}{P} + 1}}$$

Donde  $U_x$  es función de transferencia, E es el modulo de Young, V es el desplazamiento del extensómetro,  $B_{eff}$  espesor efectivo de la probeta y P es la carga.

Se recalcularon los datos obtenidos de acuerdo a la geometría de la probeta de la siguiente forma: entre la longitud de la grieta inicial medida en el analizador de imágenes y la longitud de grieta inicial medida con el extensómetro se encontró que el error era del 29%, entonces se corrigieron las longitudes de grieta que reportó el extensómetro en un 29% menos y se gráfico  $a/W$  vs  $U_x$  de los datos del artículo y los corregidos, Figura 38.

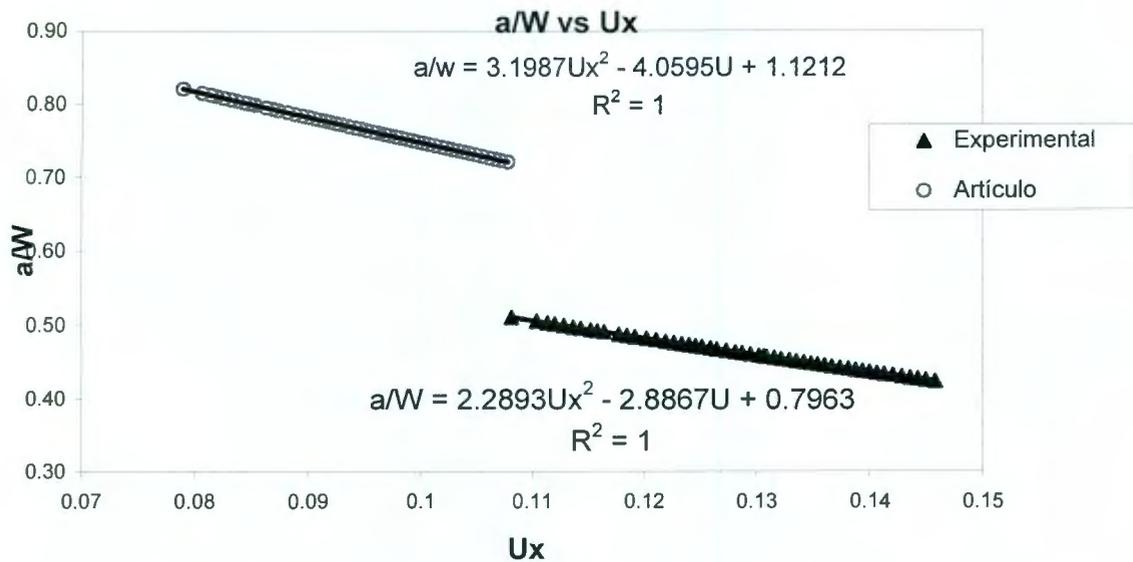


Figura 38. Gráfica que muestra los coeficientes de la complianza experimental.

Esta fue como primera aproximación de los coeficientes, por lo que posteriormente se hicieron tres ensayos para un mejor ajuste del polinomio, para lo cual se utilizaron mediciones ópticas para comparar el tamaño de grieta real con el calculado por el software de la máquina Instron.

### V.3.5 Ensayo del umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$

#### V.3.5.1 Cálculo de la constante C para el control en $\Delta K$ decreciente

La constante (C), Figura 39, es un factor que determina de forma automática la proporción en que se disminuye el factor de intensidad de esfuerzos (carga) durante el ensayo para determinar el umbral de crecimiento de grieta a medida que esta última crece y en condiciones de  $\Delta K$  decreciente.

Tomando los datos experimentales de la complianza y en base a la norma ASTM 647 “standard test method for measurement of fatigue crack growth rates”

La constante de decremento, por norma, debe cumplir con el siguiente requisito:

$$C = \left( \frac{1}{K} \right) \left( \frac{dK}{da} \right) > -0.08 mm^{-1}$$

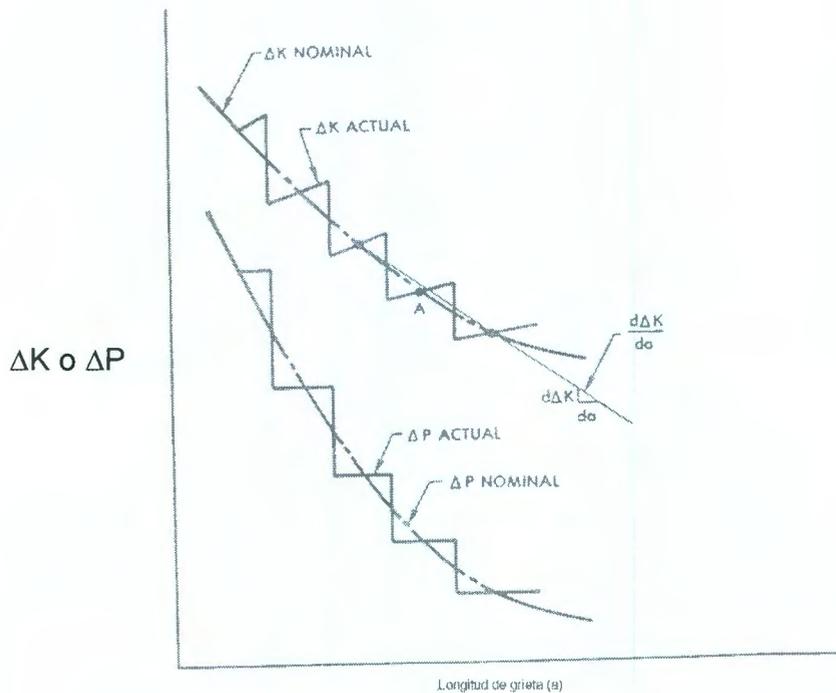


Figura 39. Gráfica que muestra el decremento de K con el decremento de la carga contra la longitud de la grieta, (Norma ASTM 647).

En el caso particular de este estudio, el requisito de la norma no se cumple ya que la geometría misma está fuera de especificación; por lo tanto, se aplicó un procedimiento en el cual se estima una velocidad de crecimiento de grieta que sea controlable automáticamente y se calcula el valor de la constante de C correspondiente.

Para el cálculo inicial de la constante (C) se calcula la zona plástica del material mediante la siguiente fórmula:

$$r_p^* = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \left( \frac{\Delta K}{\sigma_0} \right)^2$$

Donde:  $r_p^*$  = la extensión de la zona plástica frente a la grieta,  $\sigma_0$  = esfuerzo de cedencia.

Posteriormente se hizo una hoja de cálculo tabulando los datos que se muestran en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Hoja de cálculo para determinar C.

$(a_i + r_p^*)/mm$	a (mm)	$\Delta K$	$\frac{K_i}{K_0}$	$\ln \frac{K_i}{K_0}$	$\Delta a = (a_i - a_0)$
0.0000	5.1713	5.0000	1.0000	0.0000	0.0000
0.1379	5.3092	4.5000	0.9000	-0.1054	0.1379
0.1117	5.4210	4.0500	0.8100	-0.2107	0.2497
0.0905	5.5115	3.6450	0.7290	-0.3161	0.3402

A partir de los datos anteriores, se grafica  $(a_i + r_p^*)$  vs  $\left(\ln \frac{K_i}{K_0}\right)$  y la pendiente de la curva es la constante C.

