



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DOCTORADO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DEL INICIO Y
CRECIMIENTO DE FISURAS EN MATERIALES
POLÍMEROS INDUSTRIALES, SOMETIDOS A BAJAS Y
ALTAS FRECUENCIAS EN FATIGA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

M. C. ERASMO CORREA GÓMEZ

ASESOR:

DR. GONZALO M. DOMÍNGUEZ ALMARAZ

DOCTOR EN ENERGÉTICA

MORELIA, MICH. MARZO DE 2018



DEDICATORIA

*A mi esposa, Karla Guadalupe Solís Perea
A mis padres. Raquel Gómez Tapia
Erasmó Correa González*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por brindarme la oportunidad y tiempo para alcanzar un logro más en la vida.

A mi esposa, por todo el apoyo y entusiasmo que ha puesto con mi preparación y toda la paciencia durante este proceso de aprendizaje.

A mis padres, por sus constantes consejos y comprensión y por el camino que me ensañaron para generar en mi un carácter de responsabilidad y superación.

A mis hermanas, por toda la paciencia y motivación que me han dado para continuar preparándome profesionalmente.

A mi asesor de tesis, Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz. Por los años que ha dedicado en prepararme y apoyarme para la culminación del presente proyecto.

A mi comité Sinodal, por el tiempo que dedicaron a la revisión del trabajo y sus acertadas sugerencias para llevar a buenos términos la investigación.

Expreso mi agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) por las facilidades recibidas para la realización del presente estudio.

Una mención especial de gratitud al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el soporte financiero otorgado para la realización del presente trabajo.

RESUMEN

Se llevaron a cabo ensayos de fatiga en materiales plásticos de uso industrial con la finalidad de estudiar los parámetros físicos que afectan la aparición y propagación de fisuras en elementos mecánicos sometidos a cargas oscilantes por debajo de su límite elástico. El ensayo de fatiga es uno de los elementos principales en el entendimiento de fractura y es la fuente de información principal que se emplea en la presente investigación para encontrar la relación correspondiente con la Mecánica de la Fractura.

Se realizaron ensayos bajo la condición de desplazamiento constante en especímenes de prueba compactos de tensión (CT), de acuerdo a la norma ASTM E647-00 con la finalidad de estudiar el inicio y propagación de fisuras en dos materiales polímeros: acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y polimetil metacrilato (PMMA), bajo la modalidad de fatiga convencional. Los ensayos fueron llevados a cabo en un equipo experimental desarrollado y construido como parte del proyecto de investigación trabajando a desplazamiento constante con una frecuencia de operación de 0.25 Hz. y a un máximo desplazamiento de 390 μm . El control de desplazamientos fue implementado mediante una tarjeta ARDUINO y su correspondiente código de programación, acoplado a un sensor del tipo inductivo que permite mediciones con una precisión de $\pm 4 \mu\text{m}$. Adicionalmente, se llevaron a cabo ensayos de fatiga ultrasónica en el material ABS. A la par de los ensayos, se calcularon el factor de intensidad de esfuerzos (K) y la tasa de liberación de energía (G). Tanto el factor K como G, son estudiados para ambos materiales con la finalidad de establecer sus valores correspondientes a lo largo de una fisura en la totalidad de su propagación durante el ensayo, así como, de establecer su correspondiente relación dependiendo de la vida en fatiga de dichos polímeros. Una parte relevante del entendimiento de la fractura, es el análisis de las superficies de fisuración, las cuales fueron analizadas mediante microscopía electrónica, con la finalidad de investigar los parámetros generales de la aparición y propagación de fisuras bajo las condiciones descritas.

Palabras clave: Fatiga ultrasónica, Fatiga convencional, Mecánica de la fractura, Materiales polímeros, Ensayos a desplazamiento constante.

ABSTRACT

Fatigue tests were carried out on industrial polymeric materials in order to study the physical parameters that affect the beginning and propagation of cracks in mechanical elements subject to oscillating loads below their yield stress. The fatigue test is one of the main elements in the understanding of fracture and is the main information source used in the present investigation to find the corresponding relationship with Fracture Mechanics.

Constant displacement tests on CT specimen (compact tension specimen), according to the ASTM E647-00 standard, were carried out in order to investigate the crack initiation and propagation for two polymeric materials: the ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) and PMMA (Polymethyl methacrylate). Experimental tests were obtained on a self-designed and constructed machine working under constant displacement, at the frequency of 0.25 Hz and at maximum displacement of 390 μm . The displacement control was implemented using the Arduino program, a personal computer and an inductive proximity sensor, which allow determining the displacement with $\pm 4 \mu\text{m}$ of precision. The stress intensity factor in mode one KI, was obtained for different crack length “a”, different amplitudes of displacement and for the two studied polymeric materials. In addition, from the obtained stress intensity factors in mode one was evaluated the energy release rate G for plane stress and plane strain conditions. Finally, the fracture surfaces were analyzed by scanning electron microscope in order to investigate the general trends and the origin of crack initiation and propagation under the described loading conditions.

Keywords: Ultrasonic fatigue, Conventional fatigue, Fracture mechanics, Polymeric materials, Tests under constant displacement.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
ÍNDICE GENERAL.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
GLOSARIO.....	14
NOMENCLATURA.....	15
ANTECEDENTES.....	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
OBJETIVO GENERAL.....	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
JUSTIFICACIÓN.....	20
HIPÓTESIS.....	21
METODOLOGÍA.....	22
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	25
1.1 FATIGA MECÁNICA.....	25
1.1.1 La curva de Wöhler.....	26
1.1.2 La curva Coffin-Manson o gráfica $\epsilon - N$	27
1.1.3 Ley de Paris.....	28
1.2 MECÁNICA DE LA FRACTURA.....	30

1.3 MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA	32
1.3.1 Relación de Griffith.....	32
1.3.2 Modificación de Irwin a la relación de Griffith.....	34
1.3.3 Factor de intensidad de esfuerzos.....	35
1.3.4 Tasa de liberación de energía (G).....	38
1.3.2 Mecánica de la fractura elasto-plástica.....	41
CAPÍTULO 2. MATERIALES DE ESTUDIO	45
2.1 ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS)	45
2.1.1 Componentes del ABS.....	47
2.1.2 Principales propiedades del ABS.	48
2.2 POLIMETIL METACRILATO (PMMA)	48
2.3 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA.....	51
2.3.1 Perfil para ensayos en fatiga ultrasónica	51
2.3.2. Perfiles para ensayos en fatiga convencional	52
CAPÍTULO 3. EQUIPO EXPERIMENTAL	54
3.1 EQUIPO EXPERIMENTAL DE FATIGA ULTRASÓNICA.....	54
3.2 EQUIPO EXPERIMENTAL DE FATIGA CONVENCIONAL	56
3.2.1 Pistón	58
3.2.2 Motor a pasos	59
3.2.3 Estructura de soporte	60
3.2.4 Barras de deslizamiento.....	60
3.2.5 Placa deslizante.....	61
3.2.6 Sistema de control.	62
3.3 SISTEMA DE CONTROL PARA EQUIPO EXPERIMENTAL.....	63

3.4 CALIBRACIONES DE DESPLAZAMIENTOS INDUCIDOS POR EQUIPO EXPERIMENTAL	68
3.4.1. Calibraciones con desplazamiento continuo.....	69
3.4.2 Calibraciones con desplazamiento alternativo	72
CAPÍTULO 4. ENSAYOS EXPERIMENTALES	74
4.1 FATIGA ULTRASÓNICA	74
4.1.1 Simulación numérica para obtener K y J.....	77
4.2 FATIGA CONVENCIONAL.....	82
4.2.1 Especímenes de prueba.....	83
4.2.2 Desplazamiento inducido permisible.....	85
4.2.3 Configuración de ensayo experimental	89
4.2.4 Obtención de la carga P mediante elementos finitos.....	92
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	96
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS	96
5.2 SUPERFICIES DE FISURACIÓN	101
CONCLUSIONES.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ACCIONES DE DIFUSIÓN	118
a. REVISTAS ARBITRADAS Y MEMORIAS DE CONGRESOS	118
b. PRESENTACIONES EN CONGRESOS.	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Curva σ -N para una aleación de aluminio.	27
Figura 1. 2. Curva de Coffin- Manson	27
Figura 1. 3. Comportamiento en fatiga de materiales metálicos [15].	29
Figura 1. 4. Modelos de Griffith para fractura en materiales frágiles.	32
Figura 1. 5. Modos de aplicación de carga. a) Apertura, b) Cizalladura, c) Rasgadura.	36
Figura 1. 6. Perfil de ensayos CT.	38
Figura 1. 7. Gráfica representativa de la energía de relajación para el crecimiento de una fisura.	39
Figura 1. 8. Trayectoria arbitraria para el balance de la energía potencial en una placa plana con una fisura en uno de sus costados.	42
Figura 1. 9. Desplazamiento de apertura en el frente de fisura.	43
Figura 2. 1. Estructura del ABS.	48
Figura 2. 2. Estructura del PMMA.	50
Figura 2. 3. Medidas (mm) para especímenes de prueba de material ABS en fatiga ultrasónica.	52
Figura 2. 4. Frecuencia natural para un espécimen de ABS.	52
Figura 2. 5. Probetas compactas de tensión (CT).	53
Figura 3. 1. Conjunto piezoeléctrico, booster y sonotrodo.	55
Figura 3. 2. Generador de alta frecuencia.	55
Figura 3. 3. Acoplamiento de probeta a sonotrodo. Consideración de aplicación de carga.	56
Figura 3. 4. Propuesta inicial de dispositivo experimental.	57
Figura 3. 5. Propuesta preliminar de construcción.	57
Figura 3. 6. Actuador lineal de 6 in. de longitud.	58
Figura 3. 7. Dimensiones del actuador lineal.	59

Figura 3. 8. Motor a pasos unipolar.....	59
Figura 3. 9. Estructura de soporte.....	60
Figura 3. 10. Guías de deslizamiento.	61
Figura 3. 11. Placa deslizante.	62
Figura 3. 12. Tarjeta ARDUINO.	62
Figura 3. 13. Versión preliminar de equipo experimental.....	63
Figura 3. 14. Primera etapa de control.	64
Figura 3. 15. Actuador lineal acoplado a un motor a pasos.	64
Figura 3. 16. Configuración final de actuador con motor a pasos.....	65
Figura 3. 17. Diagrama de conexiones.	66
Figura 3. 18. Plataforma de control ARDUINO.	66
Figura 3. 19. Incorporación de sensor inductivo.	68
Figura 3. 20. Gráficas, desplazamiento a diferentes velocidades angulares, a) 5 RPM, b) 10 RPM.....	72
Figura 4. 1. Efecto de la condición de resonancia en un espécimen de prueba.....	75
Figura 4. 2. Localización de la fisuración en perfiles de ensayo de material ABS.	76
Figura 4. 3. Resultados en fatiga ultrasónica para material ABS.....	77
Figura 4. 4. Propiedades geométricas de los especímenes de prueba.	77
Figura 4. 5. Elemento de análisis.	78
Figura 4. 6. Esfuerzo de Von Mises con 14 μm de desplazamiento.	78
Figura 4. 7. Zona de análisis para determinar la integral J y el factor K.....	79
Figura 4. 8. Comportamiento de los parámetros de interés. a) Factor de intensidad de esfuerzos, b) integral J.....	82
Figura 4. 9. a) Dimensiones de espécimen CT, b) Norma ASTM E647-00.....	83
Figura 4. 10. a) Especimen CT para ABS, b) Especimen CT para PMMA.	84
Figura 4. 11. Longitud de fisura a total.....	84
Figura 4. 12. Esfuerzos y desplazamientos a partir de una carga nominal $P=500$ N en material ABS.	85

Figura 4. 13. Esfuerzos y desplazamientos a partir de una carga nominal $P=250$ N en material PMMA.....	86
Figura 4. 14. Esquema de ubicación y aplicación de desplazamiento uniforme inducido..	87
Figura 4. 15. Generalidades de programación ARDUINO.	88
Figura 4. 16. Medición de desplazamiento utilizando sensor inductivo.	89
Figura 4. 17. a) Equipo experimental, b) Sensor inductivo de desplazamientos.....	90
Figura 4. 18. Espécimen CT de PMMA acoplado a las barras de sujeción.	90
Figura 4. 19. Probetas empleadas para ensayos de fatiga convencional y crecimiento de fisura.	91
Figura 4. 20. Comportamiento preliminar de aparición y propagación de fisuras.	91
Figura 4. 21. Modelo numérico del espécimen empleado (CT).....	92
Figura 4. 22. Perfil original de análisis.	93
Figura 4. 23. Geometría de análisis.	93
Figura 4. 24. Solución particular para un espécimen de ABS a $390 \mu\text{m}$	93
Figura 4. 25. Propagación de una fisura desde su condición inicial.....	94
Figura 4. 26. Evolución de P a partir de la adimensionalización del crecimiento de grieta a/W , para ABS y PMMA usando diferentes desplazamientos.	95
Figura 5. 1. Factor de intensidad de esfuerzos K_I , a partir de los modelos propuestos.	96
Figura 5. 2. Tasa de relajación de energía (G) considerando esfuerzo plano.....	97
Figura 5. 3. Tasa de relajación de energía (G) considerando deformación plana.	97
Figura 5. 4. Evolución de la medida en la zona de daño (zona de agrietamiento) localizada en el frente de fisura.	98
Figura 5. 5. Número de ciclos de ensayo correspondientes a cada longitud de fisura.	99
Figura 5. 6. Propagación de fisuras representativas en material ABS con un desplazamiento de $370 \mu\text{m}$	100
Figura 5. 7. Propagación de fisuras representativas en material PMMA con un desplazamiento de $340 \mu\text{m}$	100
Figura 5. 8. Muestras representativas de ABS a los distintos desplazamientos inducidos.	101

Figura 5. 9. Muestras representativas de PMMA a los distintos desplazamientos inducidos.	102
Figura 5. 10. Superficie superior de fisuración en ABS a 390 μm	102
Figura 5. 11. Superficie inferior de fisuración en ABS a 390 μm	102
Figura 5. 12. Superficie superior de fisuración en ABS a 370 μm	103
Figura 5. 13. Superficie inferior de fisuración en ABS a 370 μm	103
Figura 5. 14. Superficies de fisura en ABS, con 370 μm de desplazamiento.	105
Figura 5. 15. Superficie superior de fisuración en PMMA a 340 μm	105
Figura 5. 16. Superficie inferior de fisuración en PMMA a 340 μm	105
Figura 5. 17. Superficie superior de fisuración en PMMA a 300 μm	106
Figura 5. 18. Superficie inferior de fisuración en PMMA a 300 μm	106
Figura 5. 19. Superficie superior de fisuración en PMMA a 270 μm	106
Figura 5. 20. Superficie inferior de fisuración en PMMA a 270 μm	107
Figura 5. 21. Superficies de fisura de PMMA. Con 340 y 270 μm de desplazamiento.	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Régimen de análisis de fractura en diversos materiales [2].....	31
Tabla 2. 1. Propiedades mecánicas del material ABS (Estándar).....	48
Tabla 2. 2. Propiedades mecánicas del material PMMA (Estándar).	50
Tabla 3. 1. razón de velocidades con relación al acoplamiento del motorreductor.	67
Tabla 3. 2. Desplazamientos lineales en relación a una velocidad angular de 5 RPM.....	69
Tabla 3. 3. Desplazamiento lineal promedio a 5 RPM.	70
Tabla 3. 4. Desplazamientos lineales en relación a una velocidad angular de 10 RPM.....	70
Tabla 3. 5. Desplazamiento lineal promedio a 10 RPM.	71
Tabla 4. 1. Esfuerzos inducidos en la zona estrecha de la probeta.	79
Tabla 4. 2. Resultados para J y K a distintos niveles de carga.	80
Tabla 4. 3. Resultados para K y J a una presión aplicada de 1.67 MPa.	81
Tabla 4. 4. Resultados para K y J a una presión aplicada de 2.505 MPa.	81
Tabla 4. 5. Resultados para K y J a una presión aplicada de 3.34 MPa.	81
Tabla 4. 6. Desplazamiento máximo permitido en especímenes de ensayo.	87
Tabla 4. 7. Desplazamientos inducidos en espécimen de prueba.	88

GLOSARIO

Deformación elástica. O reversible. El cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.

Deformación plástica. O irreversible. Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada.

Disipación térmica. Capacidad de rechazo del calor generado o absorbido.

Esfuerzo. Es el término que se emplea para definir la intensidad y la dirección de las fuerzas internas que actúan en un punto dado sobre un plano particular.

Fatiga mecánica. Se entiende como: el sometimiento a un elemento o sistema mecánico a cargas oscilantes que no exceden el límite elástico del material.

Factor de intensidad de esfuerzos. Energía disponible para fracturas un material debida a los esfuerzos y campos de desplazamiento en función de la geometría y las condiciones de carga.

Flexibilidad (compliance). Facilidad que tiene un material para doblarse sin romperse.

Fractura. Es la separación de un sólido bajo tensión en dos o más piezas.

Frecuencia natural. La frecuencia natural es la frecuencia a la que un sistema mecánico seguirá vibrando, después que se quita la señal de excitación.

Longitud de fisura.

Módulo de elasticidad. Constante que relaciona la tensión aplicada a un cuerpo y su deformación, en el rango de deformación elástica.

Resonancia mecánica. Fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de vibración coincide con el periodo de vibración característico (o frecuencia propia) de dicho cuerpo.

Rigidez. Medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, que contempla la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones.

Tasa de liberación de energía. Ritmo de crecimiento de la fractura que considera la energía necesaria para su propagación y que se relaciona con el estado de esfuerzos en el frente de fisura. Se evalúa como la variación en la deformación elástica por unidad de área en el frente de fisura.

NOMENCLATURA

- a, Longitud total de fisura para especímenes CT.
 a_1 , Longitud de fisura inicial.
 a_0 , Fisura propagada.
 A y m , Constantes para el cálculo de la velocidad de crecimiento de fisura dependiendo del material.
ABS, Acrilonitrilo butadieno estireno
 B , Espesor para especímenes CT.
 C , Flexibilidad o complianza de un material.
CT, Especimen de ensayos compacto de tensión.
 dA , Un elemento de área dentro de S .
 $\frac{da}{dN}$, Pendiente de la curva de velocidad de crecimiento.
 ds : Un elemento de arco de la curva S .
 E , Módulo de elasticidad.
 G , Tasa de liberación de energía.
 J , Tasa de liberación de energía.
 N , Número de ciclos en fatiga mecánica.
 N_f , Número de ciclos hasta fractura.
 K , Factor de intensidad de esfuerzos.
 P , Carga aplicada.
PMMA, Polimetil metacrilato.
 r , Zona de daño en especímenes CT.
 S : Curva arbitraria que une el lado superior al inferior de una fisura en un elemento de analisis.
 T : El vector de tracción en la curva S , definido en relación a la normal a la curva.
 u : Vector de desplazamiento.
 U_{app} , Energía potencial de las fuerzas aplicadas.
 U_e , Energía potencial de deformación almacenada.
 U_M , Energía mecánica potencial total.
 w , Energía por unidad de volumen.
 W , Longitud de análisis para especímenes Compactos de tensión (CT).
 Y , Parámetro relacionado con las condiciones geométricas del cuerpo donde se aloja la fisura, así como la talla de la fisura.

Letras griegas.

- ϵ , Deformacion.
 $\epsilon'_{f\sim}$, Deformación máxima con ruptura instantánea.
 ρ , Densidad.
 σ , Esfuerzo aplicado.
 σ_Y , Esfuerzo de cedencia.
 σ_N , Esfuerzo nominal.
 ν , Relación de Poisson.

ANTECEDENTES

En la FIM – UMSNH han sido llevados a cabo estudios sobre la resistencia a la fatiga en materiales industriales, cuyos resultados han contribuido a responder algunas interrogantes, tales como ¿cuál es la vida útil de un material a cierto nivel de carga?, ¿cómo afecta el factor concentrador de esfuerzos dicha vida útil? O ¿qué tanto se reduce la vida útil de un material sometido a cierto nivel de carga cuando es atacado por la corrosión?, en otras palabras, se han obtenido las gráficas esfuerzo-número de ciclos, mejor conocidas como gráficas de Wöhler, para los diferentes materiales estudiados tales como: Aleaciones de aluminio 6061-T6 y 6063-T5, aceros 1018 y 4140, acero inoxidable 304 y polímeros nylon 6 y ABS. Los trabajos previos han contribuido a la comprensión de la vida en fatiga de los materiales antes mencionados; en la presente investigación se abordará particularmente el análisis de los mecanismos físico para la iniciación y crecimiento de fisuras en materiales polímeros sometidos a cargas por fatiga de baja y muy alta frecuencia.

Las fallas por ruptura asociadas a la sollicitación de cargas oscilantes (fatiga mecánica) en componentes y en sistemas mecánicos industriales, constituyen actualmente un factor de importancia tecnológica, económica y de seguridad. Estimaciones sobre las pérdidas económicas en un país de referencia como los Estados Unidos de América, revelan que los costos por ruptura en elementos o estructuras sobrepasaron los cien mil millones de dólares anuales en 1982, según un estudio llevado a cabo por el “Batelle Columbus Laboratories” [1]. En México esta información es inexistente, aunque el muy limitado número de especialistas en Fatiga Mecánica y en Mecánica de la Fractura, permiten sondear un importante potencial tecnológico y económico en el desarrollo de esta disciplina científica.

El diseño de estructuras que no se fracturen, es una idea que ha prevalecido desde la antigüedad; el hecho de que muchas estructuras solicitadas por faraones del antiguo Egipto y Los Cesares de Roma aún permanecen en pie, son prueba de la habilidad de arquitectos e ingenieros de esas épocas [2].

Algunos de los experimentos llevados a cabo por Leonardo Da Vinci, como parte de los primeros experimentos registrados en mecánica de la fractura; marcaron el rumbo de esta disciplina. Sus investigaciones consistieron en medir la resistencia de alambres de hierro, concluyendo que la resistencia era inversamente proporcional a su longitud [2] [3].