#### V.3.5.2 Ensayo del umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$

Teniendo la función complianza y la constante ( C ) se realizó el ensayo del umbral de crecimiento de grieta  $\Delta K_{TH}$  en el Aluminio A319, En el Cuadro 22 se muestran los parámetros con que se llevo acabo el ensayo del umbral de crecimiento de grieta.

Cuadro 22. Condiciones del ensayo del umbral de crecimiento de grieta  $\Delta K_{TH}$ .

Parámetro	
$\Delta K$	Decreciente
$\frac{a}{W}$	$1.0207U^2 - 2.0712U + 0.7241$
B	7 mm
W	14 mm
L	60 mm
$a_0$	5,00mm
Frecuencia	10 Hz
R	0,1
C	1,07

Una vez programada la máquina se dio inicio la prueba donde el equipo guardó los siguientes datos, Cuadro 23.

Cuadro 23. Adquisición de datos en el ensayo del umbral de crecimiento de grieta  $\Delta K_{TH}$ .

Nº	$a_0$ (mm)	$\frac{EvB}{P}$	$\frac{da}{dN}$ (mm/ciclo)	$\Delta P$ (N)	$\Delta K$ (Mpa $\sqrt{m}$ )	R
13000	5,091	22,72	0.000E+0	567,9	5,014	0,1005
20010	5,038	22,15	1,25E-05	566,3	4,949	0,1037
27260	5,126	23,09	8,30E-06	570	5,065	0,994
28200	5,089	22,69	3,21E-06	571,5	5,043	0,1028
29090	5,152	23,39	2,53E-06	566,9	5,063	0,1051
48760	5,187	23,79	2,72E-04	565,3	5,083	0,1009

Donde:  $N^\circ$  es numero de ciclos,  $a_0$  es longitud de la grieta,  $\left(\frac{EvB}{P}\right)$  es complianza normalizada,  $\left(\frac{da}{dN}\right)$  es avance de la grieta, está dada en  $\left(\frac{mm}{ciclo}\right)$ ,  $\Delta P$  es el decremento de la carga en N,  $\Delta K$  es el decremento del factor de intensidad de esfuerzo,  $R$  es el radio.

En la Figura 40 se muestra la probeta ensayada y la propagación de la grieta.

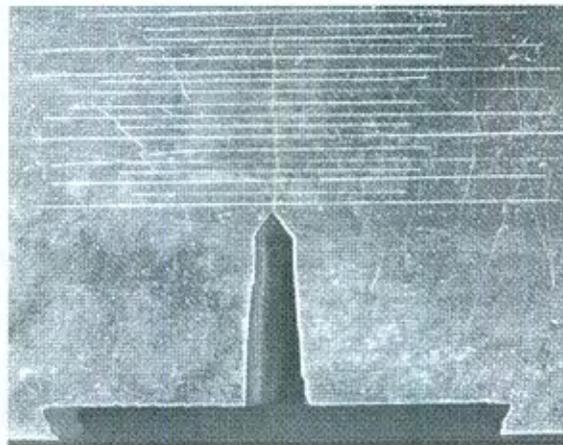


Figura 40. Probeta que se ensayo para determinar el  $\Delta K_{TH}$ ,  
(Foto, tomada por el autor).

#### V.3.5.3 Teñido térmico.

Las probetas que se emplearon para el ensayo de  $\Delta K_{TH}$  se sometieron a un teñido térmico, Figura 41, con el fin de hacer resaltar la longitud de grieta final, Figura 42, y poder medirla en el analizador de imágenes y evaluar el error por curvatura y el porcentaje de error en el método de complianza.

Condiciones del teñido térmico a 250°C por un tiempo de una hora.

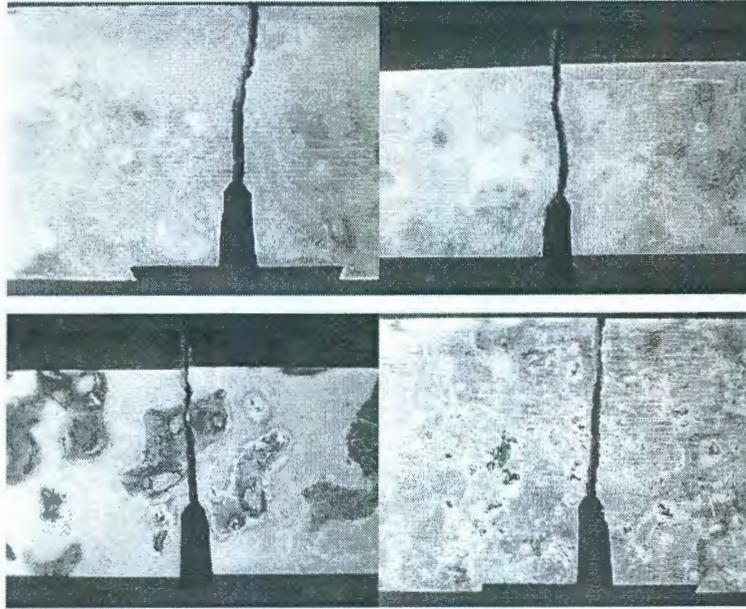


Figura 41. Teñido térmico de las probetas que se ensayaron para determinar el  $\Delta K_{TH}$ , (Foto, tomada por el autor).

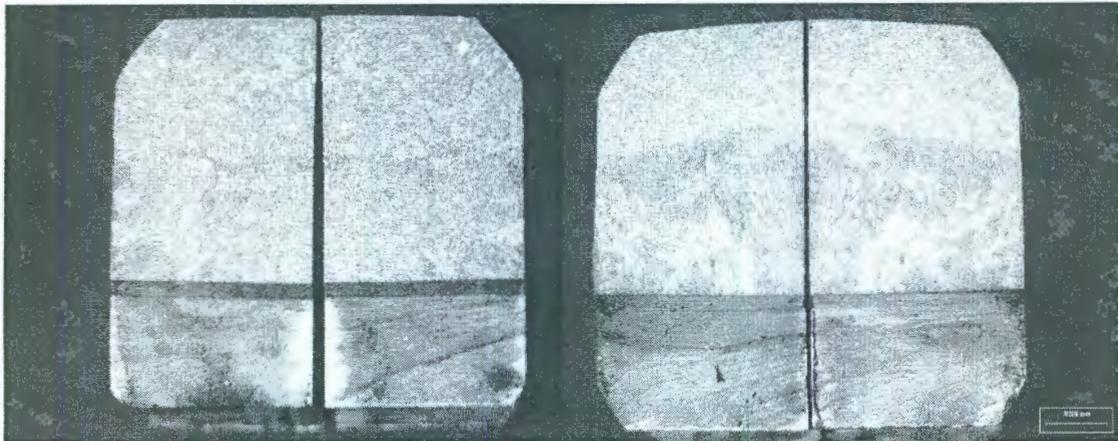


Figura 42. Longitud de grieta final, (Foto, tomada por el autor).

Con base a la norma ASTM 647 la forma de medir la corrección por curvatura es a un  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  de la probeta Figura 43.

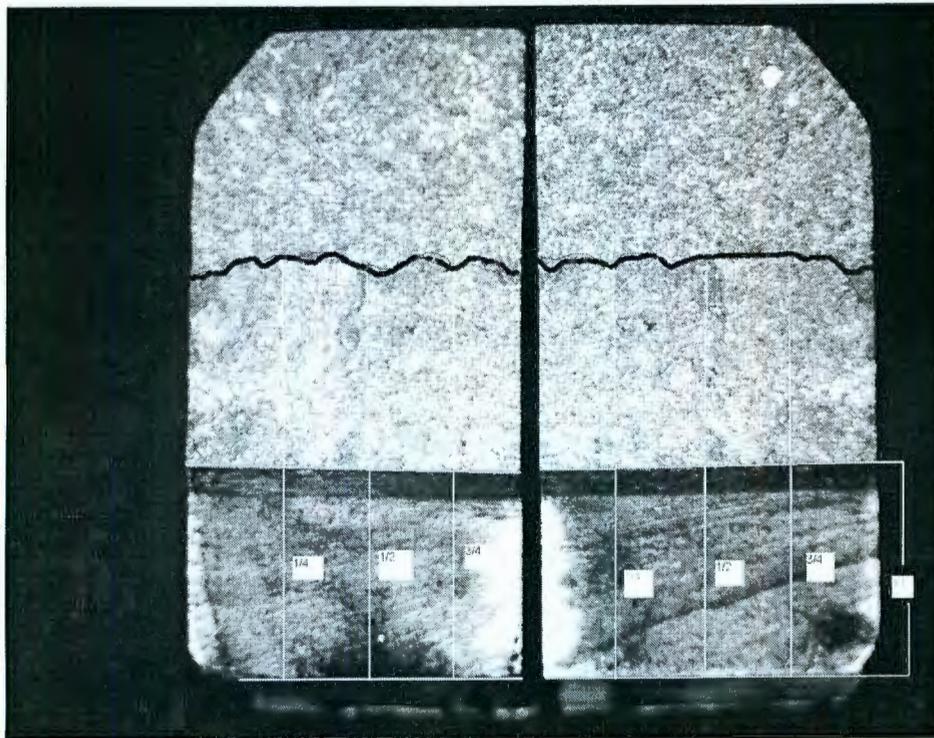


Figura 43. Medición de la longitud de grieta final, (Foto, tomada por el autor en el IMT).

Una vez hecha la corrección se elaboran los gráficos de  $\Delta K$  vs  $\frac{da}{dN}$  y se obtiene el rango de  $\Delta K_{TH}$ .

## VI RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los ensayos antes descritos en el apartado V.

### VI.1 Análisis Químico.

En la Cuadro 24 se presentan los datos del análisis químico realizado por ICP.

Cuadro 24. Análisis químico del Aluminio A319.

%	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Sr
Análisis	4,89	3,34	0,235	0,239	0,079	<0,001

### VI.2 Ensayo de dureza Brinell del A319

En la Cuadro 25 se presenta la dureza del Aluminio A319.

Cuadro 25. Dureza del Aluminio A319.

MARCAS	Diámetro de la huella	HB
1	0,62920467	98,8845466
2	0,63405183	97,35337716
3	0,5968558	110,0766475
4	0,61790945	102,5933885
5	0,61380993	103,9903758
6	0,63017613	98,57483845
7	0,63339575	97,55857265
8	0,64460335	94,13885092
9	0,64158267	95,04292687
10	0,66216037	89,1266179
11	0,6416344	95,02733592
12	0,63714785	96,39360652
<b>PROM.</b>	<b>0,63187768</b>	<b>98,2300904</b>
<b>S</b>	<b>0,00561668</b>	<b>1,76136062</b>
<b>V</b>	<b>0,0002783</b>	<b>28,88424298</b>

### VI.3 Microestructura del Aluminio A319.

En las Figuras 44 y 45 se muestra la microestructura y los diferentes precipitados que presenta el Aluminio A319 para identificarlos se numeran del 1 al 4 y posteriormente en el Cuadro 26 cuantifico cada uno de ellos.

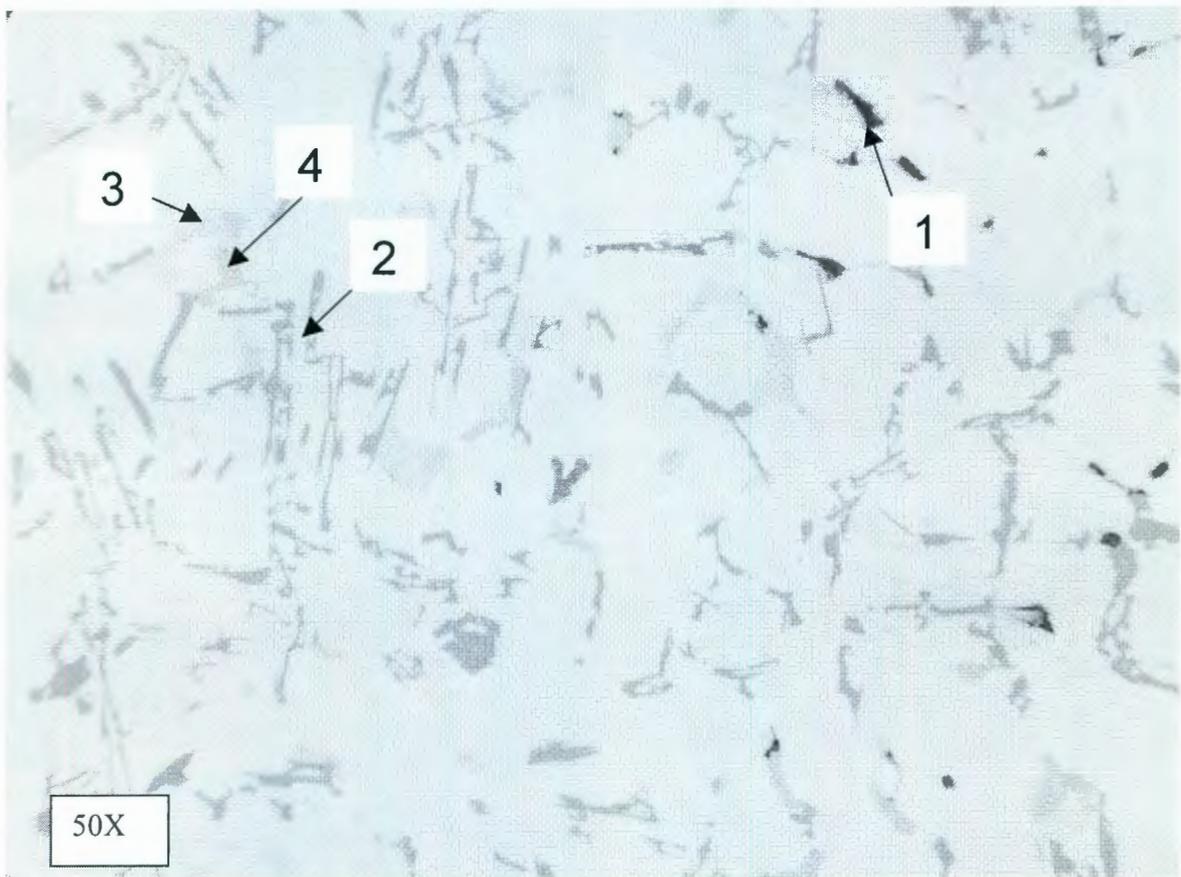


Figura 44. Microestructura del aluminio A 319, (Foto, tomada por el autor).