Durante la primera guerra mundial, comenzó a desarrollarse la mecánica de la fractura con trabajos del ingeniero aeronáutico inglés Alan Arnold Griffith para explicar el fallo de materiales frágiles [4]. Hacia 1920, Griffith publicó su primera investigación y estableció un modelo que permitía un análisis apropiado de materiales frágiles tales como el vidrio o los cerámicos, pero que no pudo ser aplicado en metales hasta 20 años después con la modificación de su modelo.

El estudio de mecánica de la fractura progresaba en la época de la segunda guerra mundial con la inquietud de investigar lo que sucedía con los buques Liberty [5].

El trabajo de Griffith fue ignorado por los investigadores durante largo tiempo [6] y fue hasta los años 50 cuando el doctor George Rankine Irwin lideró un grupo de investigación para estudiar los trabajos previos y ampliar los postulados de Griffith hacia los metales [7].

Debido a que la mayoría de las investigaciones en Mecánica de la Fractura a lo largo de la historia, se ha centrado en el estudio de los metales, la presente investigación del inicio y propagación de fisuras bajo cargas mecánicas oscilantes en materiales polímeros se abordará con el apoyo de la infraestructura experimental desarrollada en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH en los últimos 6 años; particularmente, la máquina de ensayos en fatiga en flexión rotativa patentada en 2010 [8], así como de la máquina de fatiga ultrasónica desarrollada igualmente en la Facultad y en proceso de solicitud de patente, además de un equipo en desarrollo para ensayos de torsión- flexión. Los trabajos en esta tesis Doctoral comprenderán ensayos experimentales apegados a estándares internacionales, así como algunas modelizaciones numéricas en Mecánica de la Fractura que reforzarán el aspecto teórico-experimental de la memoria escrita [9].

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis de la aparición y crecimiento de fisuras en materiales industriales es de particular importancia, no solo desde el punto de vista científico y tecnológico, sino también económico y de seguridad en las estructuras y las personas. Esto último estrechamente relacionado con el sector de los transportes terrestres, aéreos y marítimos (industria automotriz, aeronáutica, marítima).

El estudio de la aparición de fisuras en materiales industriales y su duración en fatiga mecánica bajo cargas oscilantes, puede abordarse a partir de los diferentes modelos estudiados en Mecánica de la Fractura: la curva clásica de esfuerzo- número de ciclos o curva de Wöhler, la curva de esfuerzo-deformación o curva de Coffin-Manson y el análisis de crecimiento de fractura en función del factor de intensidad de esfuerzos o relación de Paris-Gomez-Anderson.

OBJETIVO GENERAL

Analizar los mecanismos y algunos parámetros físico del inicio y propagación de fisuras en diversos materiales polímeros de uso industrial, sometidos a condiciones de fatiga en alto y bajo número de ciclos en referencia a la norma internacional ASTM E647.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener los parámetros que generan la aparición de fisuras en los materiales estudiados.
2. Obtener el régimen de crecimiento de fisuras mediante el cálculo de la relación entre el rango del factor de intensidad de esfuerzos y la tasa de crecimiento de la fractura con el número de ciclos en fatiga.
3. Respaldar mediante simulación numérica algunas evaluaciones de modelos matemáticos o empíricos de mecánica de la fractura.

JUSTIFICACIÓN

El número de especialistas en Mecánica de la Fractura en México es considerablemente reducido; no obstante, la importancia tecnológica, científica, económica y de seguridad relacionados con los elementos y los sistemas mecánicos involucrados con fallas por fractura. El sector de la energía y del transporte están estrechamente relacionados con el avance de esta disciplina científica, aunque otras muy diversas aplicaciones industriales se relacionan con el estudio de Fatiga y Mecánica de la Fractura, como: aparatos electrodomésticos, herramientas de todo tipo, cerrajería, equipos agrícolas, industria del azúcar, del cemento, industria papelera, del vidrio, de la cerveza, por mencionar algunos ejemplos. Con esta propuesta de tesis Doctoral se pretende abordar una temática poco desarrollada en el país, para materiales polímeros empleados en aplicaciones industriales. El análisis de inicio y crecimiento de fisuras en estos materiales se abordará bajo la óptica de ensayos con cargas cíclicas convencionales (fatiga convencional) y también bajo cargas oscilantes de muy alta frecuencia (fatiga ultrasónica). Es pertinente mencionar que los ensayos en fatiga ultrasónica de materiales poliméricos son prácticamente desconocidos a nivel mundial en la actualidad; la bibliografía indica que los resultados obtenidos en la facultad de ingeniería mecánica de la UMSNH, son los primeros en el mundo.

El estudio sistemático de la aparición de fisuras bajo cargas mecánicas representando condiciones reales de uso, es la alternativa científica para la comprensión del inicio y propagación de fisuras que pueden llegar a fracturas catastróficas en elementos o sistemas mecánicos industriales.

HIPÓTESIS

Es posible conocer los mecanismos de la aparición y propagación de fisuras en materiales polímeros de uso industrial, mediante el control de los parámetros geométricos de los especímenes de prueba, la carga aplicada y de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales de estudio al realizar ensayos de fatiga a bajo y alto número de ciclos.

METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo de este proyecto está constituida por los siguientes elementos:

- a) Llevar a cabo una búsqueda bibliográfica exhaustiva relacionada con el tema propuesto, en un periodo comprendido en el primer semestre del proyecto. Es pertinente mencionar que bibliografía relacionada con el inicio y crecimiento de fisura bajo fatiga ultrasónica o giga-cíclica es muy escasa actualmente; la propuesta del presente proyecto incluye como un objetivo avanzar en el conocimiento fundamental de esta disciplina científica.
- b) A la par del punto anterior, se llevará a cabo el proceso de fabricación y preparación de las probetas de ensayo, destinadas al estudio del inicio y crecimiento de fisuras en los materiales polímeros ABS y PMMA, sometidos a cargas por fatiga. Para ciertos ensayos, existe actualmente la normalización internacional (para metales) correspondiente para la puesta en marcha y que será empleada como base para los ensayos que se llevaran a cabo en polímeros:
 - b.1) La norma ASTM E647 – 13e1 se emplea para el método de medida estándar en las tasas de crecimiento de fisura bajo cargas en fatiga (“Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”).
 - b.2) La norma ASTM E 399, destinada a evaluar la resistencia a la fractura K_{Ic} de materiales metálicos, mediante una prueba estandarizada para esta propiedad en condiciones de deformación plana-elástica (“Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{Ic} of metallic materials”).
 - b.3) Norma ASTM E 561, propone un método estandarizado para la determinación de la curva K-R, (“Standard test method for K-R curve determination”),
 - b.4) Otros estándares internacionales de referencia, como la norma: JB/T 8189-1999, que presenta el método de ensayo para la iniciación y crecimiento de fisura en metales utilizados

en turbinas de vapor, bajo altas temperaturas (“Testing method for crack initiation and propagation rate in steam turbine metals at elevates temperature”).

- c) El análisis se abordará inicialmente mediante la teoría de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (LEFM, por sus siglas en inglés), que impone las siguientes hipótesis:
 - c.1) La fisura ha iniciado.
 - c.2) El material es lineal-elástico.
 - c.3) El material es isotrópico.
 - c.4) La fisura ha comenzado a propagarse.
 - c.5) La zona plástica en el frente de fisura es pequeña.
 - c.6) Los puntos de análisis se sitúan próximos del frente de fisura.
- d) Una segunda herramienta de análisis concierne la teoría de la Mecánica de la Fractura Elasto - Plástica (EPFM, por sus siglas en inglés), cuyos postulados principales se describen a continuación:

El deterioro es específico de los materiales, se puede afirmar en términos generales que, para un material dúctil el deterioro se presenta en forma de deformación plástica, mientras que en materiales frágiles este se presenta en forma de micro-fisuras. Bajo la óptica de LEFM, la zona de deformación plástica en el frente de fisura se considera muy pequeña en comparación con la talla del espécimen conteniendo dicha fisura. Esta zona plástica pequeña bajo el estudio de LEFM se considera despreciable y las deformaciones en el frente de fisura son estimadas mediante el campo de deformaciones asintótico bajo un comportamiento puramente lineal elástico. Cuando no es posible despreciar la zona de deformación plástica en el frente de fisura para determinar el campo de deformaciones, se hace necesario abordar el problema mediante la teoría de la Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica.

- e) Realizar las simulaciones para la integral J o para la tasa de liberación de energía, G ; respaldando de esta forma los resultados obtenidos en el EPFM.
- f) Llevar a cabo la simulación para determinar los esfuerzos inducidos en los especímenes sometidos a fatiga convencional.

- g) Analizar, comparar e interpretar los resultados para obtener las conclusiones detalladas de los mecanismos de inicio y propagación de fisuras en los materiales poliméricos en cuestión.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 FATIGA MECÁNICA

El descubrimiento de la fatiga se produjo alrededor de los años 1800, cuando varios investigadores en Europa observaron que puentes y componentes ferroviarios, crujían cuando se sometían a cargas repetidas. Conforme avanzaba el siglo y el uso de los metales se expandía con el creciente uso de máquinas, cada vez más fallos de componentes sometidos a cargas repetidas eran registrados. A mediados de la década posterior de 1800, A. Wöhler [10] había propuesto un método por el cual el fallo de los componentes bajo cargas oscilantes podría mitigarse y en algunos casos, eliminarse. Este método dio como resultado el enfoque del diagrama esfuerzo – vida y el enfoque del modelo de pruebas para el diseño de componentes sometidos a fatiga.

Fatiga, es un proceso de cambio estructural, localizado, progresivo y permanente, que se produce en un material sometido a fluctuaciones de esfuerzos y deformaciones que ocurren en algún punto o puntos y que puede culminar en grietas o fractura completa después de un número suficiente de ciclos [11] [12].

En esta definición, se aprecian importantes perspectivas en el fenómeno de fatiga, que lo establecen como un proceso progresivo, localizado que conlleva un cambio estructural permanente debido a fluctuaciones de esfuerzos y deformaciones en un punto o puntos específicos que dan como origen el inicio de fisuras y una sucesiva fractura total.

La idea de que la fatiga es un proceso, es crítica para tratar con ello en el diseño y para la caracterización de materiales como parte del diseño mismo. Otra idea crítica, es la fluctuación de esfuerzos y deformaciones. Cuando se analiza y se atribuye un fallo por fatiga, lo único que se sabe en ese momento, es que las cargas (esfuerzos / deformaciones) fueron fluctuantes. Nada se sabe necesariamente sobre la nucleación de los daños que guía al origen de grietas de fatiga.

Hay pocas dudas de que la fatiga juega un rol importante en todas las aplicaciones de diseño en la industria. Muchos de los componentes, están sujetos a alguna forma de fluctuación de esfuerzo/deformación y por esta razón, la fatiga juega un papel potencial en todos estos casos. Sin embargo, sigue siendo imprescindible que todos los diseños consideren los aspectos de los procesos de nucleación que no sean de fatiga, que puedan actuar para nuclear grietas que podrían propagarse bajo la influencia de cargas cíclicas. El estado intrínseco del material y todas las fuentes potenciales de grietas también debe ser evaluado.

La fatiga es muy importante y a menudo, un factor crítico en las pruebas, análisis y diseño de materiales de ingeniería para máquinas, estructuras, aeronaves, y plantas de energía. Un avance de ingeniería importante de este siglo es también la transferencia del proceso de fatiga de múltiples etapas, desde el campo al laboratorio. Con la finalidad de estudiar, explicar y calificar diseños de componentes, o llevar a cabo análisis de falla, un paso clave de ingeniería es también, la simulación del problema en el laboratorio. Cada simulación es, por supuesto, un compromiso de lo que es práctico para cuantificar, pero el estudio del proceso de fatiga multi-etapa ha avanzado mucho en los métodos combinados de las pruebas de control de la deformación y el desarrollo de la mecánica de la fractura para tasas de crecimiento de fisuras. Este enfoque combinado, es un avance clave que permite una mejor comprensión y simulación de la nucleación de grietas, tanto en las regiones de la deformación localizada como de los mecanismos de crecimiento de grietas subsecuentes fuera de la zona plástica. Esta integración de la fatiga y la mecánica de la fractura, ha tenido implicaciones importantes en muchas aplicaciones industriales, para la construcción de maquinaria y materiales [12].

1.1.1 La curva de Wöhler

La curva de Wöhler [10], representa un gráfico relacionando la amplitud de tensión (σ_a) con el número de ciclos necesarios para la fractura, indicando que cuanto mayor es la magnitud de la amplitud, menor será el número de ciclos que el material será capaz de soportar antes de la fractura. Estas curvas se obtienen a través de una serie de ensayos donde una probeta del material que se somete a tensiones cíclicas con una amplitud máxima relativamente grande (aproximadamente $2/3$ de la resistencia estática a tracción). Se cuentan los ciclos hasta

la fractura. Este procedimiento se repite en otras probetas a amplitudes máximas decrecientes. Los resultados se representan en un diagrama de esfuerzo σ , frente al logaritmo del número N de ciclos hasta la fractura para cada una de las probetas. Los valores de σ se toman normalmente como amplitudes de la carga.

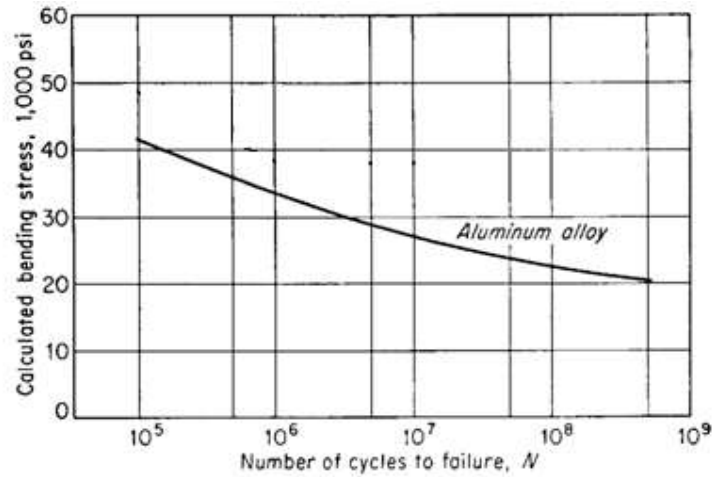


Figura 1. 1. Curva σ - N para una aleación de aluminio.

1.1.2 La curva Coffin-Manson o gráfica $\epsilon - N$

Existen diversos métodos para aproximar las curvas de deformación - ciclos, uno de los más utilizados es el obtenido por Coffin y Manson [13]. Este método combina dos rectas en forma logarítmica, una para el régimen elástico y otra para el plástico [14], Figura 1.2.

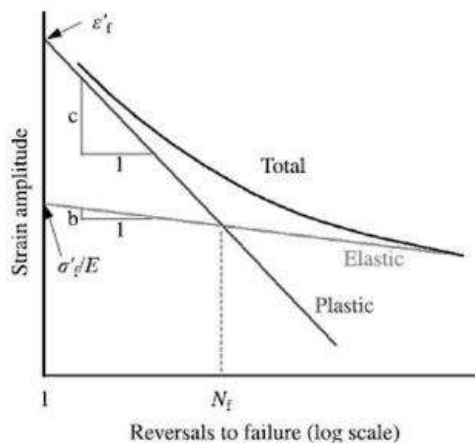


Figura 1. 2. Curva de Coffin- Manson

Coffin y Manson trabajando independientemente en problemas de fatiga térmica, propusieron la caracterización de la vida a la fatiga basada en la amplitud de la deformación plástica. Determinando la vida en fatiga a partir de la expresión:

$$\Delta \varepsilon_p = \varepsilon'_f (2Nf)^c \quad (1.1)$$

Donde: ε'_f ~ Deformación máxima con ruptura instantánea
 $c \approx -0.5 - 0.7$, exponente de ductilidad a la fatiga.
 $c = -1/(1+5n')$

Y estableciendo una relación de esfuerzo – deformación válida para altos niveles de carga (deformación) y cortas duraciones de vida.

$$\Delta \sigma = K' (\Delta \varepsilon)^{n'} \quad \text{Con: } n' \approx 0.1 - 0.2 \quad (1.2)$$

Donde: K' : Coeficiente de resistencia cíclica.
 n' : Coeficiente de endurecimiento cíclico.

Cuya gráfica mostrada en la Figura 1.2, describe la amplitud total de deformación y el número de ciclos hasta la falla Nf . Es importante destacar que la ecuación que define dicha curva en la gráfica, es válida para el régimen a bajo y alto número de ciclos.

1.1.3 Ley de Paris

Los resultados de los estudios de fatiga han mostrado que la vida de un componente estructural puede relacionarse con la velocidad de crecimiento de la grieta, particularmente en la zona de crecimiento estable de la grieta. La velocidad de propagación de la grieta es una función del nivel de tensión y de la amplitud de la misma.

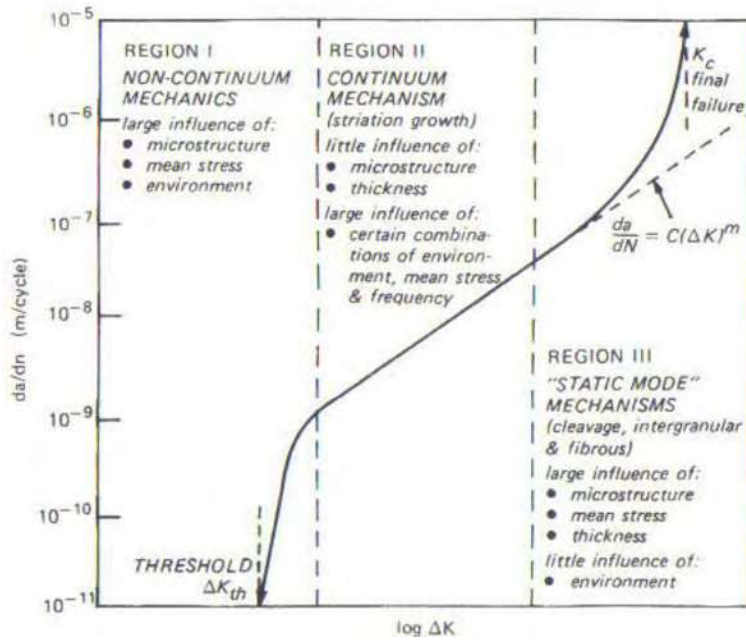


Figura 1. 3. Comportamiento en fatiga de materiales metálicos [15].

Paris propuso una ley empírica basada en los conceptos de LEFM, la cual unificaba todos los datos experimentales de crecimiento de grietas por fatiga [15], esta ley se expresa como:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (1.3)$$

Dónde:

A y m : son constantes para un determinado material.

K : Factor de intensidad de esfuerzos.

$\frac{da}{dN}$: Pendiente de la curva de velocidad de crecimiento (Ley de Paris)

El valor de m normalmente está comprendido entre 1 y 6.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (1.4)$$

O bien

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{(\pi a)} \quad (1.5)$$

Desarrollando estas expresiones a partir de sus gráficas correspondientes, se puede llegar a la siguiente ecuación:

$$N_f = \frac{da}{A \pi^{\frac{m}{2}} (\Delta \sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{Y^m a^{\frac{m}{2}}} da \quad (1.6)$$

Dónde:

N_f : Número de ciclos hasta fractura

Y : Parámetro relacionado con las condiciones geométricas del cuerpo donde se aloja la fisura, así como la talla de la fisura.

m y A : Constantes del material de ensayo.

1.2 MECÁNICA DE LA FRACTURA

Fallas inesperadas de armas, edificios, puentes, barcos, trenes, aviones y varias máquinas han ocurrido en todo el mundo industrial. Algunas de estas fallas han sido debido a un diseño mal planificado, sin embargo, se ha descubierto que muchas fallas han sido causadas por defectos preexistentes en materiales que inician grietas que crecen y conducen a la fractura. Este descubrimiento ha llevado, en cierto sentido, al campo de estudio conocido como Mecánica de la Fractura. Este campo extremadamente amplio; incluye aplicaciones en ingeniería, estudios en mecánica aplicada (incluyendo elasticidad y plasticidad) y ciencia de materiales (incluyendo procesos de fractura, criterios de fractura y propagación de grietas) [16].

Se pueden distinguir dos enfoques de la mecánica de la fractura: a) Mecánica de la fractura lineal elástica (LEFM) y b) Mecánica de la fractura elasto-plástica (EPFM). El LEFM es usado para el análisis de materiales frágiles tales como: aceros de alta resistencia, vidrio, hielo, concreto, etc., con una aproximación muy buena. Concerniente a los materiales dúctiles, como: aceros al bajo carbono, aceros inoxidable, algunas aleaciones de aluminio y polímeros, la plasticidad juega un papel importante antes de la fractura para lo cual puede

usarse el análisis EPFM. Una consideración adicional implica que, si la aplicación de la carga es suficientemente baja, el enfoque LEFM es viable en la mayoría de los materiales.

La mayoría de los primeros trabajos en Mecánica de la Fractura, eran aplicables solo a materiales elásticos lineales, pero avances subsecuentes involucran otro tipo de comportamiento del material. La Mecánica de la fractura elasto-plástica, considera la deformación plástica en condiciones cuasi estáticas, mientras que la Mecánica de la fractura dinámica, viscoelástica y visco-plástica, incluyen la dependencia del tiempo. De igual forma, algunas investigaciones previas, consideran la Mecánica de la Fractura dinámica como un comportamiento lineal.

A continuación, se muestra el régimen de análisis de fractura para determinados tipos de materiales.

Tabla 1.1. Régimen de análisis de fractura en diversos materiales [2].

Material	Typical Fracture Behavior
High strength steel	Linear elastic
Low- and medium-strength steel	Elastic-plastic/fully plastic
Austenitic stainless steel	Fully plastic
Precipitation-hardened aluminum	Linear elastic
Metals at high temperatures	Viscoplastic
Metals at high strain rates	Dynamic/viscoplastic
Polymers (below T_g) ^b	Linear elastic/viscoelastic
Polymers (above T_g) ^b	Viscoelastic
Monolithic ceramics	Linear elastic
Ceramic composites	Linear elastic
Ceramics at high temperatures	Viscoplastic

^a Temperature is ambient unless otherwise specified.
^b T_g — Glass transition temperature.

1.3 MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA

1.3.1 Relación de Griffith

La mecánica de la fractura como disciplina, comenzó a desarrollarse durante la Primera Guerra Mundial con los trabajos realizados por Alan Arnold Griffith cuyos estudios fueron orientados principalmente para explicar la propagación de fisuras en materiales frágiles [4] [2] [17]. Griffith había encontrado dos hechos contradictorios en el inicio de fisuración del vidrio.

- El esfuerzo necesario para la fractura del vidrio es aproximadamente de 100 MPa.
- El esfuerzo teórico para romper los enlaces atómicos del vidrio era aproximadamente de 10,000.

Por lo que se hacía necesaria una teoría que unificara estos dos hechos. Griffith desarrolló ensayos en probetas con carga uni-axial, introduciendo una fractura artificial en cada espécimen.

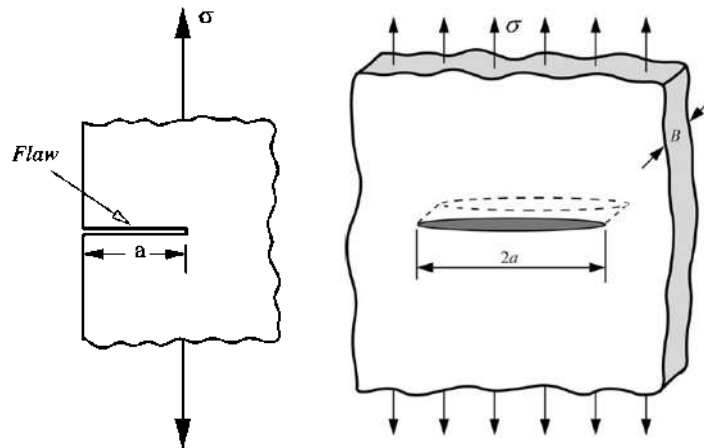


Figura 1. 4. Modelos de Griffith para fractura en materiales frágiles.

Después de cierto número de ensayos, determino que el producto del esfuerzo aplicado y la raíz cuadrada de la longitud de fisura, tendía a una constante:

$$\sigma_f \sqrt{a} \approx C \quad (1.7)$$

Una explicación a esta relación en términos de la teoría lineal podía ser problemática. La elasticidad lineal predice que la tensión, e indirectamente la deformación, en el vértice de la grieta para un material elástico es infinita. Para poder afrontar el problema, Griffith desarrolló una aproximación termodinámica para explicar la relación que él observó. el crecimiento de una grieta requiere la creación de dos nuevas superficies lo que implica un incremento en la energía superficial. Griffith encontró una expresión de la constante C en términos de la energía superficial de la grieta, resolviendo el problema elástico de una grieta finita en una placa elástica. Con la aproximación se consigue:

- Evaluar la energía potencial almacenada en una muestra perfecta sometida a tensión uniaxial.
- Fijar el límite para evitar el trabajo de la carga aplicada y luego introducir una grieta artificial en la estructura. La grieta relaja la tensión, y por tanto reduce la energía elástica cerca de las superficies de fractura. Por otro lado, la fractura incrementa la energía superficial total de la muestra.
- Finalmente, calcular el intercambio de energía libre (energía superficial - energía elástica) en función de la longitud de la fractura.

$$C = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi}} \quad (1.8)$$

Donde: E : Módulo de Young del material de ensayo

γ : Es la densidad de energía superficial del material. Se tiene un valor típico de $\gamma = 1 \frac{J}{m^2}$ para un vidrio con $E = 62 \text{ MPa}$.

El fallo ocurre cuando la energía libre alcanza un valor crítico en la longitud de grieta si se supera la energía libre, causando la fractura y finalmente se establece:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{a\pi}} \quad (1.9)$$

1.3.2 Modificación de Irwin a la relación de Griffith

La aproximación de Griffith otorga buenos resultados experimentales en relación a materiales frágiles como el vidrio o los cerámicos, pero en materiales dúctiles queda sujeta a verificación. Durante la segunda guerra mundial, un grupo del Laboratorio de Investigación Naval de U.S, liderado por George R Irwin comienza a desarrollar trabajos orientados a la Mecánica de la Fractura para materiales dúctiles con deformación plástica.

En materiales dúctiles (y en algunos materiales aparentemente frágiles), se desarrolla una zona plástica en el frente de fisura. A medida que aumenta la carga aplicada, la zona plástica aumenta de tamaño hasta que la grieta crece y la carga detrás del frente de fisura se relaja. El ciclo de carga y descarga plástico cerca de la punta de la grieta conduce a una disipación de energía y aumento de la temperatura. Por lo cual se hace necesario introducir un término disipativo a la ecuación del balance de energía propuesta por Griffith para materiales frágiles.

El enfoque de Irwin fue distinguir dos tipos de energías para materiales dúctiles durante el proceso de crecimiento de grietas.

- a) Energía de deformación elástica, que se libera conforme aumenta la grieta. Fuerza de conducción termodinámica.
- b) Energía de disipación, que incluye disipación plástica y energía superficial. La energía total de disipación se expresa como:

$$G = 2\gamma + G_p \quad (1.10)$$

Donde: γ : Energía superficial.

G : Energía de disipación plástica por unidad de área en el crecimiento de fisura.

Partiendo en la relación de Griffith y con los elementos anteriores se establece la teoría energética para el crecimiento de fisura:

$$\sigma_f \sqrt{a} = \sqrt{\frac{EG}{\pi}} \quad (1.11)$$

Que, al aplicarse a materiales frágiles se tiene como término dominante a la energía superficial y se emplean valores típicos de $G = 2\gamma = 2 J/m^2$; mientras que, para materiales dúctiles, el término dominante es la disipación plástica, empleando valores de $G = G_p = 1000 J/m^2$. En el caso de polímeros con temperaturas cercanas a la transformación vítrea [18] [19], se tienen valores comprendidos de $G = 2 - 1000 J/m^2$.

La solución elástica para el problema de fractura es paradójica, pues da lugar a un campo tensional que no es realista cerca del vértice de la grieta. A pesar de ello es posible utilizar la solución elástica para caracterizar el estado tensional en el entorno de una fisura, y proporcionar un criterio de fallo válido desde el punto de vista ingenieril [20].

1.3.3 Factor de intensidad de esfuerzos

En los años 1950, el Ingeniero George Irwin [7] introdujo el término factor de intensidad de esfuerzos (K), el cual cuantifica el campo de esfuerzos alrededor de una grieta y puede expresarse como [21]:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.12)$$

Partiendo del cálculo de la cantidad de energía disponible para fracturar un material en términos de tensiones asintóticas y campos de desplazamiento alrededor del frente de fisura en un sólido elástico lineal, se tiene la expresión:

$$\sigma_{ij} \approx \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi a}} \right) f_{ij}(\theta) \quad (1.13)$$

Donde: σ_{ij} : Tensiones de Cauchy

a: Distancia al frente de fisura

θ : Angulo con respecto al plano de grieta

f_{ij} : Funciones dependientes de la geometría de la grieta y las condiciones de carga.

Una grieta en un sólido puede presentar un estado de tensiones en tres modos diferentes, como se ve en la Figura 1.5 [17]. La tensión normal perpendicular al plano de la grieta, que se conoce con el nombre de modo de apertura o Modo I. Cuando los desplazamientos de la superficie de la grieta son perpendiculares al plano de la grieta y los esfuerzos cortantes son paralelos al plano de la grieta se denomina como el Modo II y cuando los esfuerzos cortantes son paralelos al plano de la grieta y los labios de esta se mueven en dirección paralela el modo de crecimiento de grieta es de desgarramiento y se denomina Modo III [3].

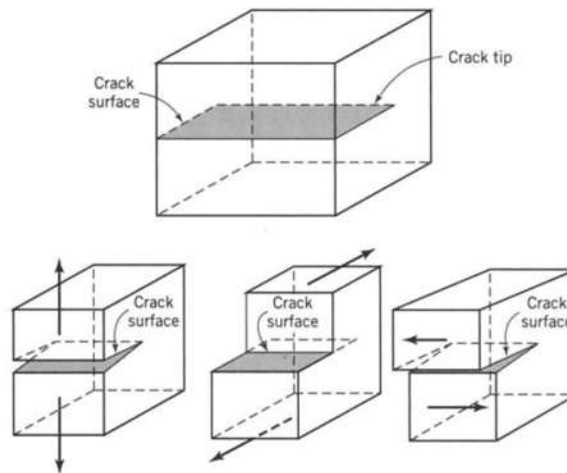


Figura 1. 5. Modos de aplicación de carga. a) Apertura, b) Cizalladura, c) Rasgadura.

De este modo se encuentran expresiones para σ_{ij} , en relación al “Modo” de análisis empleado. Dicho análisis puede ser realizado considerando dimensiones despreciables dependiendo del espesor de los especímenes de prueba (Esfuerzo plano), o bien, asumiendo una influencia significativa por el espesor (deformación plana).

La resistencia a la fractura de un material sólido es una función de las fuerzas cohesivas que existen entre los átomos. Sobre esta base, la resistencia cohesiva teórica de un sólido elástico frágil ha sido estimada y es aproximadamente igual a $E/10$, donde E es el módulo de elasticidad. La resistencia a la fractura experimental de la mayoría de materiales ingenieriles es entre 10 y 100 veces menor que este valor teórico [22].

El factor de intensidad de tensiones (o de esfuerzos), K , se utiliza en la mecánica de la fractura para predecir el estado de tensión ("la intensidad del esfuerzo") cerca de la punta de una grieta provocada por una carga a distancia o por las tensiones residuales. Se trata de una construcción teórica, por lo general se aplica a un material homogéneo, elástico lineal y es útil para proporcionar un criterio de fallo para materiales frágiles. La magnitud de K depende de la geometría de la muestra, el tamaño y la ubicación de la grieta, y la magnitud y la distribución modal de las cargas en la materia.

Con la finalidad de calcular el factor de intensidad de esfuerzos conforme aumenta la fisuración de un material sometido a un desplazamiento constante, se plantea la siguiente expresión matemática [23]. Dicha expresión, obedece a las condiciones de cálculo para especímenes compactos de tensión (CT), previstos para el presente estudio [24]. Con dicha expresión, se obtiene el valor correspondiente al factor de intensidad de esfuerzos en el frente de fisura, recordando que es aplicable únicamente al espécimen compacto de tensión C(T).

$$K_I = \frac{P}{B} \sqrt{\frac{\pi}{W}} \left[16.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} - 104.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}} + 369.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{5}{2}} - 573.8 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{7}{2}} + 360.5 \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{9}{2}} \right] \quad (1.14)$$

Donde P es la carga aplicada, B es el espesor del espécimen, "a" es la longitud de fisuración y W es el ancho. La ecuación anterior se ha ajustado utilizando cálculos numéricos para varias geometrías de muestra [23] [25].

Una expresión equivalente para el cálculo de K_I [26], es presentada a continuación.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f \left[\frac{a}{W} \right] \quad (1.15)$$

$$f \left[\frac{a}{W} \right] = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W} \right) - 13.32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \quad (1.16)$$

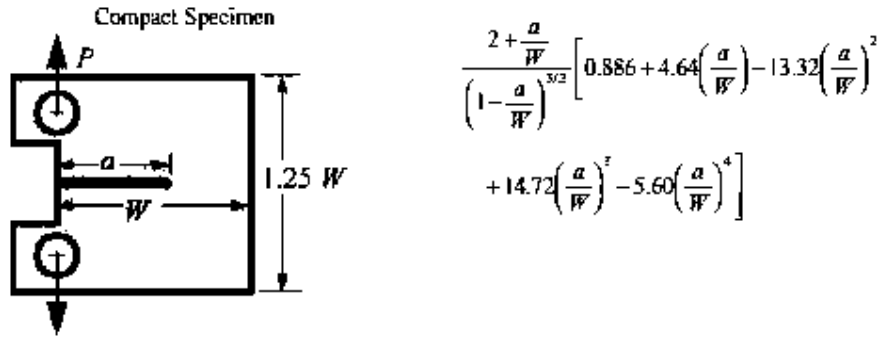


Figura 1. 6. Perfil de ensayos CT.

1.3.4 Tasa de liberación de energía (G)

G. R. Irwin fue el primero en notar que, si el tamaño de la zona plástica alrededor de una fisura o grieta era pequeña comparada con el tamaño de la propia fisura, la energía requerida para que la fisura crezca no es críticamente dependiente del estado de tensiones del extremo de la fisura. En otras palabras, un cálculo puramente elástico sería suficiente para calcular la cantidad de energía disponible por fractura.

Para poder introducir el concepto de flexibilidad y su relación correspondiente en la determinación de la resistencia a la fractura, es conveniente indicar algunas relaciones importantes. Comenzando por la definición de Irwin para el concepto de tasa de relajación de energía (G), la cual es una medida de la energía disponible para un incremento en la longitud de fractura. Para el caso de una placa plana sometida a esfuerzo plano con una longitud de fractura 2a, se tiene la siguiente expresión para G [2].

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (1.17)$$

Donde “a” representa la longitud de fractura correspondiente.

De esta forma la extensión de la fractura se presenta cuando G alcanza un valor crítico G_C :

$$G_C = 2w_f \quad (1.18)$$

En relación al trabajo realizado por las fuerzas aplicadas al espécimen de prueba. Donde G_C es una medida de la resistencia a la fractura del material.

En este punto se considera la flexibilidad:

$$C = \frac{\Delta}{P} \quad (1.19)$$

Que nos indica la razón de los desplazamientos totales divididos entre la fuerza necesaria para llevar a cabo dicho desplazamiento (longitudinal). Dicha propiedad es un valor recíproco a la rigidez del material.

Se ha establecido que el incremento de la longitud de grieta a carga constante, se traduce en una tensión constante; el trabajo suministrado al sistema se transforma en un incremento de energía elástica U_E y en energía consumida U_R [3]. Si consideramos el gráfico generado para el trabajo suministrado al sistema (dU) y la parte transformada en energía elástica (dU_E), cuando se utiliza el análisis por carga constante; se tiene una expresión para la energía consumida (dU_R), que se presentará en un diferencial de área (dA) correspondiente al producto de la distancia incrementada en la fractura por el espesor de la probeta.

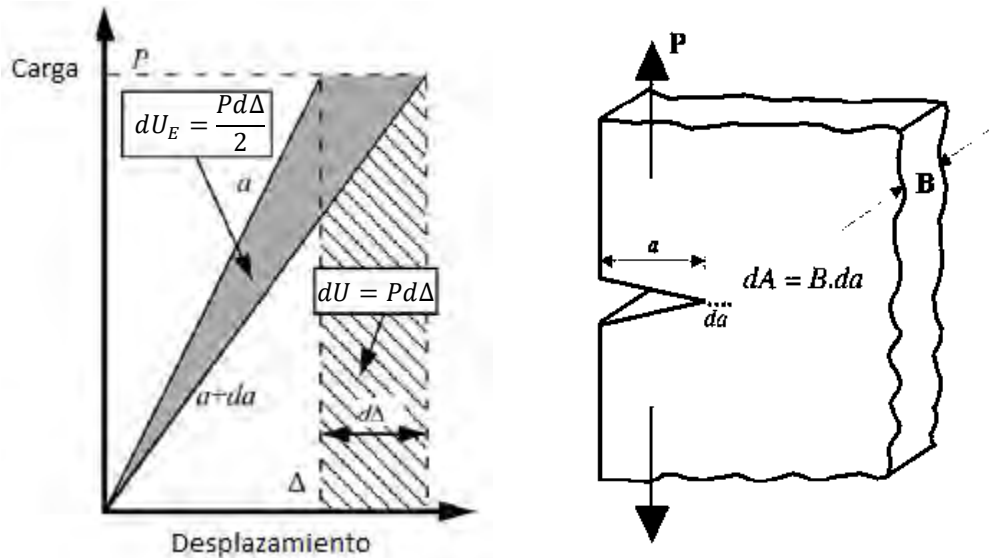


Figura 1. 7. Gráfica representativa de la energía de relajación para el crecimiento de una fisura.

De esta forma se tiene la expresión para la energía consumida:

$$dU_R = dU - dU_E \quad (1.20)$$

$$dU_R = Pd\Delta - \frac{Pd\Delta}{2} = \frac{Pd\Delta}{2} \quad (1.21)$$

Entonces:

$$dU_R = dU_E \quad (1.22)$$

$$dA = Bda \quad (1.23)$$

$$dU_R = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} Bda \quad (1.24)$$

La expresión para la tasa de relajación de energía, queda representada por:

$$G = \frac{dU_R}{dA} = \frac{\frac{\pi\sigma^2 a}{E} Bda}{Bda} \quad (1.25)$$

$$\text{Comprobando la ecuacion 1.17 para } G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E}$$

De forma equivalente:

$$G = \frac{1}{B} \frac{Pd\Delta}{2da} \quad (1.26)$$

Retomando el término de flexibilidad (Ec. 1.19):

$$C = \frac{\Delta}{P}, \text{ o bien } dC = \frac{d\Delta}{P} \quad (1.27)$$

$$d\Delta = PdC \quad (1.28)$$

Concluyendo que, para $G = \frac{1}{B} \frac{Pd\Delta}{2} = \frac{1}{B} \frac{P(PdC)}{2da}$

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (1.29)$$

La cual es válida tanto para carga constante como para desplazamiento constante.

Particularmente, para el modo de análisis de la presente investigación (Modo I), el valor de G puede calcularse adicionalmente conociendo el factor de intensidad de esfuerzos K, utilizando las expresiones:

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (1.30)$$

$$G = \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{E} \quad (1.31)$$

Siendo las ecuaciones 1.30 y 1.31, utilizadas para el cálculo de la tasa de liberación de energía conforme aumenta la grieta bajo las condiciones de esfuerzo plano o deformación plana respectivamente.

1.3.2 Mecánica de la fractura elasto-plástica.

Es conocido que el inicio de fisuras en un material sólido es la consecuencia del límite de resistencia en el material para absorber la energía de deformación elástica y plástica, comunicada por fuerzas exteriores [2] [27] [28]. Esquemáticamente, para una placa plana con una fisura en uno de sus costados (como se presenta en la Figura 1.8), el balance de energía potencial correspondiente a la energía de deformación al interior de una trayectoria arbitraria que encierre la zona de fractura como se muestra, y de la energía potencial de las fuerzas exteriores, puede expresarse de la siguiente manera:

$$U_M = U_e + U_{app} \quad (1.32)$$

Donde U_M es la energía mecánica potencial total, U_e es la energía potencial de deformación almacenada y U_{app} es la energía potencial de las fuerzas aplicadas.

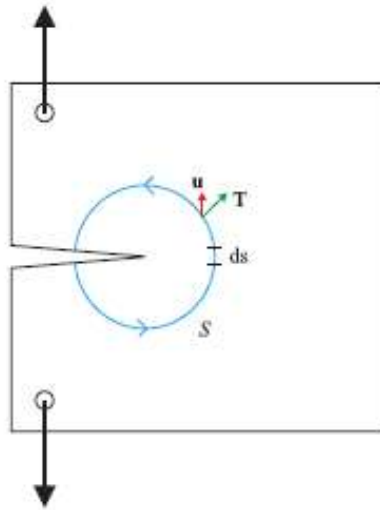


Figura 1. 8. Trayectoria arbitraria para el balance de la energía potencial en una placa plana con una fisura en uno de sus costados.

Experimentalmente se ha comprobado que el resultado de este balance energético es independiente de la trayectoria. Además, las variables involucradas en este análisis son:

Donde: a : La longitud de la fisura,

S : Una curva arbitraria uniendo el lado superior al inferior de la fisura,

ds : Un elemento de arco de esta curva,

T : El vector de tracción en esta curva, definido en relación a la normal a la curva,

u : El correspondiente vector de desplazamiento.

Teniendo la expresión

$$T = \sigma \cdot n \quad (1.33)$$

Considerando valores diferenciales e integrando la energía potencial total se obtiene:

$$u_m = \int_A w dA - \left| \int_S T \cdot u ds \right. \quad (1.34)$$

Donde w es la energía por unidad de volumen y dA un elemento de área dentro de S .

Derivando la expresión anterior respecto a la talla de la fractura a , resulta:

$$-\frac{du_M}{da} = \left| \int_S (w dy - T \cdot \frac{\partial u}{\partial x} ds) \right| \quad (1.35)$$

Que representa la “Integral J” concepto fundamental en el estudio de la Mecánica de la Fractura y que se puede interpretar como: “la tasa de cambio de la energía potencial total (por unidad de espesor del frente de fisura) con respecto al avance de la fisura”. También puede interpretarse como: “El flujo de energía potencial en el frente de fisura”.

El análisis de este estado energético en el frente de fisura puede obtenerse mediante la simulación numérica por Elementos Finitos mediante la plataforma ANSYS.

Una segunda teoría, considera la extensión vertical de la zona plástica en el frente de fisura, denominada δt , Figura 1.9.

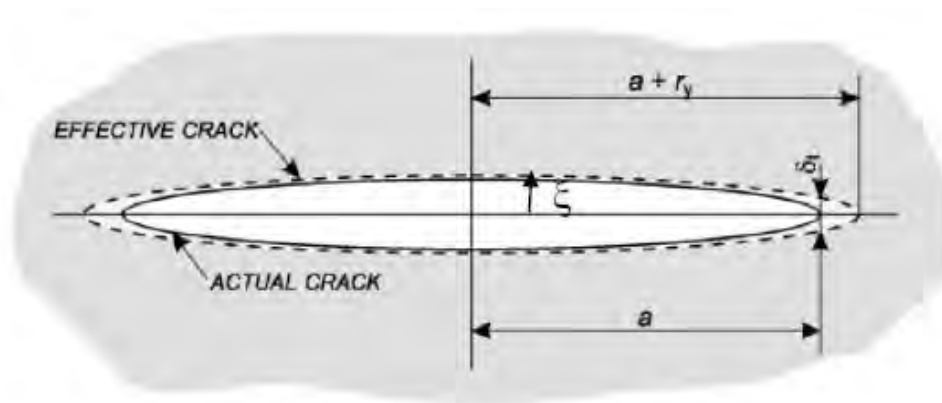


Figura 1. 9. Desplazamiento de apertura en el frente de fisura.