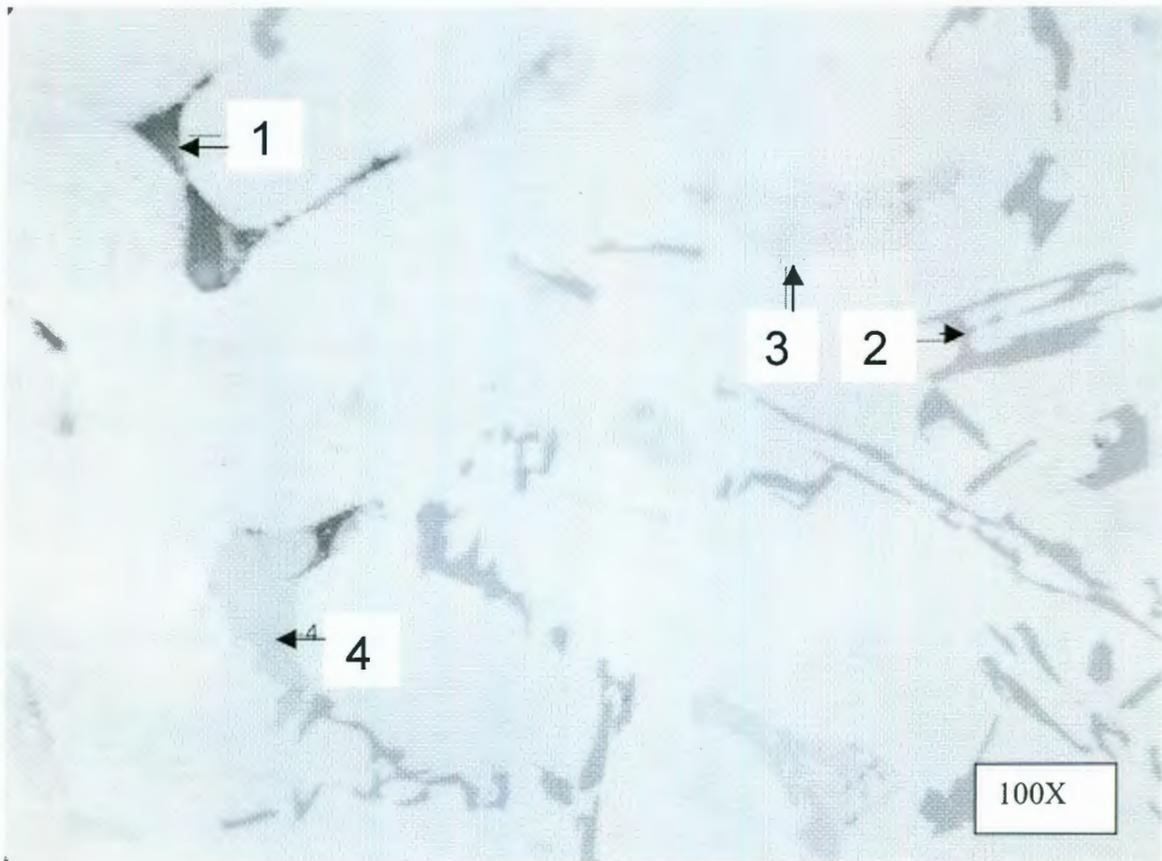


Figura 45. Microestructura del aluminio A 319, (Foto, tomada por el autor).

En el Cuadro 26 se presentan los porcentajes de precipitados presentes en la aleación de aluminio A319

Cuadro 26. Precipitados en la aleación A319.

Parámetro	% de precipitados				Total
	1) $\text{Al}_5\text{FeSi}$	2) $\alpha\text{Al} + \text{Si}$	3) $\text{Al}_2\text{Cu}$	4) $\alpha\text{Al} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{Cu} + \text{Al}_5\text{Mg}_6\text{Cu}_2\text{Si}_6$	
Promedio	0.001	0.045	0.040	0.514	0.6
Desviación estándar	3,15E-05	0,021	0,012	1,423	1.456
varianza	5,305e-06	0,0004	0,0001	2,025	2.025

#### VI.4 Ensayo de determinación de la complianza.

Se muestra en la Figura 46, donde están la prueba del artículo que se toma como referencia, la primera aproximación y las curvas de las pruebas visuales posteriores.

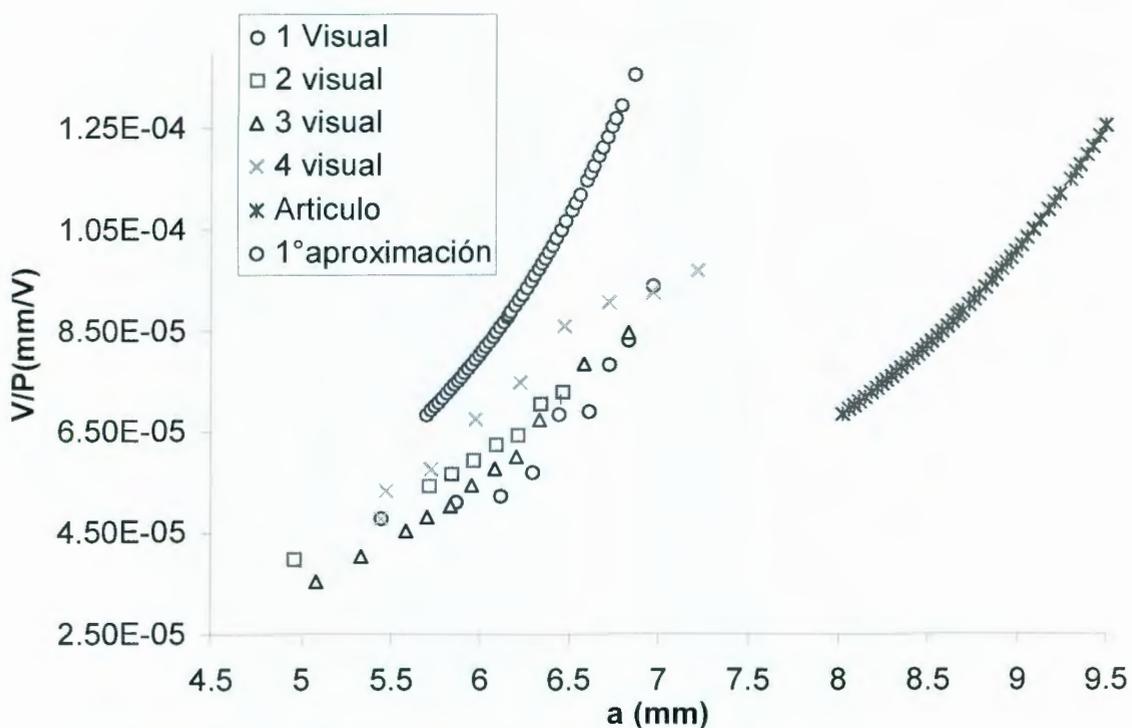


Figura 46. Curvas de los ensayos de complianza y la del artículo.

Cuadro 27. Funciones complianza de cada una de las curvas.