El desplazamiento de abertura de fisura en la zona plástica (COD, “Crack Open Displacement”), está relacionado con el desplazamiento en el flanco de fisura ξ en condiciones de esfuerzo plano, mediante la expresión:

$$\delta = 2\xi = \frac{4\sigma_y \sqrt{x^2 - a^2}}{E} \quad (1.36)$$

En el caso de comportamiento perfectamente elástico, el CTOD o δ_t es cero puesto que: $x = \pm a$ en el frente de fisura. En el caso de un comportamiento elástico - plástico, la longitud efectiva de fisura es: $2(a + r_y)$, y el CTOD puede estimarse mediante:

$$\delta_t = \frac{4\sigma_y \sqrt{a^2 + 2ar_y + r_y^2 - a^2}}{E} \approx \frac{4\sigma_y \sqrt{2ar_y}}{E} \quad (1.37)$$

Donde:

E: Módulo de Elasticidad del material,

σ_y : Esfuerzo de cedencia y

r_y : Radio de la zona plástica, que bajo la Teoría de G. Irwin se escribe [29]:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K_I}{\sigma_y} \right]^2 \quad (1.38)$$

En esta última expresión, K_I representa en factor de intensidad de esfuerzos en modo I.

Finalmente, sustituyendo la ecuación 1.38 en la 1.37, se obtiene:

$$\delta_t = \frac{4K_I^2}{\pi E \sigma_y} \quad (1.39)$$

La expresión 1.39 para el CTOD en condiciones de deformación elástica – plástica desarrollada a partir de la Teoría de G. Irwin, no debe emplearse con la variación de K_I , típicamente en ensayos por fatiga mecánica. En el caso de ensayos por fatiga, una aproximación de δ_t puede obtenerse para un valor $K_I < K_{\max}$ (donde K_{\max} es el máximo valor de K_I durante el ciclo de carga), mediante la relación:

$$\delta_t = \frac{4K_I K_{\max}}{\pi E \sigma_y} \quad (1.40)$$

CAPÍTULO 2. MATERIALES DE ESTUDIO

El uso de materiales polímeros se ha incrementado exponencialmente en los últimos años en las industrias modernas, tales como: aeronáutica, automotriz, eléctrica y electrónica, química, electrodomésticos, etc. Estas aplicaciones industriales conducen frecuentemente a cargas mecánicas y ataques del medio ambiente, reduciendo la vida industrial esperada.

Los actuales materiales polímeros usados en la industria, presentan una variable combinación de propiedades, tales como: resistencia a la corrosión, un variado módulo de elasticidad y resistencia en relación a su densidad, buen aislamiento térmico y eléctrico, un excelente diseño de forma y conformabilidad [30], las propiedades físicas y químicas de los materiales polímeros son modificadas en uso para una amplia variedad de aplicaciones industriales [31] [32].

El presente estudio se centra en la investigación de los procesos físicos de fisuración en dos de estos materiales, el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el polimetilmetacrilato (PMMA).

2.1 ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS)

El ABS es el nombre dado a una familia de termoplásticos. Se le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los comunes, como son las poliolefinas (polietileno, polipropileno). Se considera un termoplástico amorfo. Un termoplástico es un plástico que, sometido a la exposición de temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible llegando incluso a derretirse, mientras que cuando se enfría lo suficiente, se endurece [33]. El acrónimo deriva de los tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno por lo que se denomina terpolímero (copolímero compuesto de tres bloques) [34].

El amplio rango de propiedades que exhibe el ABS es debido a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes.

El acrilonitrilo proporciona:

- Resistencia térmica
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la fatiga
- Dureza y rigidez

El butadieno proporciona:

- Ductilidad a baja temperatura
- Resistencia al impacto
- Resistencia a la fusión

El estireno proporciona:

- Facilidad de procesado (fluidez)
- Brillo
- Dureza y rigidez

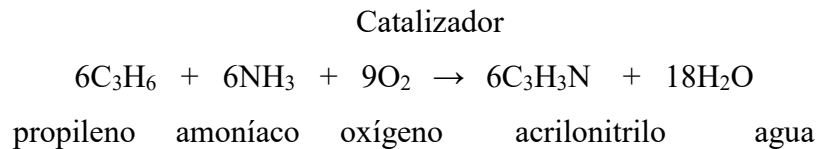
En la actualidad el ABS se produce, preponderantemente, por medio de la polimerización del estireno y el acrilonitrilo en presencia de polibutadieno, quedando como producto una estructura de polibutadieno, conteniendo cadenas de SAN (estireno acrilonitrilo) injertados en él.

Las aplicaciones habituales del ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) son las siguientes:

- General: juguetes, bienes de consumo, teléfonos, cascos de seguridad.
- Automóvil: paneles interiores para puertas, pilares, tapicería de asientos, rejillas, tableros de mandos, carcasas para espejos.
- Electrodomésticos: carcasas de electrodomésticos de cocina, carcasas de aspiradoras, paneles de control o productos de línea blanca.
- Extrusión: chapados, platos de ducha, techos para tractores, cantos de mobiliario, revestimientos de neveras, equipaje.

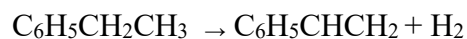
2.1.1 Componentes del ABS.

El acrilonitrilo es producido por un método desarrollado en fase vapor en el que se produce la oxidación del propileno y amoníaco con catalizadores. El proceso comercial utiliza un reactor de lecho fluido en el cual el propileno, el amoníaco y el aire se ponen en contacto con un catalizador sólido a una temperatura de 400 a 510 °C y una presión entre 0.5 y 2 atmósferas [34].



El butadieno es producido principalmente como un subproducto en el vapor del cracking de hidrocarburos para producir etileno.

La manufactura del Estireno se realiza principalmente por el método de la deshidrogenación del etilbenceno. La deshidrogenación del etilbenceno a estireno toma lugar con un catalizador de óxido de hierro y otro de óxido de potasio, en un reactor de lecho fijo a una temperatura entre 550 – 680 °C en presencia de vapor y a baja presión (0.41 Ata), dado que bajas presiones favorecen el avance de la reacción.



La estructura del ABS es una mezcla de un copolímero vítreo (estireno- acrilonitrilo) y un compuesto elástico principalmente el polímero de butadieno. La estructura con la fase elastómera del polibutadieno (forma de burbujas) inmersa en una dura y rígida matriz SAN.

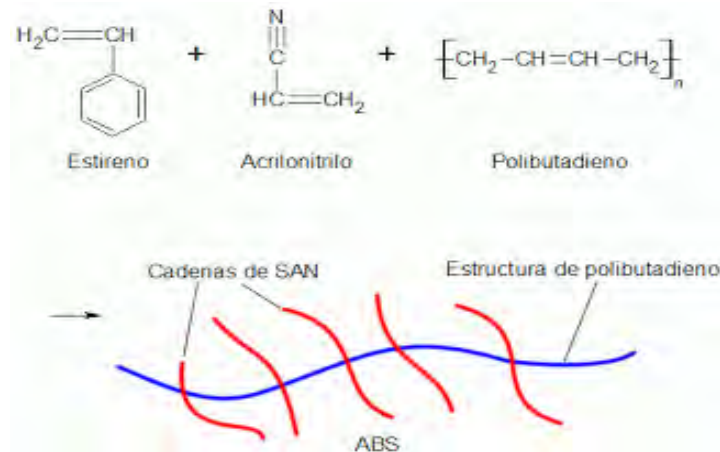


Figura 2. 1. Estructura del ABS.

2.1.2 Principales propiedades del ABS.

Las principales propiedades mecánicas del ABS y las consideradas para los estudios de fisuración en la presente investigación, se indican en la siguiente tabla:

Tabla 2. 1. Propiedades mecánicas del material ABS (Estándar).

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
<i>Módulo de Elasticidad</i>	$E = 2.3 \text{ GPa}$
<i>Módulo de Poisson</i>	$\nu = 0.4$
<i>Densidad</i>	$\rho = 1040 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
<i>Límite Elástico</i>	$\sigma_Y = 45 \text{ MPa}$

2.2 POLIMETIL METACRILATO (PMMA)

El metacrilato, también conocido por sus siglas PMMA, es uno de los plásticos de ingeniería. La placa de acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos

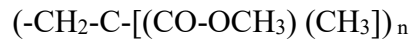
('pellas' en castellano; 'pellets' en inglés) o en placas. Los gránulos son para el proceso de inyección o extrusión y las placas para termoformado o para mecanizado.

El primer ácido acrílico fue creado en 1843. El ácido metacrílico, derivado del ácido acrílico, se formuló en 1865. La reacción entre ácido metacrílico y metanol dio como resultado el ester metacrilato de metilo. En 1877 el químico alemán Wilhelm Rudolph Fittig descubrió el proceso de polimerización que convierte el metacrilato de metilo en metacrilato de polimetilo. En 1933, la marca "Plexiglas" fue patentada y registrada por otro químico alemán, Otto Röhm. En 1936, Imperial Chemical Industries (ahora Lucite International) comenzó la primera producción comercialmente viable de vidrios de seguridad acrílicos. Durante la Segunda Guerra Mundial tanto las fuerzas aliadas como las del Eje utilizaron vidrios acrílicos para los periscopios de los submarinos y los parabrisas y en torretas de los aviones [35].

Los nombres comunes usados son: metacrilato polimetílico (polymethyl methacrylate y polimetilmetacrilato (polymethylmethacrylate). El nombre químico completo es poli (metil-2 metilpropenoato) [36] [37].

Los compuestos acrílicos tienen elevada tendencia a polimerizar; la reacción es tan exotérmica que, si se deja progresar la polimerización sin impedimentos, puede degenerar en explosión. Su obtención se produce básicamente por polimerización en masa o en suspensión. La polimerización en masa también es llamada polimerización *in situ*, ya que ésta se produce sin disolventes ni agua, obteniéndose productos semifabricados, como planchas, bloques o tubos, sin necesidad de amoldarse. El proceso consiste en la adición de iniciadores al monómero puro o en un prepolímero de viscosidad mayor. Estos se vierten entre planchas o bandas metálicas y se deja polimerizar; al ser la reacción exotérmica, hay que eliminar el calor mediante refrigeración de agua o aire. Hay que eliminar el calor de reacción para obtener un polímero sin tensiones internas; para ello, el proceso de polimerización puede durar días o semanas. El PMMA obtenido por polimerización en masa presenta pesos moleculares elevados, por lo que no es posible fundirlos sin que estos descompongan [38].

La composición química es:



Mientras que las materias primas para su producción son:

- Metacrilato de metilo;
- Acetocianhidrina y metanol;
- Ácido cianhídrico y acetona.

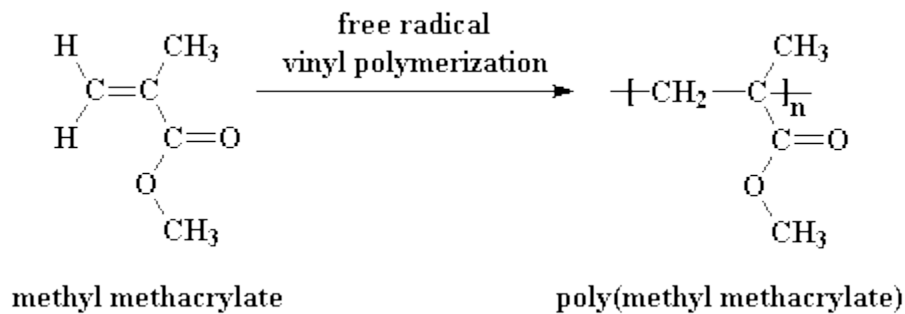


Figura 2. 2. Estructura del PMMA.

El PMMA tiene un esqueleto idéntico al resto de poliolefinas, pero los grupos éster que cuelgan de ella dan al polímero un carácter polar diferente. Tiene un elevado peso molecular. Algunas de las principales propiedades del material son [38] [39]:

Tabla 2. 2. Propiedades mecánicas del material PMMA (Estándar).

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
<i>Módulo de Elasticidad</i>	$E = 1.8 \text{ GPa}$
<i>Módulo de Poisson</i>	$\nu = 0.35$
<i>Densidad</i>	$\rho = 1170 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
<i>Límite Elástico</i>	$\sigma_Y = 48 \text{ MPa}$

2.3 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA

Previamente se han llevado a cabo importantes estudios orientados a determinar la vida útil de un material sometido a cargas oscilantes (vida en fatiga), hablamos de determinar el número de ciclos que resiste un elemento mecánico o sistema, antes de la falla. Frecuentemente, las fallas por fatiga en aleaciones metálicas, se asocian a defectos tales como: microporosidades, impurezas, concentradores de esfuerzos y otros [40]. Estos defectos pueden inducir eventos catastróficos en los materiales, implicando riesgos humanos y accidentes (particularmente en las industrias del transporte). De este modo, se tiene la necesidad de la investigación de dos aspectos: la resistencia a la fatiga de elementos y sistemas y los mecanismos asociados con la iniciación y propagación de fisuras, con ayuda de la mecánica de la fractura.

2.3.1 Perfil para ensayos en fatiga ultrasónica

Se realizaron ensayos para obtener la vida en fatiga ultrasónica del material ABS, a un nivel de carga bajo en relación a su límite elástico. Para dicho ensayo, se recomienda un perfil de prueba denominado “reloj de arena” [41], del que actualmente no se tiene una norma establecida en el caso de los materiales polímeros.

Debido a que los perfiles de ensayo en fatiga ultrasónica deben de cumplir la condición de resonancia, se hace necesario el cálculo de la frecuencia natural de cada espécimen por medio de elementos finitos. Para este caso, se emplea la plataforma ANSYS.

El equipo experimental, induce una frecuencia de oscilación de 20KHz, que se traduce en un determinado desplazamiento longitudinal a lo largo de cada espécimen ensayado. El elemento resultante para el caso del material ABS, con relación a sus propiedades mecánicas se ilustra en la Figura 2.3.

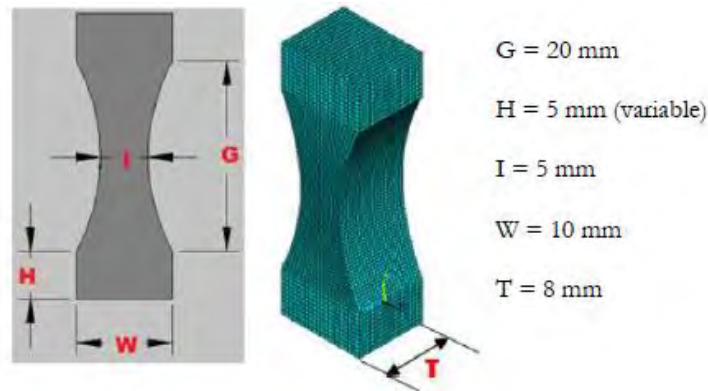


Figura 2. 3. Medidas (mm) para especímenes de prueba de material ABS en fatiga ultrasónica.

Las dimensiones obtenidas son el resultado de aproximar la frecuencia natural longitudinal de las probetas de ensayo a una frecuencia natural lo más cercana a 20 KHz, indicado en la Figura 2.4.



Figura 2. 4. Frecuencia natural para un espécimen de ABS.

A partir del perfil indicado, se procede al cálculo preliminar del factor de intensidad de esfuerzos (K) y de la tasa de liberación de energía (G o bien Integral-J dependiendo del enfoque de la mecánica de la fractura).

2.3.2. Perfiles para ensayos en fatiga convencional

Debido a la falta de elementos comparativos en relación a simulaciones numéricas y procedimientos experimentales para determinar el factor K y G, se plantea un análisis en base

a ensayos por fatiga convencional, proponiéndose perfiles de ensayo acorde a la normativa ASTM E647 establecida para elementos metálicos [24].

De este modo se tiene:

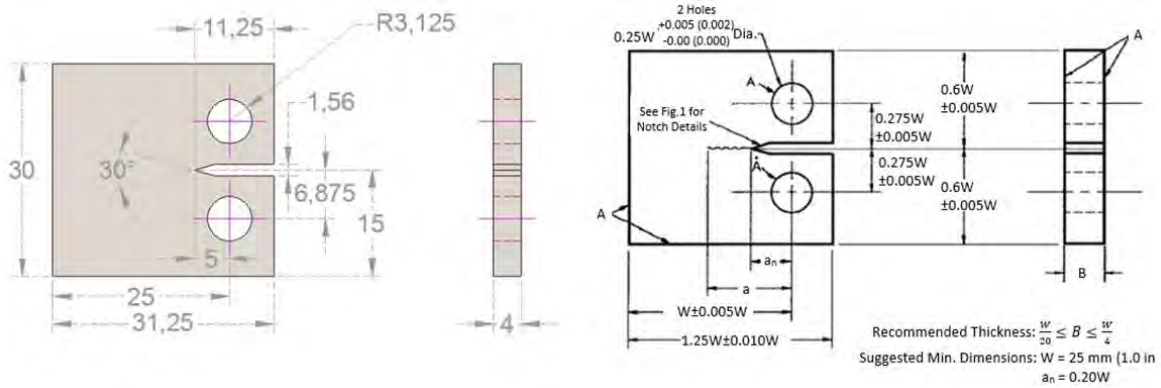


Figura 2. 5. Probetas compactas de tensión (CT).

Dicho perfil se emplea con la finalidad de determinar aspectos relevantes en mecánica de la fractura con base al análisis del crecimiento de fisuras. Para el presente estudio, se utilizarán tanto probetas de ABS como de PMMA.

CAPÍTULO 3. EQUIPO EXPERIMENTAL

La presente sección enmarca principalmente el desarrollo de un equipo experimental para ensayos en fatiga convencional con el cual no se cuenta en la Facultad; por tal motivo, se plantea la construcción y puesta en marcha del mismo debido a la necesidad de realizar ensayos destructivos a un régimen de bajo número de ciclos.

Adicionalmente, dentro del equipo empleado se contempla la utilización de una columna vibratoria de ensayos para fatiga ultrasónica y su respectivo generador de frecuencia.

3.1 EQUIPO EXPERIMENTAL DE FATIGA ULTRASÓNICA

Para llevar a cabo los ensayos experimentales en fatiga ultrasónica, es necesario un generador de alta frecuencia (20 kHz) cuya salida electrónica se conecta a un dispositivo piezoeléctrico, en donde se convierte la vibración electrónica de alta frecuencia en vibración mecánica del mismo valor. Las vibraciones mecánicas obtenidas en la salida del piezoeléctrico son pequeñas (alrededor de 20 μm), por lo que es necesario conectar un par de dispositivos multiplicadores; estos son: el “booster” multiplicador con ganancias máximas de 2.5 y el “sonotrodo” con una ganancia de 2.75, Figura 3.1.

Sistemáticamente, los desplazamientos en el extremo libre de las probetas se calibran mediante un proceso de medición de voltaje registrado en el generador de alta frecuencia. En el rango de comportamiento lineal de la probeta (condición de fatiga mecánica), los desplazamientos en los extremos de la probeta son funciones lineales del voltaje aplicado en el generador.



Figura 3. 1. Conjunto piezoeléctrico, booster y sonotrodo.



Figura 3. 2. Generador de alta frecuencia.

En particular en este equipo experimental se puede considerar la siguiente representación para las cargas y los desplazamientos en los especímenes de prueba, tal como se muestra en la Figura 3.3. Debido al establecimiento de la onda elástica en cada ensayo, se establecen los puntos de carga en los extremos de la probeta a pesar de estar fija en solo uno de ellos.

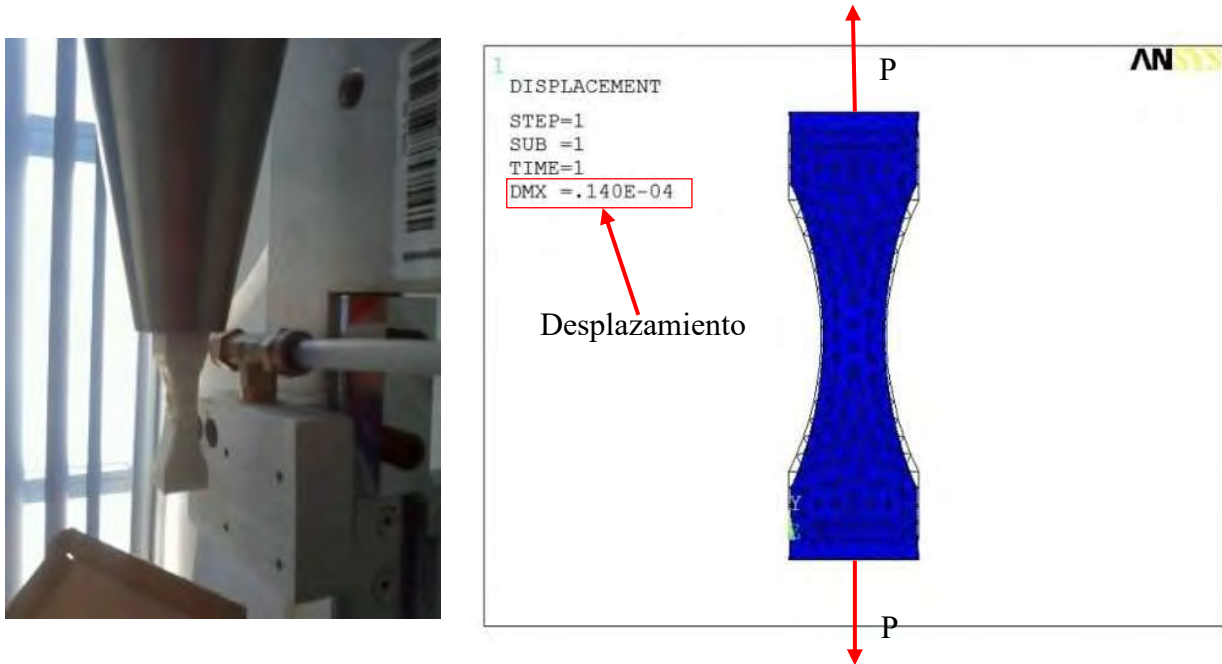


Figura 3.3. Acoplamiento de probeta a sonotrodo. Consideración de aplicación de carga.

A partir de esta consideración, se realiza la totalidad de ensayos; tomando como precaución primordial la restricción del incremento de temperatura para garantizar un comportamiento en fatiga ultrasónica puramente mecánico.

3.2 EQUIPO EXPERIMENTAL DE FATIGA CONVENCIONAL

Dentro del análisis abordado en la presente investigación y debido a falta de equipo experimental, se plantea la construcción de un dispositivo que facilite las tareas para llevar a cabo ensayos de flexibilidad (compliance) y fatiga en materiales poliméricos. A continuación, se detallan algunos de los aspectos más relevantes a considerar.

Dentro del análisis de flexibilidad, se tienen dos condiciones que permiten su determinación para un espécimen dado y las reacciones del material sometido a fatiga mecánica [10] [11] [12] [42]. Este tipo de análisis contempla obtener el desplazamiento axial de un espécimen de prueba en relación al tiempo de aplicación de una carga establecida y los diferentes comportamientos que puede presentar [2] [3]. Por lo tanto, preliminarmente se prevé que el

dispositivo desarrollado preste servicio para los dos tipos de análisis, así como la facilidad de ser aplicado en ensayos de fatiga convencional.

Como configuración inicial se tiene:

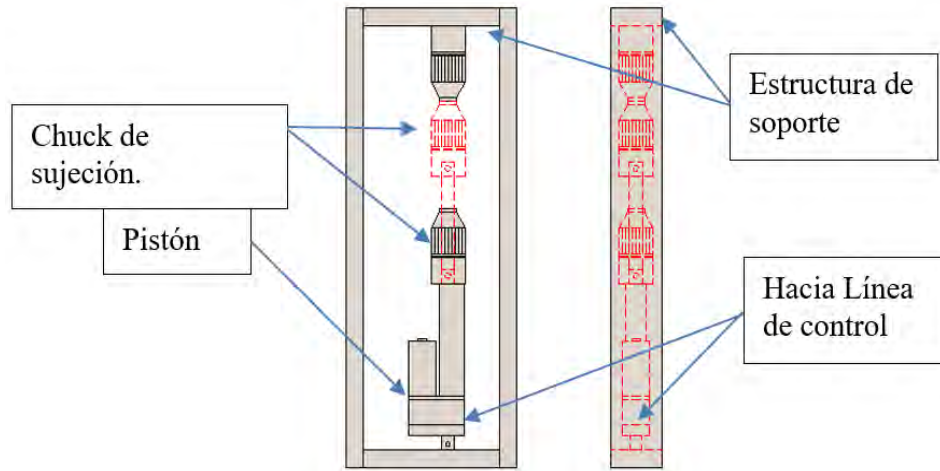


Figura 3. 4. Propuesta inicial de dispositivo experimental.

Dicha propuesta sirvió de base para analizar los pros y contras de su utilización y debido a las consideraciones de sujeción y estructura se decidió hacer ciertos cambios hasta poder definir con certeza una configuración preliminar.

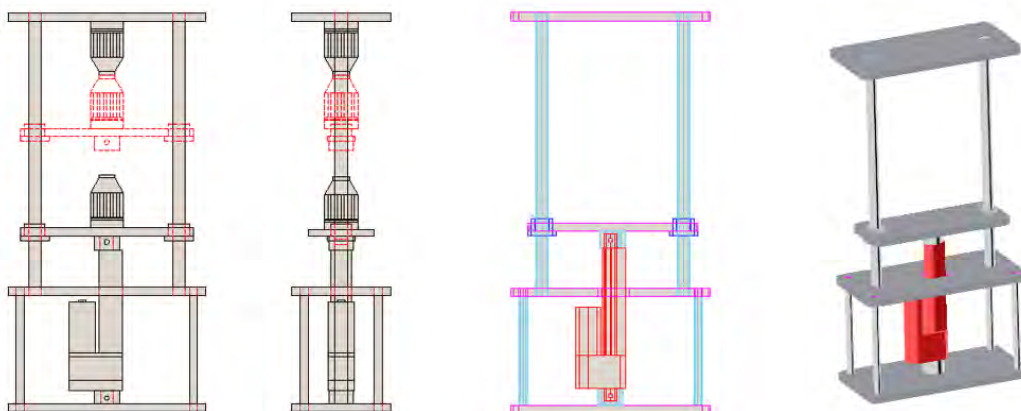


Figura 3. 5. Propuesta preliminar de construcción.

La propuesta de equipo experimental que se plantea incluye los siguientes elementos y especificaciones.

3.2.1 Pistón

Es el elemento principal de transmisión de movimiento, encargado de realizar las tareas de tracción y compresión; ajustando la posición de la placa deslizante incorporada en el dispositivo.



Figura 3. 6. Actuador lineal de 6 in. de longitud.

Se trata de un actuador lineal acoplado a un motor DC de 12V. incorporando un motorreductor que utiliza un tornillo sin fin para mover un eje de un lado a otro a lo largo de su longitud [43]. El tornillo sin fin, asegura que el eje mantenga su posición incluso si no está energizado. Adicionalmente, cuenta con dos interruptores de límite en su interior, necesarios para interrumpir la alimentación de energía cuando se llega a los finales de carrera del eje. El actuador es de aluminio y se encuentra sellado para protegerse del polvo y agua.

El actuador empleado ofrece una carrera máxima en su eje igual a 6 in, permitiendo de esta manera acoplar a las necesidades propias de la presente investigación, además de proveer una fuerza de 110 lb de carga dinámica y hasta 500 lb de soporte en carga estática y permitiendo velocidades de 0.5 in/s. Las dimensiones se indican en la siguiente figura.

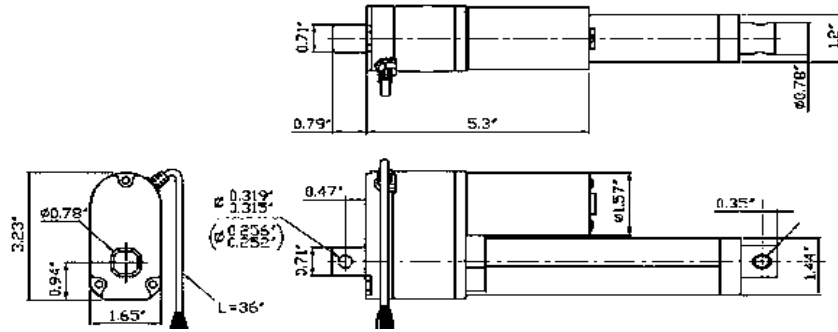


Figura 3. 7. Dimensiones del actuador lineal.

3.2.2 Motor a pasos

Pensando en tener un mayor control en los desplazamientos que puede entregar el pistón, al momento de llevar a cabo ensayos para establecer una velocidad de deformación pequeña, se hacen evidentes las carencias del motor de DC incorporado de fábrica al actuador. Por este motivo se hace necesaria la modificación y remplazo del tipo de motor que se utilizará en el motorreductor para la transmisión de movimiento; de este modo se plantea la utilización de un motor a pasos.



Figura 3. 8. Motor a pasos unipolar.

Se consideró este tipo de motor ya que permite una precisión de giro de 1.8° y puede ser fácilmente controlado mediante una tarjeta de control ARDUINO.

3.2.3 Estructura de soporte

Se compone de diversos materiales que fueron dimensionados, ajustados y ensamblados para presentar una estructura rígida, ideal para incorporaciones posteriores de diversos tipos de ensayos (ensayos de fatiga).



Figura 3. 9. Estructura de soporte.

3.2.4 Barras de deslizamiento

Una vez que se tiene una estructura de soporte estable para el equipo experimental proyectado, es necesario incorporar los elementos guía que permiten el elemento deslizante para poder llevar a cabo los ensayos de deformación (tracción a velocidad constante en este caso).



Figura 3. 10. Guías de deslizamiento.

3.2.5 Placa deslizando

Dentro de los elementos principales de estructura, se comenta por último la placa de deslizamiento. Este elemento se compone de bujes de bronce para un deslizamiento con menos fricción, que permiten estabilizar dicha placa con las barras guía; adicionalmente, es el elemento que contiene las mordazas de sujeción, esenciales para acoplar los especímenes de prueba (polímeros).



Figura 3. 11. Placa deslizante.

3.2.6 Sistema de control.

El control para este equipo, se lleva a cabo mediante una tarjeta ARDUINO. Detalles de esta sección se enmarcan en la sección 3.3.



Figura 3. 12. Tarjeta ARDUINO.

Finalmente, se obtiene una versión preliminar de equipo para llevar a cabo ensayos de flexibilidad.



Figura 3. 13. Versión preliminar de equipo experimental.

3.3 SISTEMA DE CONTROL PARA EQUIPO EXPERIMENTAL

Haciendo referencia a los métodos experimentales para determinar la flexibilidad de un material, específicamente en el método experimental por desplazamiento constante; se implementa un sistema de control que permite reducir la velocidad de desplazamiento del actuador lineal mediante la incorporación de un motor a pasos y una tarjeta ARDUINO.

La etapa de programación se propuso primeramente para controlar el motor de DC que está incorporado por defecto en el actuador lineal y con el cual no se obtienen resultados satisfactorios para el control de velocidad en un régimen bajo. Por lo tanto, el primer paso para establecer un control eficiente, es el remplazo del motor original por el motor a pasos indicado en la sección anterior.

La Figura 3.14, muestra la incorporación del actuador lineal con su motor original, motor que es necesario remplazar.



Figura 3. 14. Primera etapa de control.

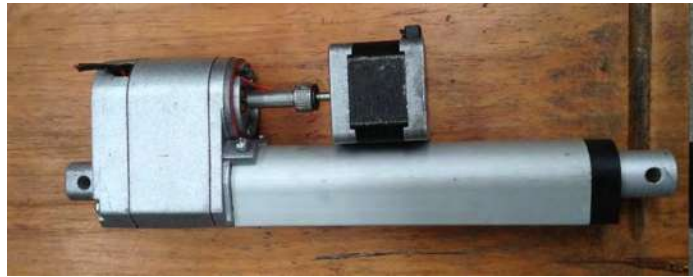


Figura 3. 15. Actuador lineal acoplado a un motor a pasos.

La incorporación de un nuevo motor, conlleva a la necesidad inmediata de medir y comprobar todas las especificaciones originales del actuador lineal y comprobar las fuerzas que es capaz de mover; de ahí la importancia de prever un motor lo suficientemente versátil para reducir la velocidad original de operación, manteniendo los demás parámetros inalterables.

Es sabido que los motores de DC de este tipo de elementos, presentan características poco favorables cuando se trata de reducir su velocidad de giro a un valor relativamente bajo, dejando de suministrar un torque apropiado para mover las cargas que a él se acoplen. Dicho problema se pretende resolver con la incorporación de un motor a pasos.

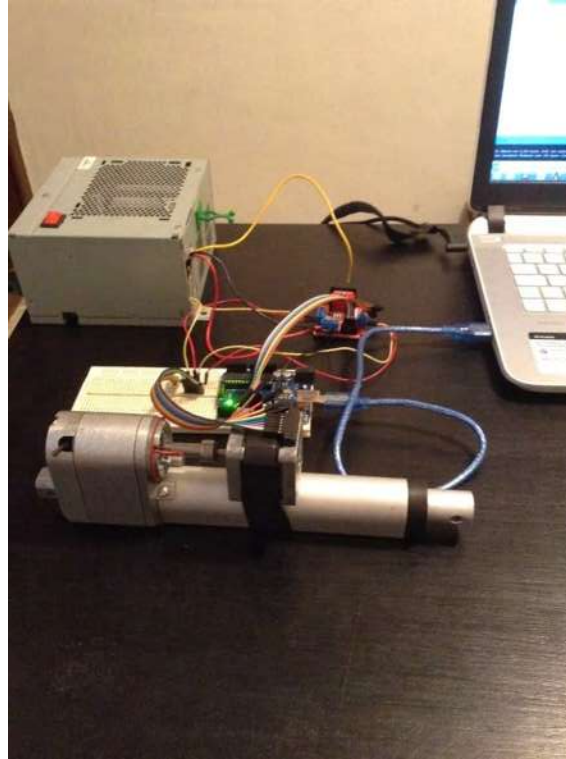


Figura 3. 16. Configuración final de actuador con motor a pasos.

Una vez resuelto el conflicto de los motores, se procede directamente a configurar la programación y establecer los elementos y conexiones pertinentes para seguir con un control confiable de velocidades de deformación.

Algunos de los elementos principales en esta sección son:

- Fuente de poder.
- Tarjeta ARDUINO.
- Puente H. L298N.

La fuente de poder es la encargada de proveer la energía necesaria de alimentación hacia las tarjetas y el motor, la tarjeta ARDUINO es la encargada de almacenar la programación establecida para las velocidades de desplazamiento, mientras que el puente H, es el elemento responsable de facilitar las tareas de posicionamiento y sentidos de movimiento en el eje del pistón.

La configuración general de conexiones se muestra en la Figura 3.17.

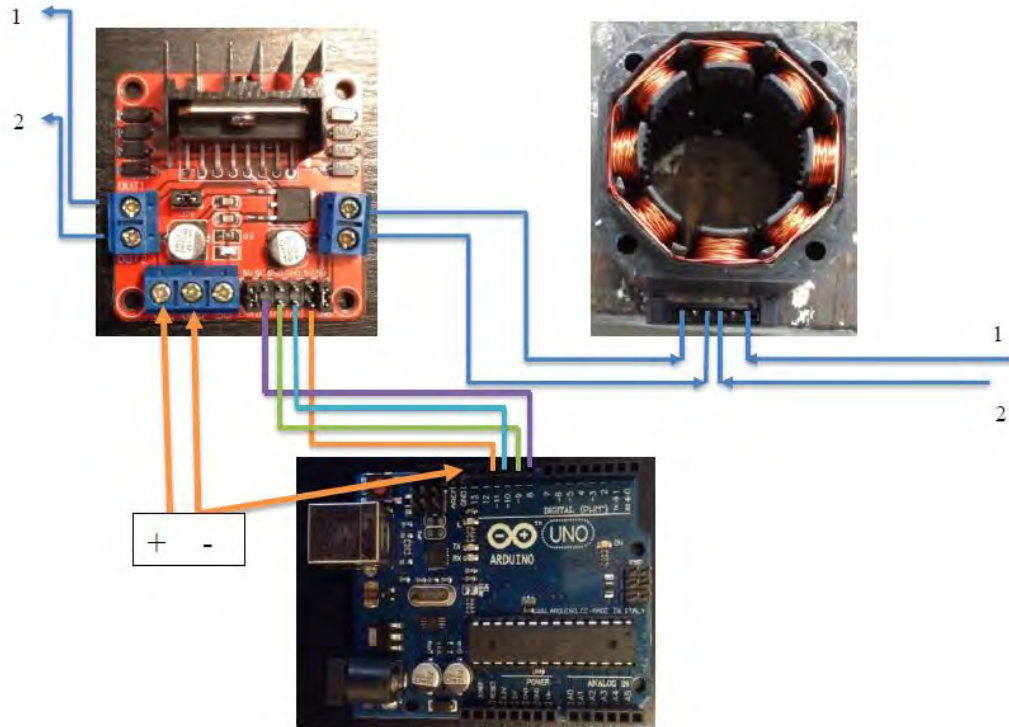


Figura 3. 17. Diagrama de conexiones.

Hasta este punto y para el resto de la aplicación del dispositivo en cuestión, se controlan las velocidades de giro del motor a pasos y el correspondiente desplazamiento en el eje del pistón mediante la programación de la tarjeta ARDUINO con ayuda del software libre proporcionado en la página oficial [44].

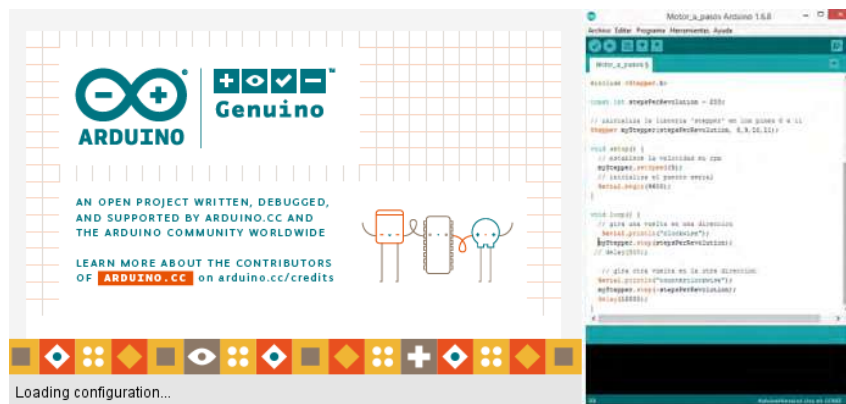


Figura 3. 18. Plataforma de control ARDUINO.

Comprobado el correcto funcionamiento del programa para establecer los desplazamientos, se está en condiciones de llevar a cabo las mediciones necesarias para determinar la relación de transmisión en el motorreductor y establecer la relación existente entre el número de revoluciones del motor y el movimiento lineal del pistón. Como una aproximación preliminar, sujeta a ensayos posteriores de medición, se establece una relación de 0.25 mm de desplazamiento lineal, por cada revolución del motor. Dicho dato se pudo obtener al establecer una velocidad angular a 10 rpm y como parte de un promedio de desplazamiento en función de la carrera total del pistón, induciendo una velocidad de desplazamiento lineal de 2.5 mm/min.

Tomando como referencia la relación anterior, se puede establecer un avance de 15 mm/h, reduciendo la velocidad angular a 1 rpm. Considerando un total de 10 h para completar el desplazamiento en el eje del pistón. Lo anterior se aprecia en el siguiente concentrado.

Tabla 3. 1. razón de velocidades con relación al acoplamiento del motorreductor.

<i>Velocidad, motor a pasos (rpm)</i>	<i>Velocidad en el eje del pistón (mm/min)</i>	<i>Tiempo para completar la carrera del pistón (min)</i>
60	15	10
50	12.5	12
40	10	15
30	7.5	20
20	5	30
10	2.5	60
9	2.25	66.67
8	2	75
7	1.75	85.71
6	1.5	100
5	1.25	120
4	1	150
3	0.75	200
2	0.5	300
1	0.25	600

Los datos registrados en la tabla anterior, se obtuvieron a partir mediciones de tiempo y desplazamiento, por lo cual se hace necesario implementar un sistema de medición que permita una mayor precisión en cuando a desplazamiento y porciones de giro del motor a pasos. A partir de este punto se utiliza un sensor de tipo inductivo para la calibración. En la Figura 3.19, se puede apreciar la instalación del sensor mencionado.

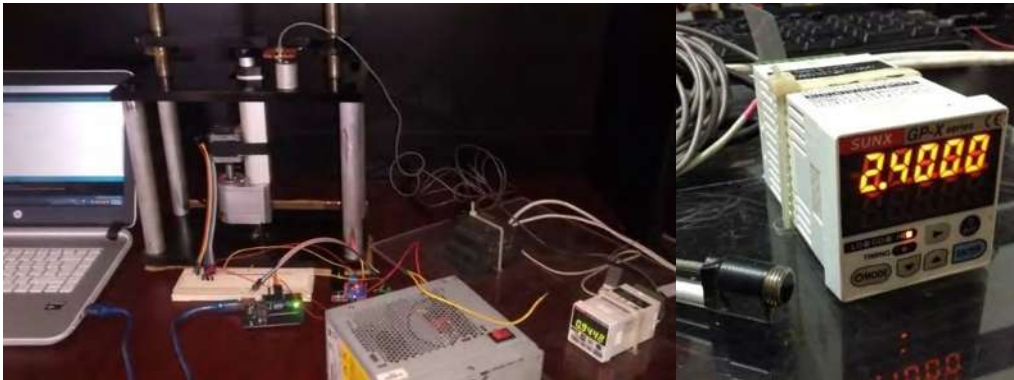


Figura 3. 19. Incorporación de sensor inductivo.

La siguiente etapa de calibración, prevé la necesidad de inducir desplazamientos constantes en un solo sentido del eje del actuador lineal, ya sea en la etapa de entrada o bien en la etapa de salida.

3.4 CALIBRACIONES DE DESPLAZAMIENTOS INDUCIDOS POR EQUIPO EXPERIMENTAL

Una vez que se han establecido las relaciones esenciales para determinar la flexibilidad y llevar a cabo ensayos de fatiga a bajo número de ciclos, es necesario conocer los desplazamientos, o en su defecto, la carga que se aplica a cada probeta al momento de realizar dichos ensayos. Ya que controlar la carga es una tarea aparentemente simple debido al uso de elementos de masa determinada, el presente análisis se enfoca en la obtención de los desplazamientos transmitidos a partir de un actuador lineal. Como se ha mencionado, el actuador lineal utilizado en el equipo experimental propuesto para ensayos de flexibilidad y fatiga se encuentra acoplado mediante una transmisión mecánica a un motor de corriente

directa de 12 V. Este acoplamiento, entrega una velocidad mínima lineal en el vástago del actuador de $6.35 \frac{mm}{min}$. Dicho motor se ha reemplazado por un motor a pasos para poder controlar la velocidad de entrada y salida del vástago del pistón.

Hasta este punto, se desconoce la precisión en la transmisión que acopla el actuador y el motor, se toman mediciones de desplazamiento en el actuador lineal a diferentes velocidades angulares del motor para conocer realmente la velocidad del vástago del pistón. Para llevar a cabo la tarea de medición, se utiliza un sensor inductivo en el extremo del pistón, dicho sensor tiene una precisión de $\pm 4 \mu m$. En las siguientes tablas y gráficas, se establecen las mediciones correspondientes a cada revolución del eje del motor a diferentes velocidades angulares.