ENSAYO	FUNCIÓN COMPLIANZA	R
Artículo	$U_x = 3,198U^2 - 4,0595U + 1,1212$	1
1ª aproximación	$U_x = 2,5274U^2 - 3,1895U + 0,8801$	1
1ª visual	$U_x = 1,0207U^2 - 2,0712U + 0,7241$	0,981
2ª visual	$U_x = 4,6728U^2 - 4,1357U + 0,9547$	0,996
3ª visual	$U_x = 0,9105U^2 - 2,3874U + 0,7895$	0,995
4ª visual	$U_x = 9,6446U^2 - 5,8676U + 1,0982$	0,981

VI.5 Determinación de la constante (C).

Hoja de cálculos para obtener la constante (C), Cuadro 28.

Cuadro 28. Datos para la obtención de la constante C.

$(a_i + r_p^*)/mm$	a (mm)	$\Delta K$	$\frac{K_i}{K_0}$	$\ln \frac{K_i}{K_0}$	$\Delta a = (a_i - a_0)$
0.0000	5.1713	5.0000	1.0000	0.0000	0.0000
0.1379	5.3092	4.5000	0.9000	-0.1054	0.1379
0.1117	5.4210	4.0500	0.8100	-0.2107	0.2497
0.0905	5.5115	3.6450	0.7290	-0.3161	0.3402

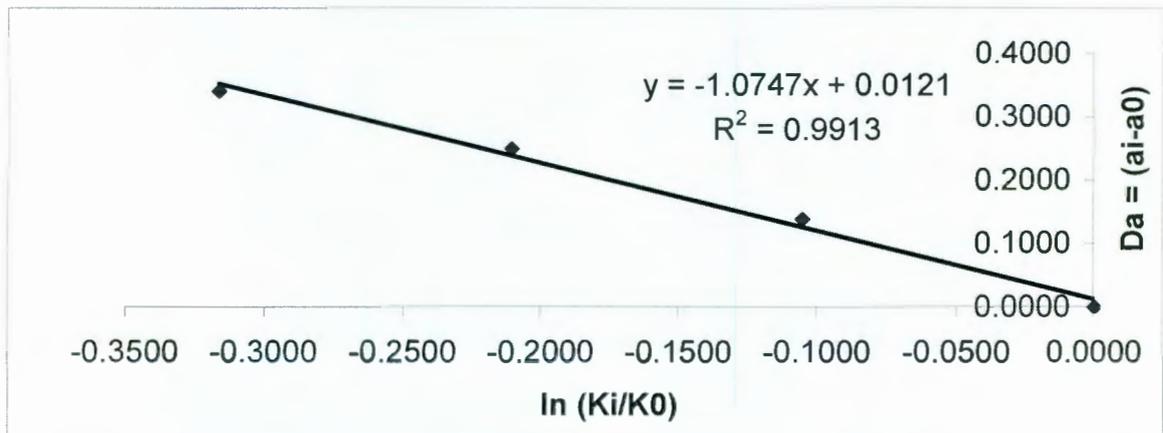


Figura 47. Curva para la determinación de la constante C.

Donde la pendiente de la curva es la constante, C, igual  $-1.0747$ .

## VI.6 Corrección por curvatura.

En el Cuadro 29 se muestra los resultados de la longitud final que se tubo en la probeta ensayada.

Cuadro 29. Longitudes de la grieta final de la probeta 1.

Probeta	Longitud (mm)	Longitud (mm)
N1	Derecho	Revez
1/4	8.6145	8.3726
1/2	8.5859	8.3580
3/4	8.2715	8.7297
Promedio	8.4906	8.4867
Promedio	8.48873	

En el Cuadro 30 se determinó el % de error por curvatura con el cual se hizo la corrección a las demás probetas

Cuadro 30. Determinación del % de error por curvatura.

	Longitud de grieta final $a(mm)_f$		
Probeta	Fisica	Complianza	% error
N1	8.542	7.595	11.0863

### VI.7 Ensayo del umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$ .

En la Figura 48 se ilustra el crecimiento de la grieta conforme el número de ciclos se incrementa, en la Figura 49 el decremento de la carga conforme se incrementan los ciclos de fatiga y por último en la Figura 49 se muestra la gráfica del primer ensayo realizado para la determinación del umbral de crecimiento de grieta en el aluminio A319

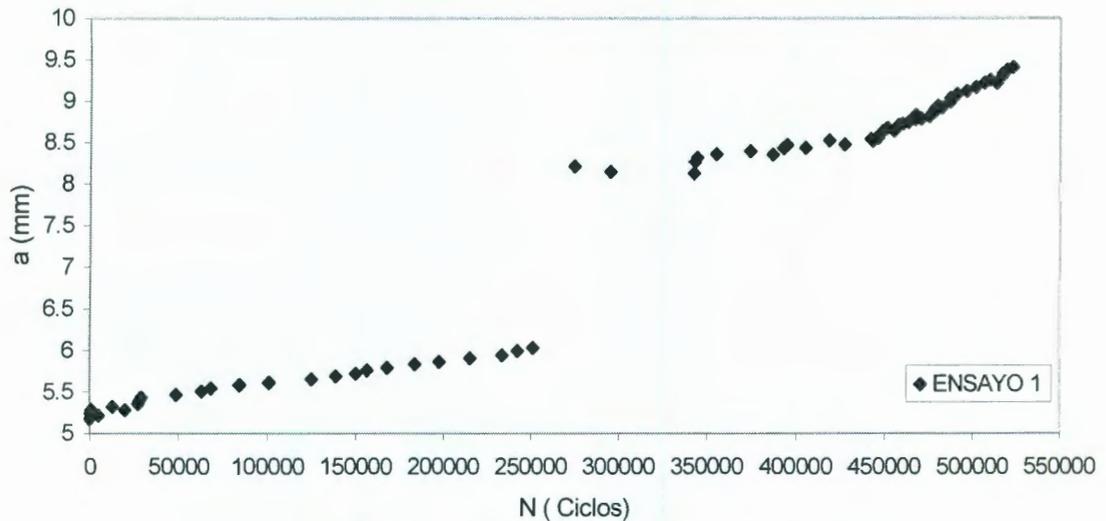


Figura 48. Crecimiento de la grieta vs número de ciclos.