3.4.1. Calibraciones con desplazamiento continuo

Considerando los desplazamientos promedio en el actuador lineal por revolución del eje del motor a pasos, para dos diferentes velocidades angulares se tiene lo siguientes.

Tabla 3. 2. Desplazamientos lineales en relación a una velocidad angular de 5 RPM.

<i>Medición 1</i>		
<i>No. Giros en el eje del motor</i>	<i>Separación del pistón al sensor (mm)</i>	<i>Desplazamiento lineal por revolución (mm)</i>
0	0.1922	0
1	0.4688	0.2766
2	0.8946	0.4258
3	1.3626	0.468
4	1.7592	0.3966
<i>Promedio</i>		0.39175
<i>Medición 2</i>		
<i>No. Giros en el eje del motor</i>	<i>Separación del pistón al sensor (mm)</i>	<i>Desplazamiento lineal por revolución (mm)</i>
0	0.1017	0
1	0.5518	0.4501
2	1	0.4482
3	1.5157	0.5157

4	2.2428	0.7271
<i>Promedio</i>		0.535275
<i>Medición 3</i>		
<i>No. Giros en el eje del motor</i>	<i>Separación del pistón al sensor (mm)</i>	<i>Desplazamiento lineal por revolución (mm)</i>
0	0.0946	0
1	0.5158	0.4212
2	0.9621	0.4463
3	1.439	0.4769
4	2.1347	0.6957
<i>Promedio</i>		0.510025

A partir de los datos anteriores se obtiene un promedio general de 0.479 mm, correspondientes al desplazamiento lineal por cada revolución del eje del motor, tal como se indica en la Tabla 4.2.

Tabla 3. 3. Desplazamiento lineal promedio a 5 RPM.

<i>Desplazamiento promedio</i>	<i>Desplazamiento (mm)</i>
<i>Medición 1</i>	0.39175
<i>Medición 2</i>	0.535275
<i>Medición 3</i>	0.510025
<i>Prom. Final</i>	0.47901667

Tabla 3. 4. Desplazamientos lineales en relación a una velocidad angular de 10 RPM.

<i>Medición 1</i>		
<i>No. Giros en el eje del motor</i>	<i>Separación del pistón al sensor (mm)</i>	<i>Desplazamiento lineal por revolución (mm)</i>
0	0.1922	0
1	0.4688	0.2766
2	0.8946	0.4258
3	1.3626	0.468
4	1.7592	0.3966
<i>Promedio</i>		0.39175

<i>Medición 2</i>		
<i>No. Giros en el eje del motor</i>	<i>Separación del pistón al sensor (mm)</i>	<i>Desplazamiento lineal por revolución (mm)</i>
0	0.1074	0
1	0.3946	0.2872
2	0.8189	0.4243
3	1.2752	0.4563
4	1.8524	0.5772
<i>Promedio</i>		0.43625
<i>Medición 3</i>		
<i>No. Giros en el eje del motor</i>	<i>Separación del pistón al sensor (mm)</i>	<i>Desplazamiento lineal por revolución (mm)</i>
0	0.0872	0
1	0.5649	0.4777
2	0.9914	0.4265
3	1.3965	0.4051
4	1.9473	0.5508
<i>Promedio</i>		0.465025

A partir de los datos anteriores se obtiene un promedio general de 0.474 mm para el desplazamiento lineal por cada revolución correspondiente.

Tabla 3. 5. Desplazamiento lineal promedio a 10 RPM.

<i>Desplazamiento promedio</i>	<i>Desplazamiento (mm)</i>
<i>Medición 1</i>	0.43625
<i>Medición 2</i>	0.520925
<i>Medición 3</i>	0.465025
<i>Prom. Final</i>	0.47406667

Las gráficas representativas de los datos anteriores se muestran en la Figura 3.20.

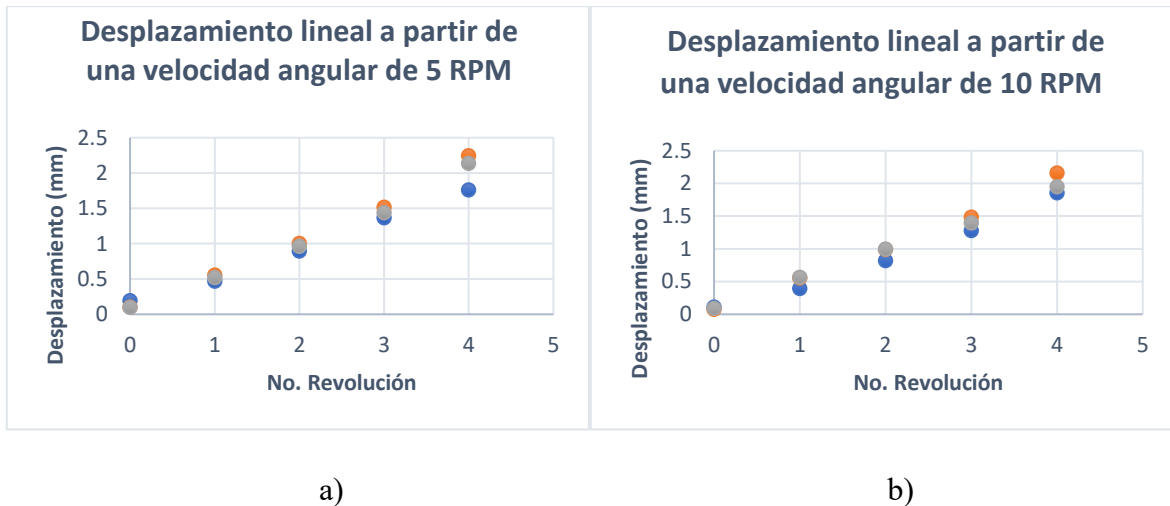


Figura 3. 20. Gráficas, desplazamiento a diferentes velocidades angulares, a) 5 RPM, b) 10 RPM.

Se concluye de esta forma, que la velocidad mínima que se puede obtener en el actuador lineal es de $0.470 \frac{mm}{min}$, lo anterior, correspondiente a una velocidad angular de 1 RPM; tal como se puede apreciar, en ambos casos las variaciones son mínimas independientemente de la velocidad de rotación del motor. Se ha seguido la misma metodología de medición para el resto de las velocidades del motor a pasos.

3.4.2 Calibraciones con desplazamiento alternativo

Una siguiente calibración se propone para el caso de establecer movimientos de tracción-compresión a diferentes frecuencias de trabajo. La anterior en base a que se tiene una transmisión mecánica mediante engranajes, por lo tanto, al cambiar de sentido el giro del motor, hay una pequeña porción de giro angular que esta desacoplada. Para tal caso se considera una frecuencia de trabajo 0.25 Hz.

Como primer caso, se considera una velocidad angular en el motor igual a 60 RPM, estableciendo 2 revoluciones para el proceso de compresión y 2 revoluciones para el proceso

de tracción. Con lo anterior se tendrá que un ciclo se completará en 4 segundos dando como resultado que se tengan 15 ciclos por minuto, o bien, 0.25 ciclos por segundo (0.25 Hz). Lo anterior estableciendo una relación de carga $r = 0$.

Segundo caso: considerar una velocidad angular en el motor igual a 120 RPM, estableciendo 4 revoluciones para el proceso de compresión y 4 revoluciones para el proceso de tracción, teniendo así, la misma frecuencia de trabajo que en el primer caso.

Una vez llevadas a cabo la totalidad de las calibraciones, y comprobando el correcto funcionamiento del motor a pasos acoplado, el siguiente paso es emplear la misma metodología de programación y calibración durante cada ensayo de fatiga, aplicando una razón de carga $r = -1$.

CAPÍTULO 4. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Resultados experimentales del inicio y propagación de grietas en materiales poliméricos utilizando muestras CT se han llevado a cabo principalmente bajo la condición de carga constante [45] [46] [47]. Sin embargo, el control de desplazamiento, o bien, la modalidad de desplazamiento constante, tiende a ser más estable que el control de carga y la fuerza impulsora generalmente disminuye con el crecimiento de las grietas, lo que lleva a la necesidad de aumentar el desplazamiento para un mayor crecimiento de la fisuración cuando la muestra no está completamente separada o fracturada [2].

Estudios recientes sobre el inicio y la propagación de grietas en el polímero ABS obtenido por proceso de fabricación aditiva (AM) y la técnica de fabricación de filamentos fusionados (FFF), han mostrado algunas tendencias generales sobre el comportamiento de fractura de este material [48]. Resultados experimentales arrojan valores sobre parámetros de fractura, tales como; 360 μm de radio de plasticidad r_p enfrente de la fisura, resultados obtenidos a partir de las propiedades de ABS especificando valores, $E=2.18 \text{ MPa}$, módulo de Poisson=0.35, esfuerzo de cedencia=31 MPa y con una razón de deformación de 1 mm/min. Dichas propiedades arrojan resultados de K para el modo I de $0.789 \pm 0.131 \text{ MPa m}^{0.5}$ [49] [50].

Concerniente al PMMA, en un reciente trabajo se demostró la dependencia de la resistencia a la fractura KIC con la razón de carga. Se enmarcan dos conclusiones principales de este trabajo: la resistencia a la fractura bajo cargas dinámicas es cerca de 1.2-1.8 $\text{MPa m}^{0.5}$, con rangos de tasa del factor de intensidad de esfuerzos de 0.01 a 1 $\text{MPa m}^{0.5}/\text{s}$; valores de 2.5-4.1 $\text{MPa m}^{0.5}$ para 8000-80,000 $\text{MPa m}^{0.5}/\text{s}$ [51].

4.1 FATIGA ULTRASÓNICA

Como inicio del proyecto, se realizó una evaluación preliminar con la finalidad de entender el proceso de fisuración en los materiales polímeros, por tal motivo, en base a ensayos realizados en material ABS bajo el régimen de fatiga a alto número de ciclos se establecieron

los primeros valores comparativos del comportamiento. Para este tipo de ensayos se utilizaron probetas del tipo de reloj de arena, cuyas propiedades geométricas fueron descritas en el Capítulo 2 del presente estudio.

Los especímenes utilizados cumplen con la condición de resonancia, la cual es indispensable para llevar a cabo el ensayo. Esta condición se debe a que el equipo experimental debe inducir una onda lineal elástica a lo largo de los especímenes de prueba y esto solo es posible siempre y cuando el equipo experimental y las probetas de ensayo tengan la misma frecuencia natural; específicamente, se tiene una máquina de pruebas que trabaja a una frecuencia de 20 KHz en frecuencia vibratoria, lo que conlleva al cálculo de especímenes de prueba con una frecuencia natural igual o lo más cercana posible (± 400 Hz en nuestro caso).

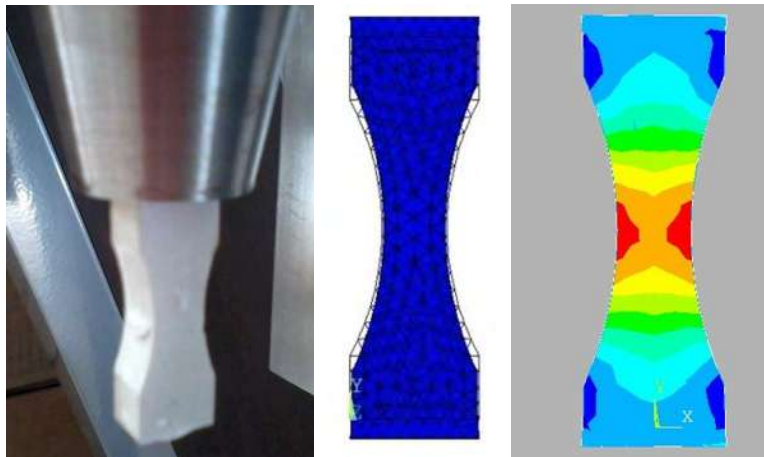


Figura 4. 1. Efecto de la condición de resonancia en un espécimen de prueba.

Los especímenes de prueba se acoplan al equipo experimental por uno de sus extremos, de modo que, al entrar en resonancia con el equipo, se establece una onda longitudinal que provoca la vibración en su modo de tracción-compresión. Este tipo de vibración ocasiona que los esfuerzos máximos se concentren en el centro o, mejor dicho, en la zona estrecha de la probeta.

Debido a que el esfuerzo máximo que experimenta un espécimen durante el ensayo se presenta en su zona central, se observa la aparición y propagación de la fisuración en esa zona. El esfuerzo inducido en este tipo de ensayos está entre el 5 y 15 % del límite elástico del material.

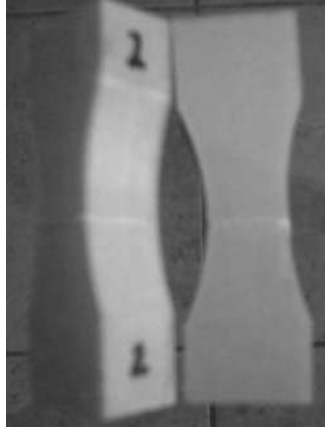


Figura 4. 2. Localización de la fisuración en perfiles de ensayo de material ABS.

En base a los resultados obtenidos de la vida en fatiga ultrasónica de los especímenes, es viable un análisis preliminar para obtener numéricamente por elementos finitos los parámetros que influyen al momento de la aparición y propagación de la fisuración.

Es de suma importancia señalar el hecho de que los ensayos no deben presentar aumentos de temperatura para que de esta forma se garantice la fisuración por medios puramente mecánicos. Específicamente, que ese incremento se encuentre por debajo de la temperatura de transformación vítrea del material con la finalidad de mantener las propiedades mecánicas con las mínimas variaciones [52]; de esta forma, fue necesaria la consideración de acciones que limiten ese incremento. Una de las consideraciones relevantes, incluye un modo de limitación de temperatura exponiendo los especímenes de prueba a un acondicionamiento primeramente por agua y en otro caso, por aceite y cuyos resultados en fatiga se representan a continuación [53].

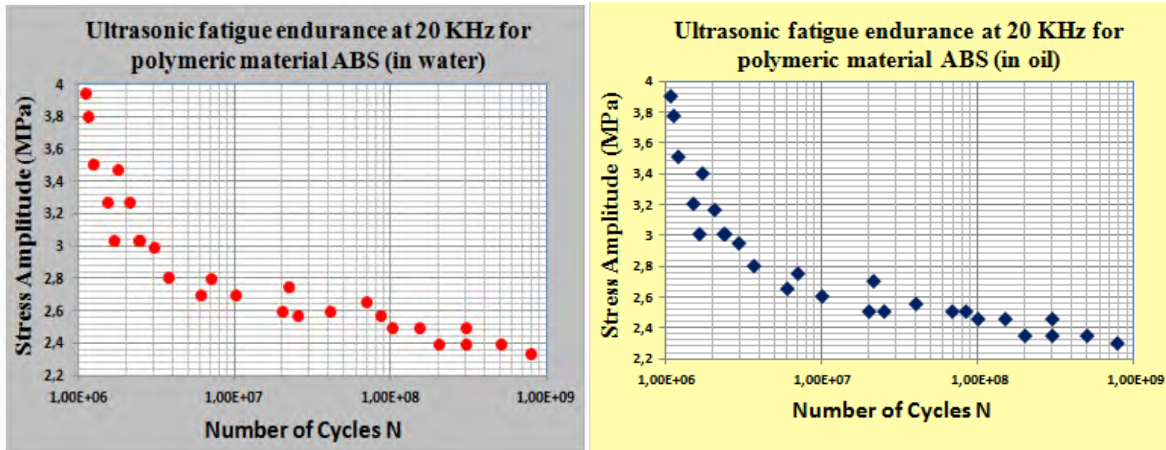
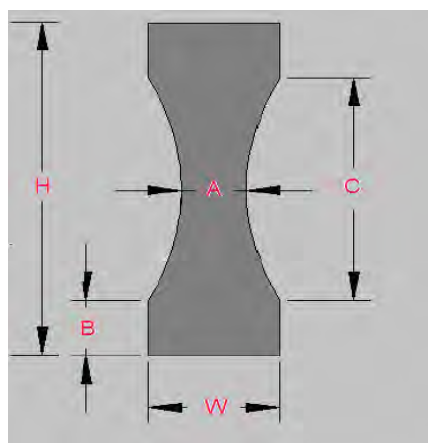


Figura 4. 3. Resultados en fatiga ultrasónica para material ABS.

Los resultados anteriores son el punto de partida en los cálculos preliminares de los parámetros que influyen en la aparición y propagación de las fisuras. Concretamente, factor de intensidad de esfuerzos y tasa de liberación de energía. Esta primera aproximación, prevé el cálculo de K y la integral J

4.1.1 Simulación numérica para obtener K y J

Se emplea la geometría original para el análisis de la Integral J (Tasa de liberación de energía conforme avanza la fisura) y el factor de intensidad de esfuerzos (K), considerando despreciable el espesor de la probeta. Las dimensiones restantes continúan sin variaciones.



Donde:

$$A = 5\text{ mm}$$

$$B = 5\text{ mm}$$

$$C = 20\text{ mm}$$

$$H = 30\text{ mm}$$

$$W = 10\text{ mm}$$

Figura 4. 4. Propiedades geométricas de los especímenes de prueba.

Debido a la simetría de la probeta de ensayos, se considera solo la mitad de la misma. Para el análisis, se toma una fisura teórica de 1 mm, por lo tanto, la configuración de análisis queda de la siguiente forma (Figura 4.5)

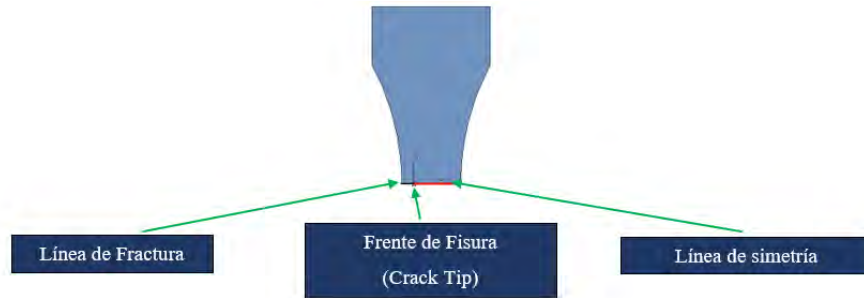


Figura 4. 5. Elemento de análisis.

En este caso se induce un desplazamiento constante en el extremo superior de la probeta, lo que ocasiona un esfuerzo correspondiente en la zona de fisuración.

La forma de determinar los esfuerzos inducidos en la zona estrecha de la probeta, es mediante un análisis estructural por medio de elementos finitos con ayuda de la plataforma ANSYS; se tiene la siguiente solución para un desplazamiento de 14 μm en los extremos libres y como se puede apreciar, el esfuerzo de Von Mises en esta zona tiene un valor de 3.34 Mpa, que corresponde a un 7.42 % del límite elástico del material.

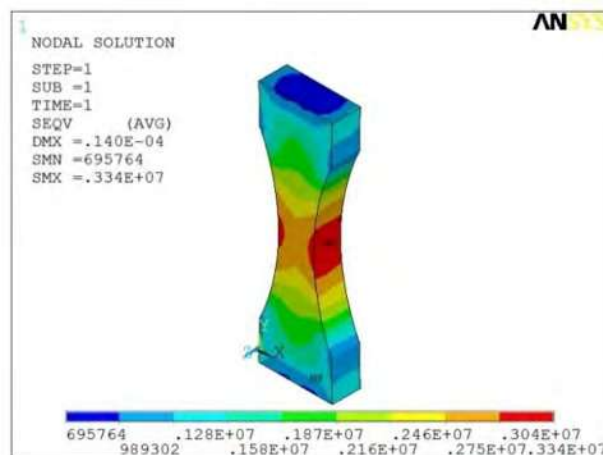


Figura 4. 6. Esfuerzo de Von Mises con 14 μm de desplazamiento.

Se tiene de este modo la siguiente tabla, correspondientes a los esfuerzos inducidos en el material polímero ABS.

Tabla 4. 1. Esfuerzos inducidos en la zona estrecha de la probeta.

<i>Desplazamiento (μm)</i>	<i>Esfuerzo Inducido (MPa)</i>	<i>Porcentaje de esfuerzo (% $\frac{\sigma}{\sigma_y}$)</i>
14	3.34	7.42
15	3.58	7.95
16	3.82	8.48
17	4.06	9.01
18	4.29	9.54
19	4.53	10.07
20	4.77	10.60
21	5.01	11.13
22	5.25	11.66
23	5.49	12.19
24	5.73	12.72
25	5.96	13.25
26	6.20	13.78
27	6.44	14.31
28	6.68	14.84

Una vez determinados los esfuerzos en la zona estrecha de la probeta, se procede a la determinación de la “Integral J” y del Factor de intensidad de esfuerzos K. De este modo, el perfil de análisis se considera como sigue y los resultados se registran a partir de las soluciones de ANSYS.

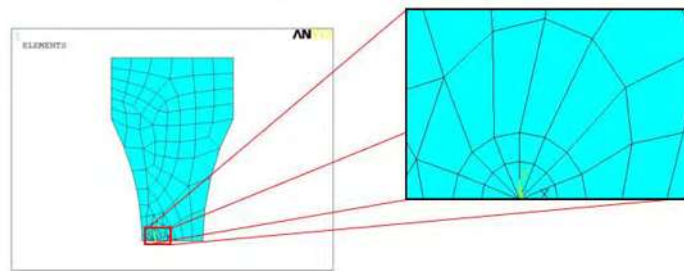


Figura 4. 7. Zona de análisis para determinar la integral J y el factor K.

Tabla 4. 2. Resultados para J y K a distintos niveles de carga.