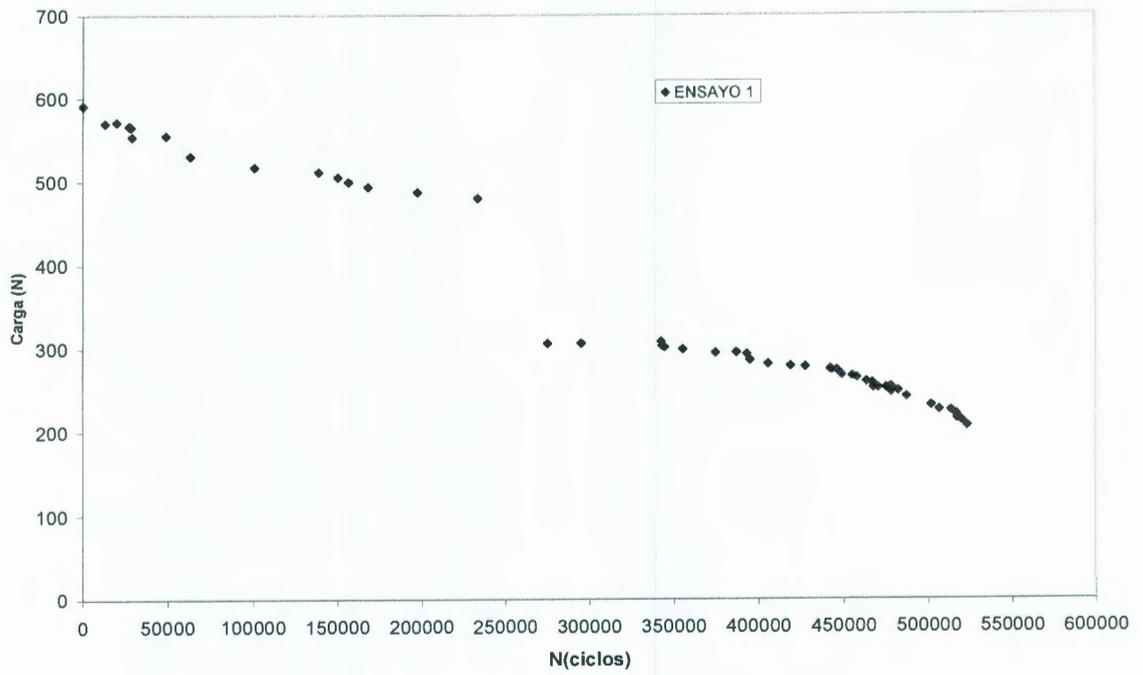


Figura 49. Carga (N) vs Nùmero de ciclos.

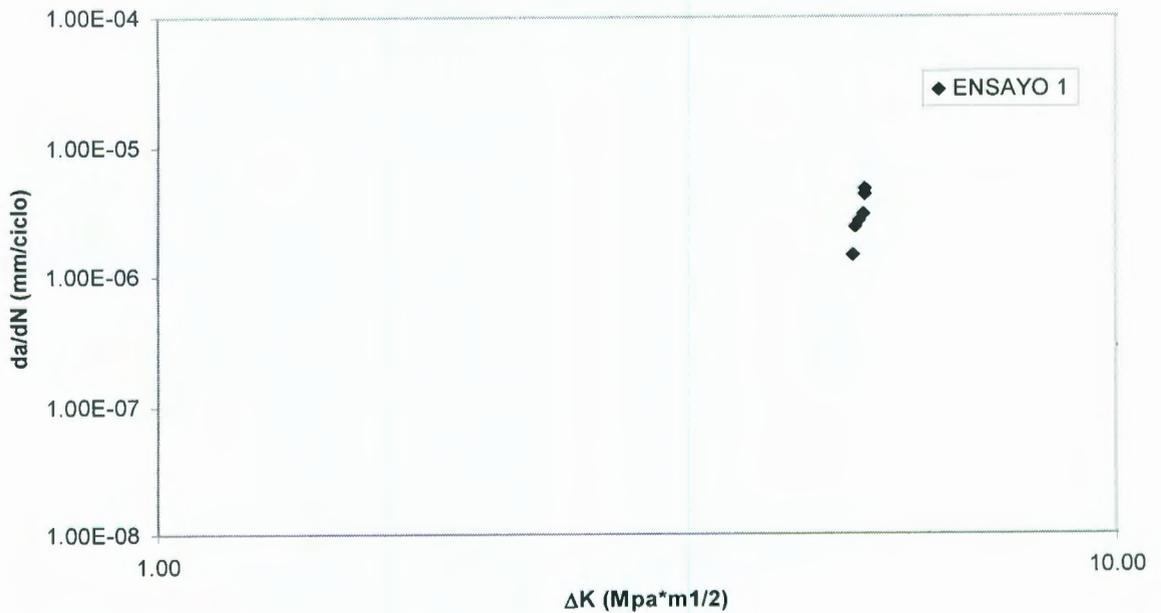


Figura 50. Curva del primer ensayo del umbral de crecimiento de grieta A319.

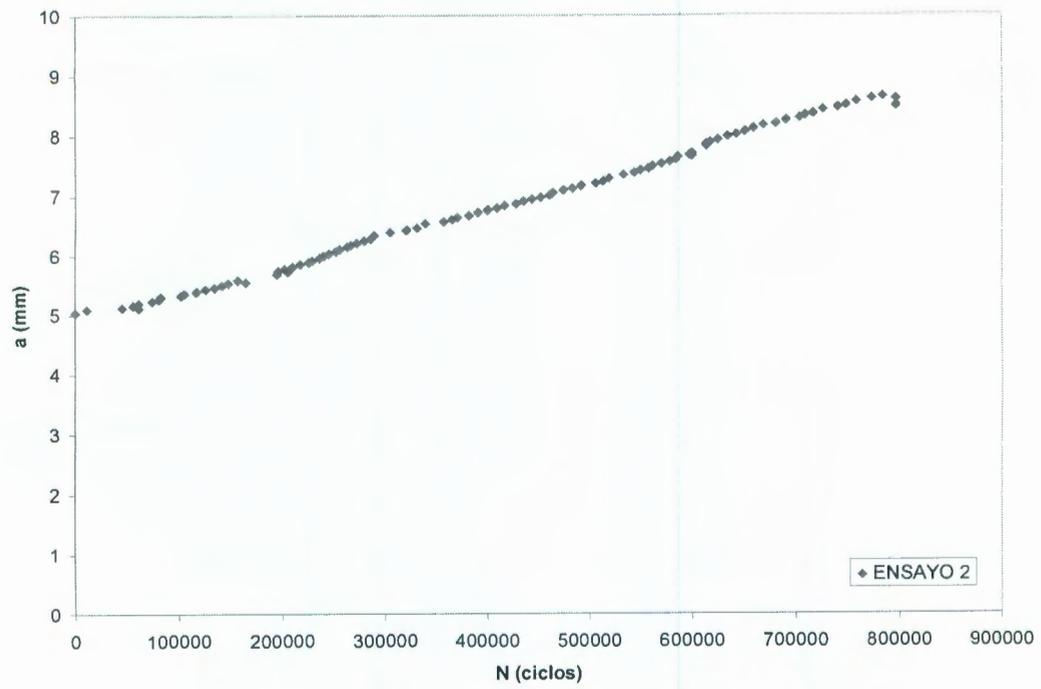


Figura 51. Crecimiento de la grieta vs número de ciclos.

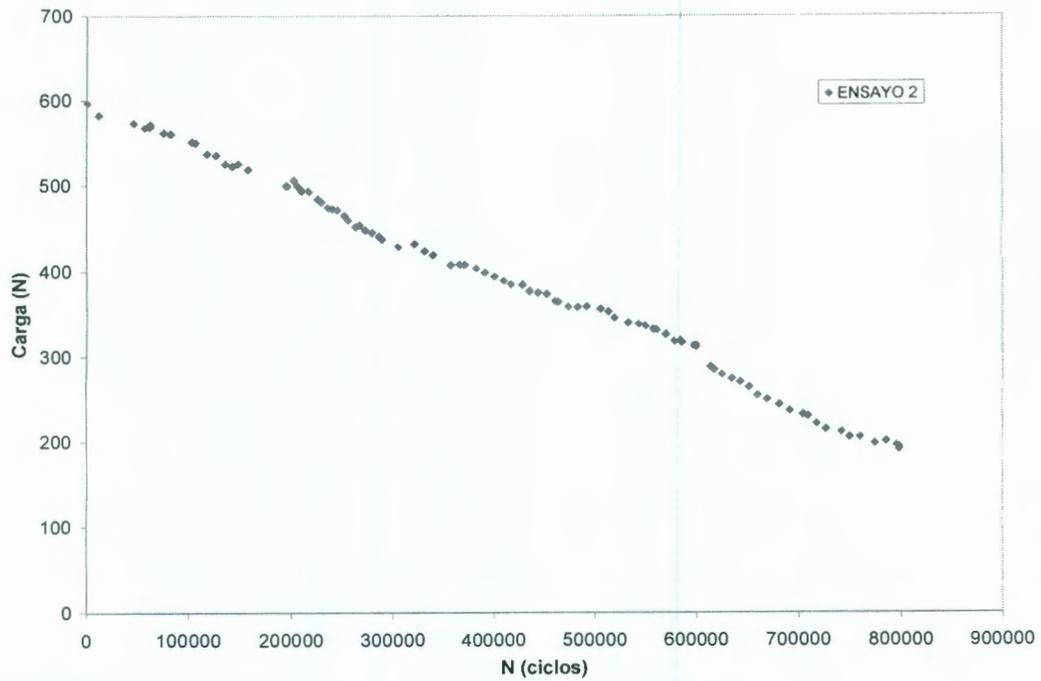


Figura 52. Carga (N) vs Nùmero de ciclos.

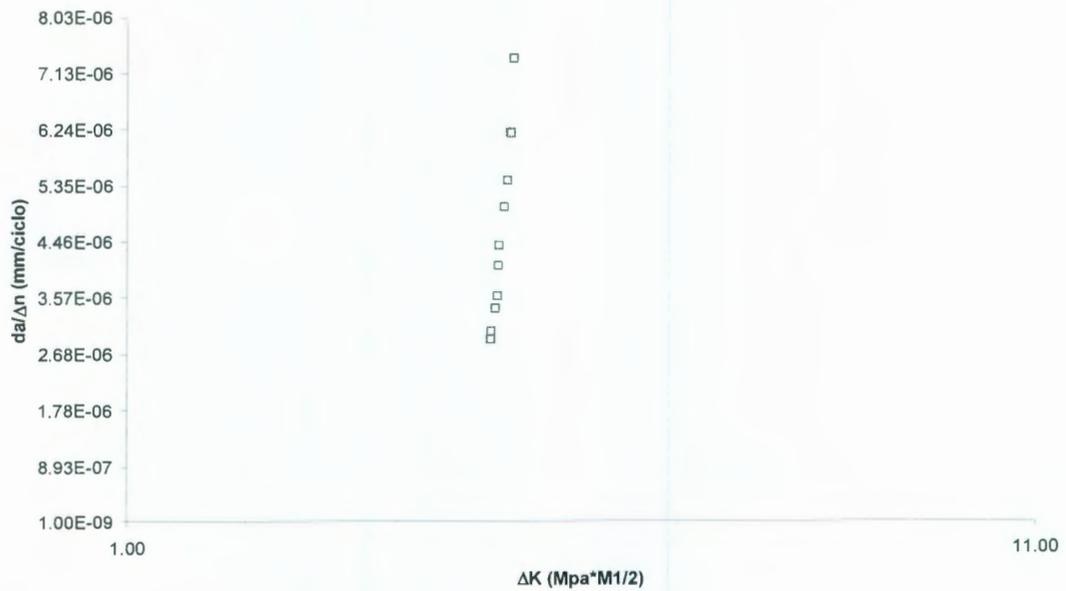


Figura 53. Curva del segundo ensayo del umbral de crecimiento de grieta A319.

## VII. DISCUSIONES

En este apartado se presenta un análisis de los resultados con los que reporta la bibliografía.

### VII.1 Análisis Químico.

Cuadro 31. Composición química del aluminio A319.

	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	Ni
A319	4.89	3.34		0.235	0.239	0.079		< 0,001	
A319*	5,5-6.5	3-4	1,0 max	0,05 max	0,1 max	1,0 max	0,25 max		0,35 max

A319\* Referencia bibliografía.

Aquí lo que se muestra que el contenido de Si y Zn están en menores proporciones a como lo indica la bibliografía, el Mn y Mg están en mayor proporción a como lo indica la bibliografía, el Cu es el único elemento que cumple con el parámetro de contenido de cobre.

### VII.2 Dureza

Cuadro 32. Propiedades del aluminio A319.

	Dureza	Esfuerzo ultimo de tensión	Modulo de Young
Ensayo	98.23 HB	155Mpa	97Mpa
Bibliografía	55-85	160 Mpa	90Mpa

### VII.3 Microestructura

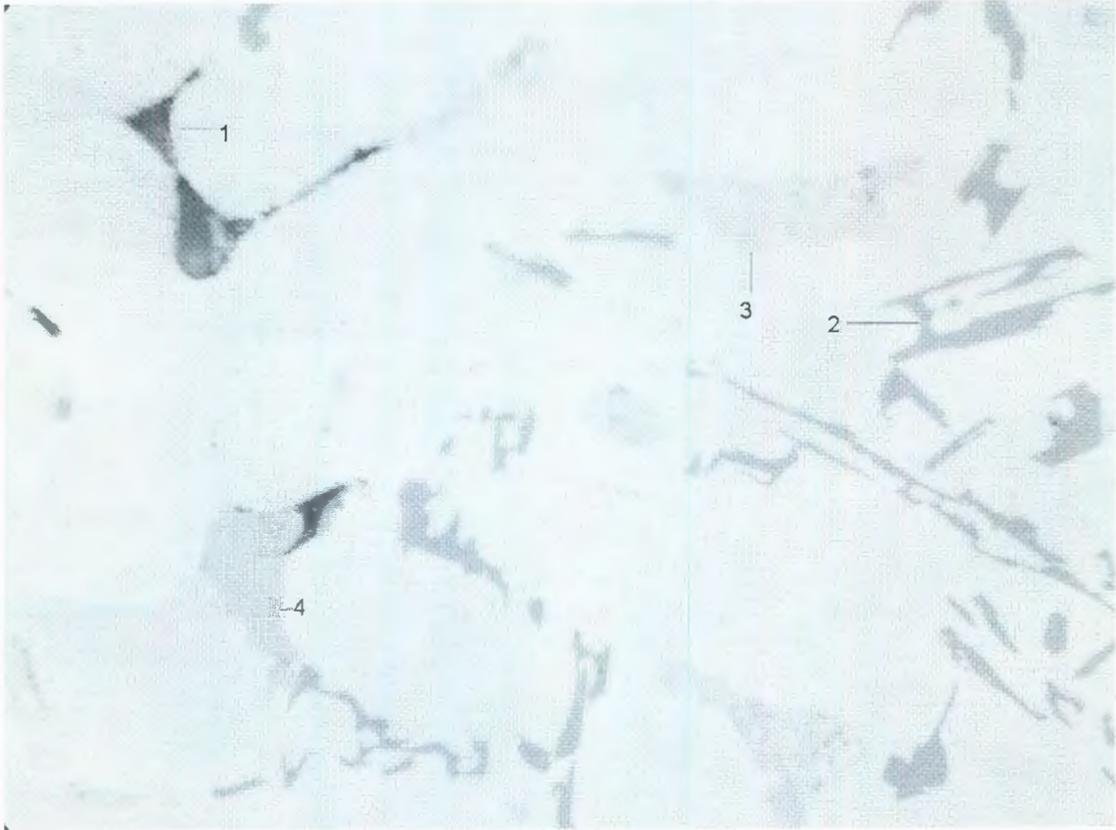


Figura 54. Microestructura del aluminio A319.