<i>Desplazamiento (μm)</i>	<i>Esfuerzo Inducido (Sin fisura) (MPa)</i>	<i>Porcentaje de esfuerzo (% $\frac{\sigma}{\sigma_Y}$)</i>	<i>Factor "K" (Pa m^{1/2})</i>	<i>Integral J ($\frac{N}{m}$)</i>
14	3.34	7.42	236662.52	20.46
15	3.58	7.95	253566.99	23.48
16	3.82	8.48	270471.46	26.72
17	4.06	9.01	287375.92	30.16
18	4.29	9.54	304280.39	33.81
19	4.53	10.07	321184.85	37.68
20	4.77	10.60	338089.32	41.75
21	5.01	11.13	354993.79	46.02
22	5.25	11.66	371898.25	50.51
23	5.49	12.19	388802.72	55.21
24	5.73	12.72	405707.18	60.11
25	5.96	13.25	422611.65	65.23
26	6.20	13.78	439516.12	70.55
27	6.44	14.31	456420.58	76.08
28	6.68	14.84	473325.05	81.82

La finalidad de las simulaciones, es aproximar el comportamiento lo más posible a las condiciones reales del ensayo, lo cual incluye los modos y zonas de sujeción presentes en las probetas; por tal motivo, se aplica la carga de análisis en una zona intermedia que es precisamente la zona de sujeción de cada espécimen.

En los siguientes ensayos, se consideran tres niveles de carga para evaluar los parámetros de interés (K y J). Estos niveles de carga, son resultados obtenidos por simulación numérica y corresponden a los esfuerzos inducidos por el generador de alta frecuencia en el equipo para ensayos en fatiga ultrasónica.

Aplicando esfuerzos constantes en la zona de 6 mm de la probeta y variando las longitudes de fisura, se obtienen los siguientes resultados para K y J:

Tabla 4. 3. Resultados para K y J a una presión aplicada de 1.67 MPa.

<i>Fisura (mm)</i>	<i>Factor "K" (Pa m^{1/2})</i>	<i>Integral J ($\frac{J}{m^2}$)</i>
0.5	120514.126	5.30
1	174156.74	11.08
1.5	237614.42	20.62
2	332642.39	40.41
2.5	494819.05	89.42
3	765842.55	214.21
3.5	991228.31	358.84
4	1555458.17	883.63

Tabla 4. 4. Resultados para K y J a una presión aplicada de 2.505 MPa.

<i>Fisura (mm)</i>	<i>Factor "K" (Pa m^{1/2})</i>	<i>Integral J ($\frac{N}{m}$)</i>
0.5	180771.189	11.93
1	261235.11	24.92
1.5	356421.62	46.40
2	498963.59	90.93
2.5	742228.58	201.20
3	1148763.83	481.96
3.5	1486842.46	807.39
4	2333187.25	1988.16

Tabla 4. 5. Resultados para K y J a una presión aplicada de 3.34 MPa.

<i>Fisura (mm)</i>	<i>Factor "K" (Pa m^{1/2})</i>	<i>Integral J ($\frac{N}{m}$)</i>
0.5	241028.252	21.22
1	348313.48	44.31
1.5	475228.83	82.48
2	665284.79	161.65
2.5	989638.11	357.69
3	1531685.11	856.82
3.5	1982456.61	1435.35
4	3110916.33	3534.50

Las gráficas quedan representadas de la siguiente manera:

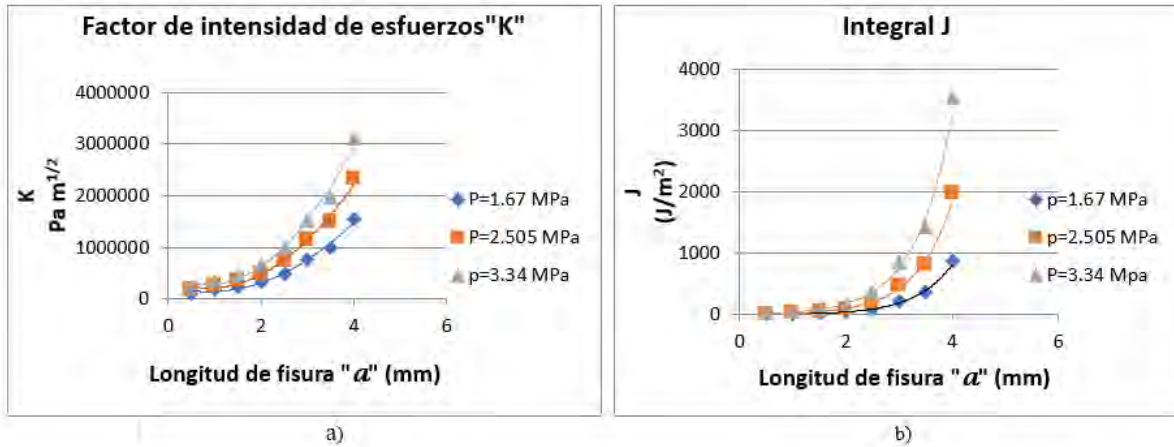


Figura 4. 8. Comportamiento de los parámetros de interés. a) Factor de intensidad de esfuerzos, b) integral J.

Como se puede apreciar, al graficar los resultados obtenidos se observa una evolución exponencial, que siguen el mismo comportamiento que resultados previos obtenidos en el material polimérico PC/ABS, registrado en la bibliografía [54].

4.2 FATIGA CONVENCIONAL

Se llevaron a cabo ensayos de fatiga convencional en especímenes de prueba del tipo compacto de tensión (CT), de acuerdo a la norma ASTM E647-00, con la finalidad de investigar la propagación de grietas en dos materiales polímeros diferentes: uno de ellos es el Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y otro, el polimetil metacrilato (PMMA). Todos los experimentos realizados fueron llevados a cabo mediante un equipo de pruebas experimentales desarrollado y construido como necesidad del proyecto de investigación y que permite llevar a cabo ensayos de flexibilidad y fatiga mecánica; ensayos llevados a cabo a una frecuencia de 0.25 Hz e induciendo máximos desplazamientos de 390 μm . El control de desplazamientos fue implementado usando una tarjeta programable ARDUINO y su respectivo código o rutina de programación, así como un sensor inductivo para las respectivas calibraciones y el cual permite capturar mediciones con una precisión de $\pm 4 \mu\text{m}$.

Se llevó a cabo el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos en su modo I, K_I , para distintas longitudes de fisura en ambos materiales y a diferentes amplitudes de desplazamiento. Importante señalar, el cálculo de la tasa de liberación de energía conforme crece una grieta, representado por G y considerando los aspectos tanto de esfuerzo plano, como de deformación plana, según la mecánica de la fractura.

Continuando con el análisis y terminados los ensayos experimentales, se procede a analizar las superficies de fractura mediante el escaneo con microscopía electrónica con la finalidad de enmarcar y registrar las principales tendencia y puntos relevantes que revelen aspectos significativos del inicio y propagación de fisuras bajo las condiciones descritas.

4.2.1 Especímenes de prueba

Las dimensiones de los especímenes empleados se describen a continuación en la Figura 4.9, de acuerdo a la norma ASTM E647-00.

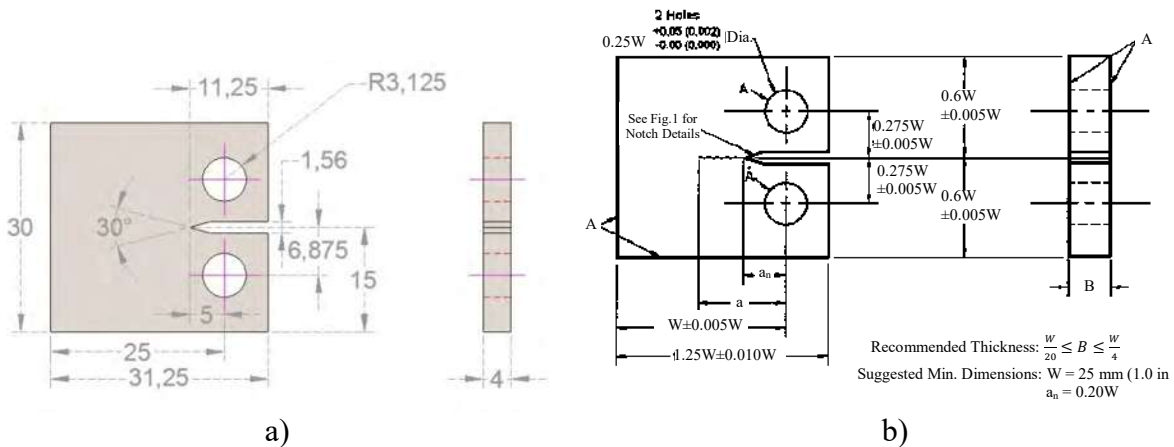


Figura 4. 9. a) Dimensiones de espécimen CT, b) Norma ASTM E647-00.

Como se aprecia, los parámetros geométricos principales a considerar son:

- $W = 25 \text{ mm}$
- $B = 4 \text{ mm}$
- $a_n = 5 \text{ mm}$

Para que de esta forma se puedan llevar a cabo los maquinados en los materiales correspondientes, teniéndose el siguiente resultado.

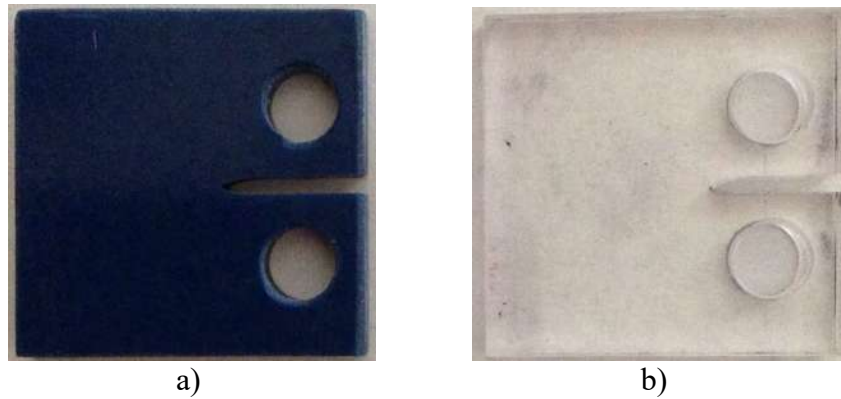


Figura 4. 10. a) Espécimen CT para ABS, b) Espécimen CT para PMMA.

Se considera una temperatura ambiente para la totalidad de los ensayos realizados (20-23 °C), sin tomar en cuenta el control de humedad ambiental (medida de humedad indicada al inicio de cada ensayo, tomando valores de 70 a 85%).

Uno de los puntos importantes a recordar en esta sección, es la consideración de la longitud y propagación de fractura, la cual se mide como se indica en la siguiente figura.

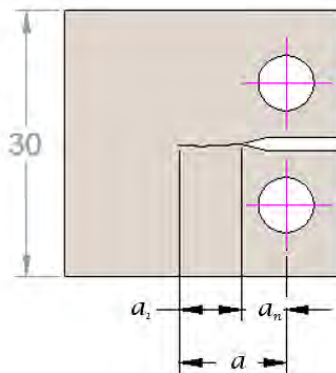


Figura 4. 11. Longitud de fisura a total.

Donde a_n , es la longitud inicial de fisuración generada por el proceso de maquinado de acuerdo a la normativa; a_2 , corresponde a la propagación de la fisuración debida al efecto de fatiga y a es la longitud total de fisuración.

4.2.2 Desplazamiento inducido permisible

A lo largo del presente estudio, se hace referencia a la normativa empleada para llevar a cabo la obtención de los especímenes de prueba. Debido a que el tipo de ensayo que se prevé realizar es de fatiga convencional de tracción-compresión, es indispensable que el esfuerzo al que se someten los especímenes de prueba, no rebase el límite elástico de los materiales en cuestión. De este modo, se utilizan herramientas para cálculos numéricos por elementos finitos para de este modo conocer dichos valores.

En una primera aproximación se obtuvo la simulación numérica para cada material y los resultados obtenidos se aprecian en la siguiente Figura 4.12 para el caso del ABS.

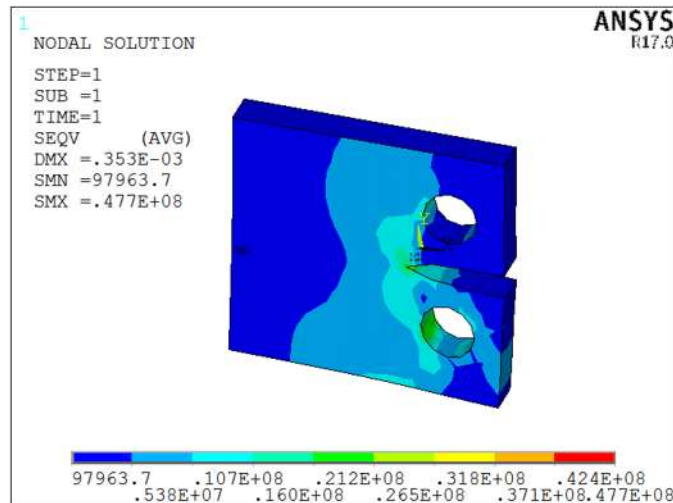


Figura 4. 12. Esfuerzos y desplazamientos a partir de una carga nominal $P=500$ N en material ABS.

En la figura anterior se muestra un espécimen de prueba al cual se le aplica una carga nominal de 500 N y que provoca un desplazamiento máximo de 353 μm . De igual forma, se ejerce un esfuerzo concentrado en el frente de fractura de 47.7 MPa.

Tomando en cuenta las consideraciones de desplazamiento máximo que se puede obtener en el equipo experimental para una frecuencia de 0.25 Hz con una relación de carga $R=-1$, se

determina que la carga máxima que se ejerce a los especímenes de prueba de material ABS es de 538 N, los cuales inducen un desplazamiento máximo de 380 μm .

Siguiendo la misma consideración de cálculo, se realiza la simulación correspondiente para el material PMMA.

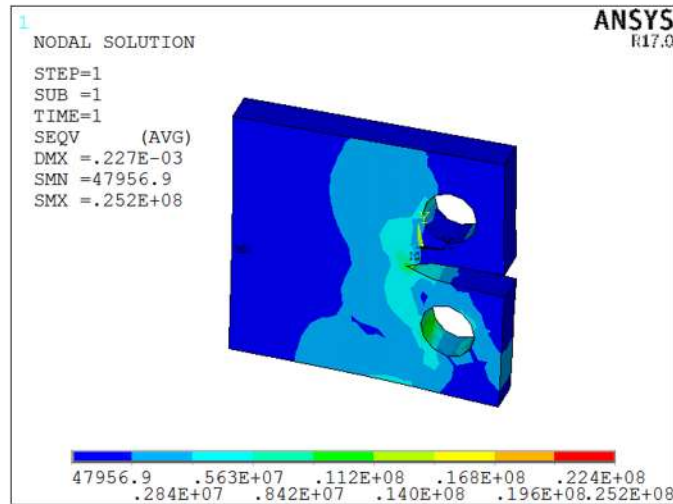


Figura 4. 13. Esfuerzos y desplazamientos a partir de una carga nominal $P=250$ N en material PMMA.

En el caso del PMMA, se ejerce una carga de 250 N (2MPa) para inducir un desplazamiento máximo de 227 μm .

Como primera consideración de ensayo, se tiene la limitante de inducir desplazamientos máximos del orden de 350 μm , pero se hace necesario corroborar dichos cálculos y considerar la totalidad de las variables que pueden afectar el comportamiento de la prueba. Retomando la configuración de sujeción y el modo de acoplamiento que se tendrá entre el espécimen y el equipo experimental se aprecia lo siguiente:

- El desplazamiento inducido se calibra en base al desplazamiento relativo (L) entre los pernos de sujeción.

- Se asume un acoplamiento sin fricción entre el perno y el espécimen de prueba con la finalidad de evitar esfuerzos debidos a un momentum una vez que se establece el movimiento.
- Uno de los pernos no presenta un movimiento de translación relativo al resto del equipo.
- El perno adicional combina el movimiento de translación y rotación durante el ensayo.

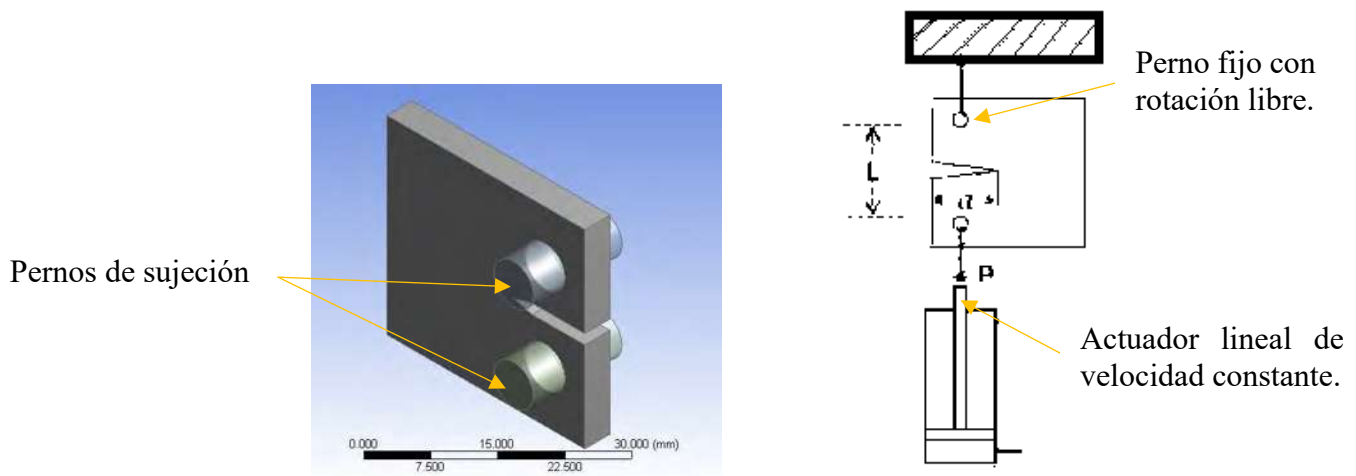


Figura 4. 14. Esquema de ubicación y aplicación de desplazamiento uniforme inducido.

Retomando las ultimas consideraciones, se realizan nuevas simulaciones por elemento finito para ambos materiales y así finalmente calcular los desplazamientos máximos apropiados en cada caso.

Tabla 4. 6. Desplazamiento máximo permitido en especímenes de ensayo.

<i>Material</i>	<i>Desplazamiento (μm)</i>
ABS	390
PMMA	340

La Tabla 4.6, enmarca el punto de partida de consideración para retomar las calibraciones y los posibles puntos adicionales a considerar en los niveles de carga y en la programación del sistema de control, cabe señalar que, para poder enumerar alguna conclusión valida, se espera

la repetitividad de los resultados en los diferentes ensayos en ambos materiales y a diferentes niveles de carga. De esta forma y con la finalidad de establecer un nivel de certeza y comparación que valide la experimentación, se consideran finalmente los niveles de carga expresados en la Tabla 4.7.

Tabla 4. 7. Desplazamientos inducidos en espécimen de prueba.

<i>Material</i>	<i>Desplazamiento (μm)</i>
ABS	390
	370
PMMA	340
	300
	270

Cada una de los desplazamientos sugeridos, se calibra y se programa mediante el sistema de control Arduino que controla la tarjeta correspondiente. Las generalidades del código de control se aprecian a continuación.

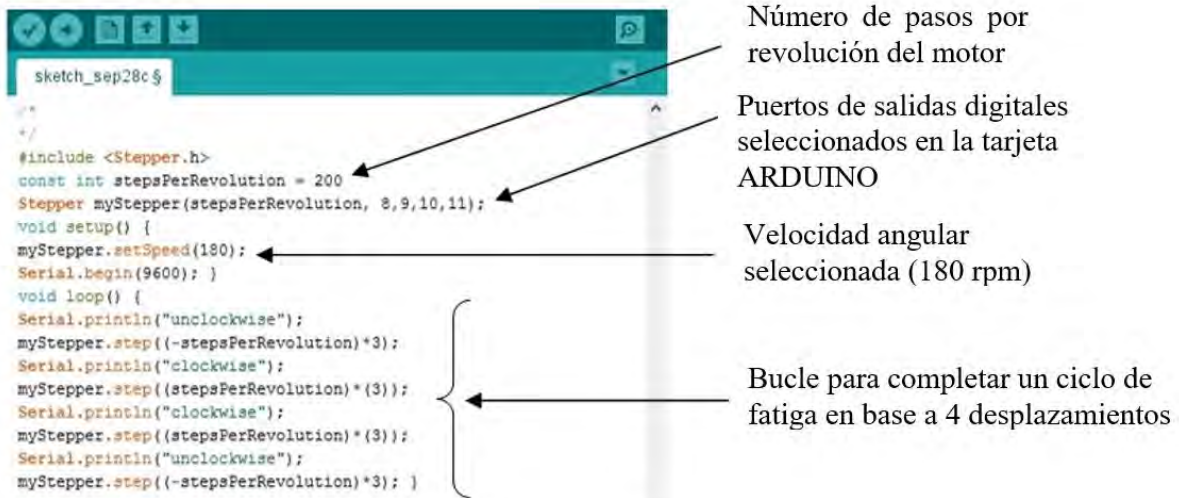


Figura 4. 15. Generalidades de programación ARDUINO.

La Figura 4.15. especifica que se requiere de cuatro desplazamientos para completar un ciclo de fatiga; recordando que el tipo de razón de carga que se emplea es $R=-1$, por lo tanto, en

un ciclo de fatiga se presentarán las siguientes condiciones. Un movimiento de compresión de $390\ \mu\text{m}$ en primer lugar, un movimiento descendente hasta la posición cero, un movimiento hacia abajo de $390\ \mu\text{m}$ de tensión y un movimiento ascendente hasta la posición cero. Dado que cada movimiento implica un segundo de tiempo, el período de prueba fue de 4 segundos y, en consecuencia, la frecuencia fue de $0,25\ \text{Hz}$ para todas las pruebas experimentales.