Aquí se están presentando cuatro diferentes reacciones a la hora de precipitarse, las cuales son:

4.-  $\alpha\text{Al}$  609 °C

1.-  $L \longrightarrow \alpha\text{Al} + \text{Al}_{15}\text{Mn}_3\text{Si}_2 + \text{Al}_5\text{FeSi}$  590°C

2.-  $L \longrightarrow \alpha\text{Al} + \text{Si} + \text{Al}_{15}\text{Cu} + \text{Al}_5\text{FeSi}$  525°C

3.-  $L \longrightarrow \alpha\text{Al} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{Cu} + \text{Al}_5\text{Mg}_6\text{Cu}_2\text{Si}_6$  525°C

Donde el eutéctico es  $\alpha\text{Al} + \text{Si}$  la reacción es  $L \longrightarrow \alpha\text{Al} + \text{Si}$  (558.3-555.4°C), el precipitado  $\text{Al}_2\text{Cu}$  tiene forma de eutéctico fino y el precipitado multifases  $\alpha\text{Al} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{Cu} + \text{Al}_5\text{Mg}_6\text{Cu}_2\text{Si}_6$

#### VII.4 Complianza

El criterio que se tomó para determinar cual es la función complianza correcta es con base a curva del artículo, es decir, su tendencia de crecimiento de la grieta, entonces se aplicó a las subsecuentes curvas que se hacen y se observa que en un inicio todos los ensayos parten casi del mismo punto, pero va creciendo la grieta, la curva se va abriendo y como es un ensayo visual está afectando en la medición.

#### VII.5 Umbral de crecimiento de grieta $\Delta K_{TH}$ .

El umbral de crecimiento de grieta se considera que es una banda y por tanto la magnitud es un rango, el cual en este caso es 4,5 a 5,4.

## VIII CONCLUSIONES

En la caracterización del material se determinó efectivamente que se está hablando de un aluminio A319 de acuerdo a su dureza, microestructura y propiedades mecánicas.

Se obtuvo la función complianza para las probetas de aluminio con espesor de 7 mm y se tiene una correlación adecuada, con relación a lo reportado en la literatura.

La función complianza obtenida experimentalmente se puede utilizar para pruebas de fatiga para determinar el umbral de crecimiento de grietas del aluminio A319

Se obtuvo un rango del umbral de crecimiento de grietas de  $4,5 - 5,4 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$

A partir de los coeficientes de la complianza es posible obtener las curvas de crecimiento de grieta en su etapa inicial, en forma automática con  $\Delta K$  decreciente.

La forma, tamaño y distribución de los precipitados en la fundición de aluminio, sí afecta en el crecimiento estable y el umbral de crecimiento de grieta.

El precipitado  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  es el más dañino. Los precipitados restantes solo le dan propiedades que no son perjudiciales a la aleación de aluminio A319.

## V. BIBLIOGRAFÍA

**Anderson, T. L. 1991.** Fracture Mechanics: fundamentals and applications. 1ra. ed., by CRC Press, Inc., United States of America: 3-107, 597-636.

**ASM, Handbook. 1997.** Fatigue and Fracture., Segunda impresión, Volume 19 editado por J.R. Davis, United States of America: 5-70, 371-379, 393-402, 771-820.

**ASM, Handbook. 1997.** Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose Materials., Segunda impresión, Volume 2 editado por J.R. Davis, United States of America: 3- 177.

**ASM, 1998.** Aluminum and Aluminum Alloys, Cuarta impresión, editado por J.R. Davis, United States of America: 18-55

**ASTM, 1989.** E 18-89. Standard Test Method for Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.

**ASTM, 1990** (Revision 1997). E 399-90. Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.

**ASTM, 1995.** B 645-95. Standard Practice for Plane-Strain Fracture Toughness Testing of Aluminum Alloys.

**ASTM, 1995.** E 3-95. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.

**ASTM, 2000.** E 647-00. Standard Test Method for Measurement of fatigue Crack Growth Rates.

**ASTM, 2000.** E 8-00. Standard Test Methods for tension testing of metallic materials".

**Avner, H Sydney. 1980.** Introducción a la Metalurgia Física. 2da ed., McGRAW-HILL, México: 381-394.

**Farahmand, B. 2004.**, [www.alphastarcorp-geoa.com/Publications/Chapter5.pdf](http://www.alphastarcorp-geoa.com/Publications/Chapter5.pdf).

**FEXA. 2004.** [http://www.fexa.com.ar/el\\_aluminio\\_a.asp](http://www.fexa.com.ar/el_aluminio_a.asp).

**González, V. J. L. 1998.** Apuntes de metalurgia mecánica. 1ra. ed., Edición del autor, México: 172-180.

**González, V. J. L. 1998.** Mecánica de Fractura, Bases y aplicaciones. 1ra. ed., Editorial Limusa, México:11-55.

**González ,V. J. L. 2004.** Mecánica de Fractura. 2da. ed., Editorial Limusa, México

**González ,V. J. L. 2004.** Metalurgia mecánica. 2da. ed. México.

**Guevara, J. 2004.** <http://www.monografias.com/trabajos13/tramat/tramat.shtml>.

**Janssen, M., Zuidema J., Wanhill R.J.H.. 2002.** Fracture Mechanics. Second edition. Delft University of Technology, U.S.A: 3-21.

**Key to steel, 2004.** <http://www.key-to-steel.com/ViewArticle.asp?ID=44>.

**Montgomery, D. C.1991.** Diseño y análisis de experimentos. 1ra ed., versión en español, Grupo editorial Iberoamericana. México: 13-39.

**Nicholson, D. 2000.** <http://www.mae.engr.ucf.edu/courses/eml6547/fracint.pdf>.

**Ponticel, P. 2005.** Vehicle mass took a back seat to aesthetics, functionality, and performance when automaker executives discussed the merits of their new products at the north American International Auto Show. SAE International, automotive engineering international.:Vol. 113, No 01: 58-64.

**Prodigyweb, 2004.** <http://www.prodigyweb.net.mx/degcorp/Quimica/Aluminio.htm>

**Roylance,D. 2001.** [http://mmd.sdsmt.edu/fracture\\_text/frac.pdf](http://mmd.sdsmt.edu/fracture_text/frac.pdf).

**Shivakumar, K.** [www.ncat.edu/~ccmradm/Dr\\_homepage/courserev860.htm](http://www.ncat.edu/~ccmradm/Dr_homepage/courserev860.htm)

**Vander, G.F.** Metallography Principles and Practice. McGraw-Hill Book Company 610 – 611.

**VELASCO,S.2000.**[www.repsolypf.com/esp/bienvenidoalinfinito/casayhogar/ahorrar\\_ygestionar/reportajes/energiasdomesticas/energiasdomesticas.asp?PaginaID=28742&Nivel=C](http://www.repsolypf.com/esp/bienvenidoalinfinito/casayhogar/ahorrar_ygestionar/reportajes/energiasdomesticas/energiasdomesticas.asp?PaginaID=28742&Nivel=C).