La certidumbre de cada ensayo, referente al desplazamiento que experimenta un espécimen, se evidencia, gracias a las mediciones realizadas con el sensor inductivo y de esta forma, se tienen gráficas representativas de medición en todos los casos. A continuación, se presenta una muestra típica de medición de desplazamientos, correspondiente a un desplazamiento total de $765\ \mu\text{m}$ totales con una razón de carga $R=-1$. Con la medición mostrada se presenta un desplazamiento aproximado de $380\ \mu\text{m}$ por etapa de tracción y $380\ \mu\text{m}$ por etapa de compresión.

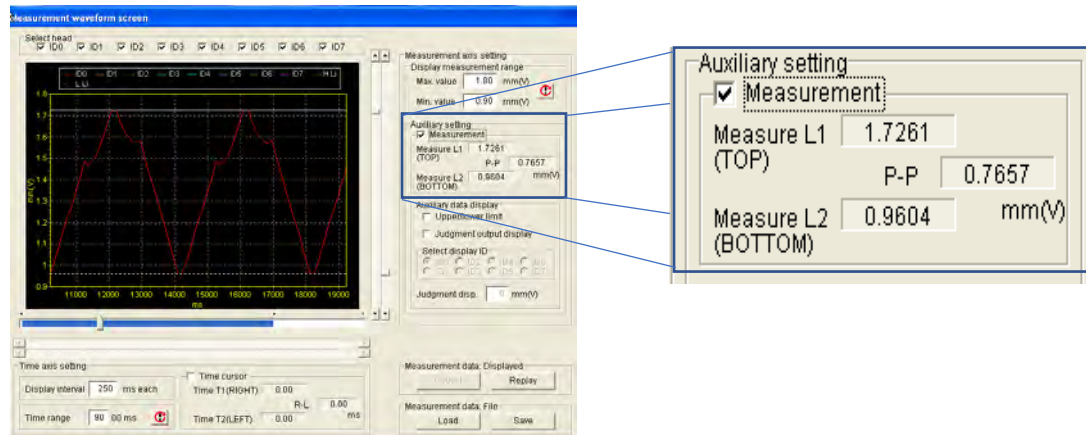


Figura 4. 16. Medición de desplazamiento utilizando sensor inductivo.

4.2.3 Configuración de ensayo experimental

Se muestra el dispositivo experimental, incluyendo el sensor inductivo para la medición y calibración de desplazamientos.

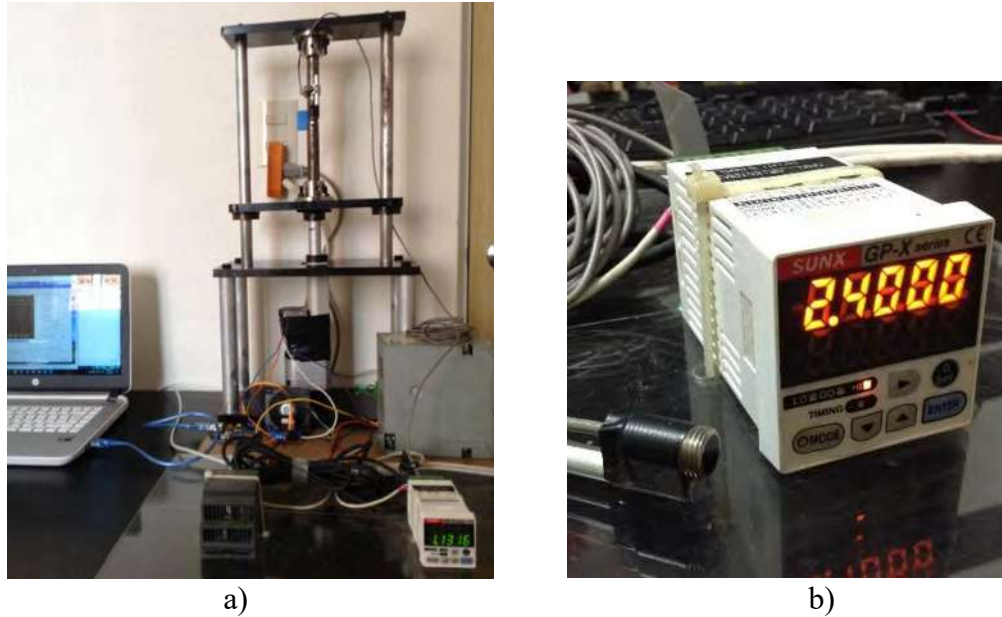


Figura 4. 17. a) Equipo experimental, b) Sensor inductivo de desplazamientos.

Se aprecia además el modo de sujeción empleado en la totalidad de los ensayos.

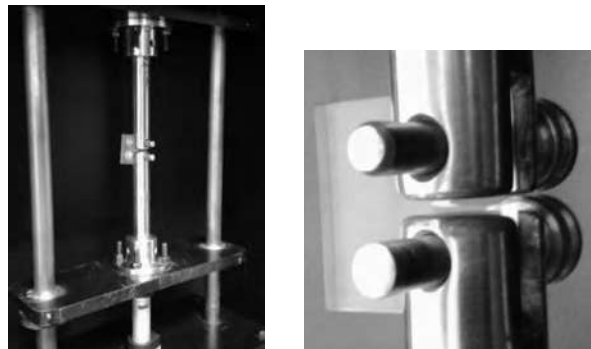


Figura 4. 18. Espécimen CT de PMMA acoplado a las barras de sujeción.

Es importante señalar, que el maquinado de las probetas de ensayo se realiza con el cuidado necesario de tal modo que no existe algún tipo de holgura o juego entre la probeta y los pernos de sujeción. Esto con la intención de evitar cualquier error al momento de inducir los desplazamientos.

En previos cálculos numéricos, se estable que los desplazamientos constantes que se inducen en los especímenes de prueba deben ser: 390 μm y 370 μm , para el material ABS, mientras que para el material PMMA, se tienen desplazamientos de 340 μm , 300 μm y 270 μm .

anterior con la finalidad de no sobrepasar el límite elástico de los materiales al momento de tensionarlos y ocasionar de ese modo una fractura instantánea.

Finalmente se procede a la realización de los primeros ensayos en fatiga convencional. A la par de los ensayos experimentales, se llevan a cabo los cálculos correspondientes de las fuerzas necesarias que se aplican a los especímenes, de modo que se garantice el desplazamiento esperado.



Figura 4. 19. Probetas empleadas para ensayos de fatiga convencional y crecimiento de fisura.

Tanto las probetas de material ABS como de PMMA, presentan una dirección de propagación de fisura muy similar, la diferencial principal radica en el tiempo de propagación



Figura 4. 20. Comportamiento preliminar de aparición y propagación de fisuras.

4.2.4 Obtención de la carga P mediante elementos finitos

En el presente apartado, se realizan las simulaciones numéricas para cada nivel de desplazamiento a diferentes longitudes de fisura (con incrementos de 2 mm), para de esta forma obtener la carga P. Recordar que, el hecho de llevar a cabo ensayos a desplazamiento constante, conlleva a que la carga disminuye conforme aumenta la fisuración, lo cual obliga a medir en cada caso la carga correspondiente en todo el avance de la fractura; o bien, el cálculo de la misma utilizando herramientas de elementos finitos.

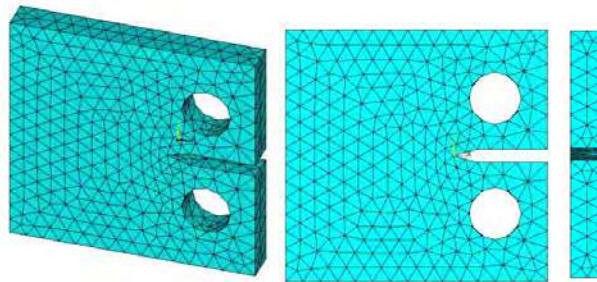


Figura 4. 21. Modelo numérico del espécimen empleado (CT).

Debido a la naturaleza de los ensayos, la simulación numérica para el cálculo de la carga P, debe ser lo más apegada a la realidad, evitando omitir detalles tanto de montaje como de condiciones de aplicación de desplazamientos y verificando en todo momento el comportamiento de los especímenes de prueba a lo largo del ensayo. La plataforma utilizada para dicho cálculo es ANSYS V17. La simulación numérica incluye lo siguiente:

- a) Trazo del perfil de prueba en sus condiciones originales, con la finalidad de obtener la carga inicial que será aplicada para inducir un desplazamiento específico.
- b) Identificar la zona de aplicación de la carga P para su determinación.
- c) Asumir un área de aplicación de la carga P, necesaria para establecer el desplazamiento máximo esperado.
- d) Verificar para cada longitud de fisura las condiciones anteriores.
- e) Comprobar P en cada longitud.

Debido a la naturaleza física de aplicación de la carga en el equipo experimental, la cual, como se ha apreciado se transfiere a base de pernos de sujeción, se establece el siguiente perfil de análisis, considerando el diámetro total de los pernos, como la zona de influencia para transferir el desplazamiento.

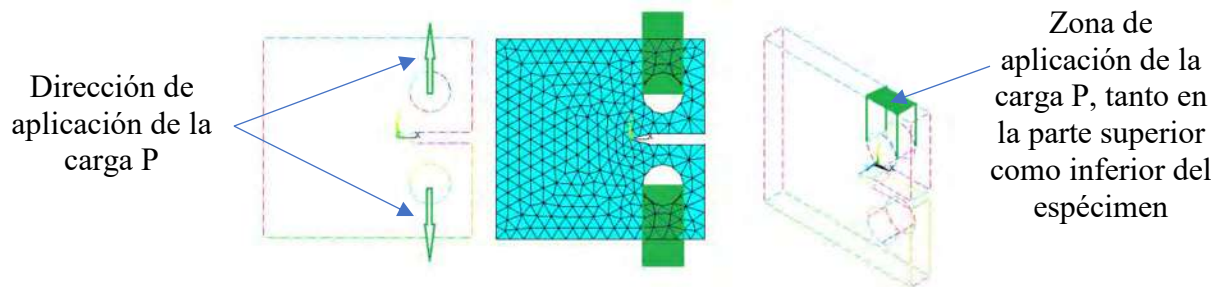


Figura 4. 22. Perfil original de análisis.

De este modo su puede reestructurar la geometría de análisis como se aprecia a continuación.

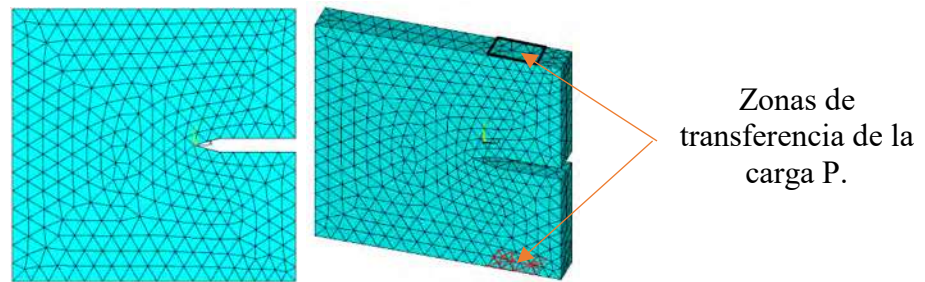


Figura 4. 23. Geometría de análisis.

Con lo cual se obtiene la solución.

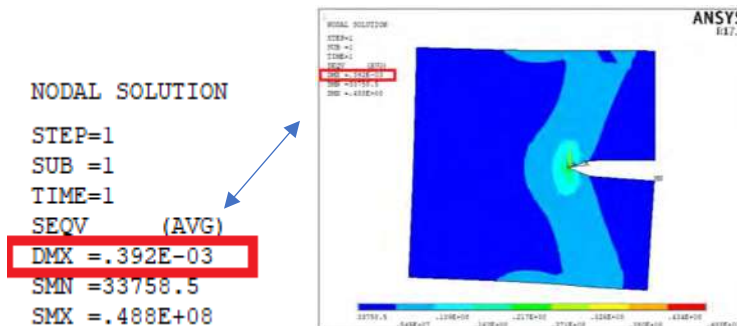


Figura 4. 24. Solución particular para un espécimen de ABS a 390 µm.

El hecho de calcular la fuerza P con este método, conlleva a realizar simulaciones por prueba y error induciendo esfuerzos en la zona de aplicación indicada en las figuras anteriores. Una vez que se obtiene el desplazamiento deseado para una longitud de fisura determinada, basta con identificar el esfuerzo inducido y calcular P en el área afectada. Completada la tarea para una determinada longitud de fisura, se repite el proceso para la longitud siguiente hasta hacer una estimación de la variación de P a lo largo de la longitud final de propagación.

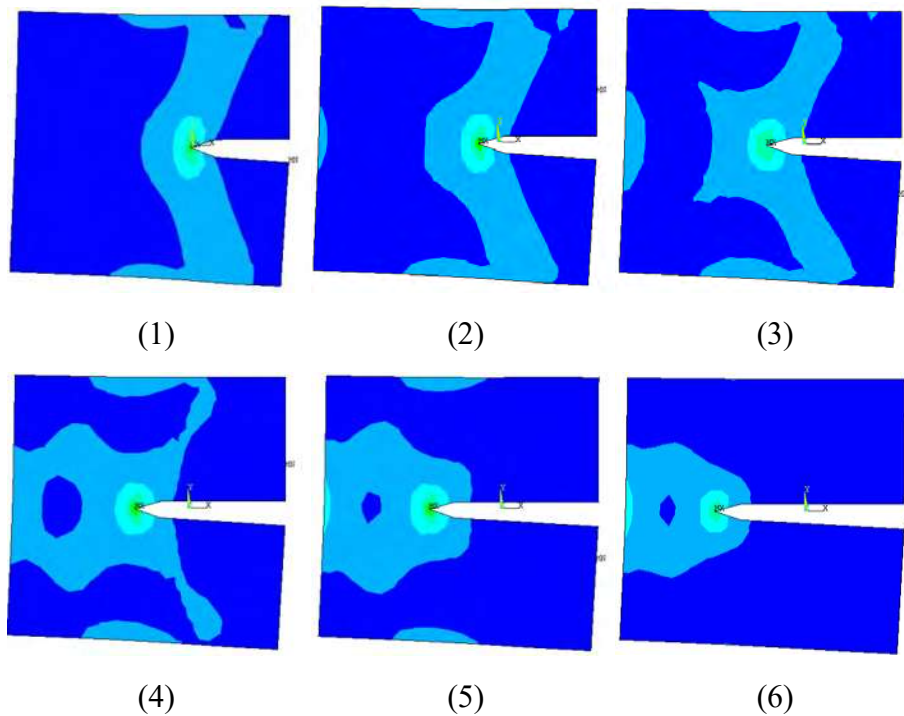


Figura 4. 25. Propagación de una fisura desde su condición inicial.

La Figura 4.25, muestra la propagación teórica representada en un análisis por elemento finito de una fisura a partir del espécimen de prueba CT en sus condiciones originales. En la figura se muestra una propagación total de 10 mm, considerando incrementos de 2 mm en cada caso. Dicho análisis de propagación se lleva a cabo a lo largo de la fisura hasta llegar a la ruptura total, o bien, hasta que físicamente el ensayo experimental arroje resultados en los que la fractura ya no sigue creciendo.

La misma consideración se toma para los diferentes niveles de desplazamiento en los dos materiales estudiados.

Los valores correspondientes al cálculo de la carga P conforme aumenta la grieta en especímenes de prueba CT para los materiales ABS y PMMA se presenta en la siguiente figura.

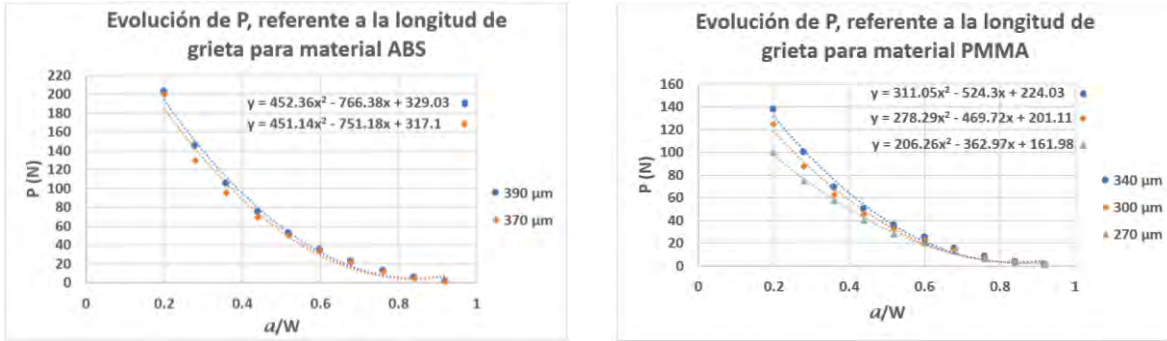


Figura 4. 26. Evolución de P a partir de la adimensionalización del crecimiento de grieta a/W , para ABS y PMMA usando diferentes desplazamientos.

Las gráficas anteriores revelan el hecho de que las cargas máximas que pueden aplicarse en el presente estudio son: ≈ 200 N para el ABS y ≈ 140 N para el PMMA. Los datos obtenidos para P, permiten el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos en base a dos expresiones polinomiales diferentes [47] [2] [26] [23]:

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f \left[\frac{a}{W} \right] \quad (4.1a)$$

$$f \left[\frac{a}{W} \right] = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (4.1b)$$

$$K_I = \frac{P}{B} \sqrt{\frac{\pi}{W}} \left[16.7 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} - 104.7 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}} + 369.9 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{5}{2}} - 573.8 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{7}{2}} + 360.5 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{9}{2}} \right] \quad (4.2)$$

Donde w es el ancho original del espécimen, P es la carga aplicada, B es el espesor y a/w , es el valor adimensional calculado por la razón de la longitud de grieta y el ancho original de las probetas.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS

La determinación del factor de intensidad de esfuerzos K_I , es elemental para establecer los parámetros físicos que influyen en la aparición y propagación de la fisuración. De este modo, los resultados para el mismo, se ilustran a continuación:

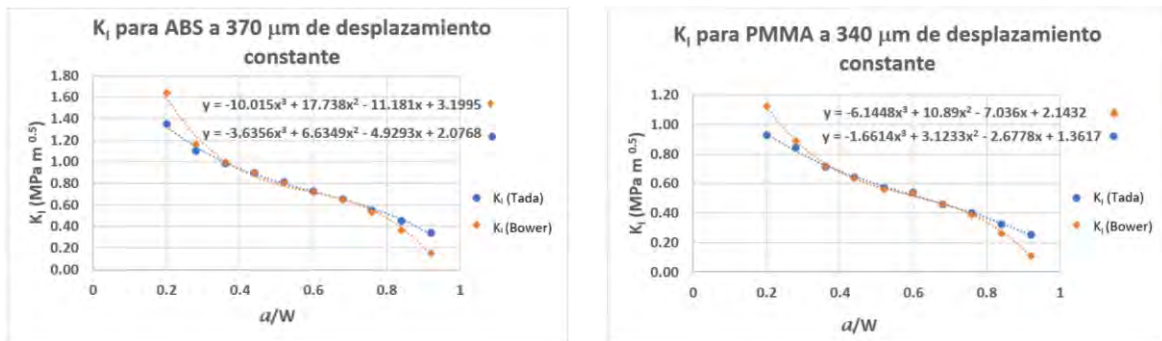


Figura 5. 1. Factor de intensidad de esfuerzos K_I , a partir de los modelos propuestos.

Los valores calculados para el factor de intensidad de esfuerzos K_I , revelan que este decrece conforme aumenta la longitud de fisura [55] [56]; importante es el hecho de que el cálculo de dichos valores con las dos expresiones utilizadas, reflejan una buena aproximación principalmente en los valores centrales de la fisuración.

Se considera que los efectos viscosos son despreciables debido a los bajos rangos de aplicación de la carga y a la baja frecuencia de los ensayos, revelando que la energía absorbida por deformación elástica es mucho mayor en comparación de la energía disipada por efectos viscosos cuando las frecuencias de trabajo están por debajo de 1Hz [57] [58].

La determinación del factor K_I , nos permite calcular un par de parámetros importantes en mecánica de la fractura: la tasa de liberación de energía, y la medida de la zona afectada en cada crecimiento de fisura [2]. Las ecuaciones consideradas son las enmarcadas en el capítulo 1, para el análisis en esfuerzo plano y deformación plana.

$$G = K_I^2 \frac{1}{E}, \quad G = K_I^2 \frac{(1-\nu^2)}{E}, \quad \rho = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_c} \right)^2 \quad (5.1)$$

Donde ν , es el módulo de Poisson y σ_c , es el esfuerzo de cedencia del material en cuestión. Así, los valores para la tasa de relajación de energía corresponden a los enmarcados en las Figura 5.2 y 5.3.

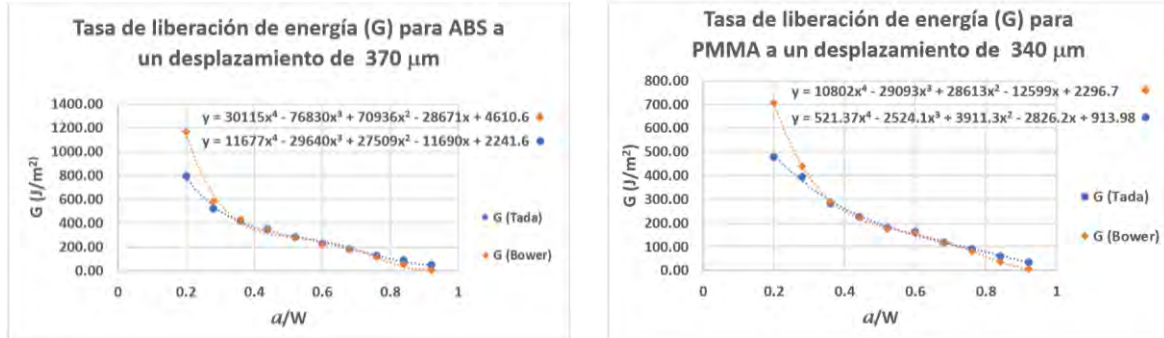


Figura 5. 2. Tasa de relajación de energía (G) considerando esfuerzo plano.

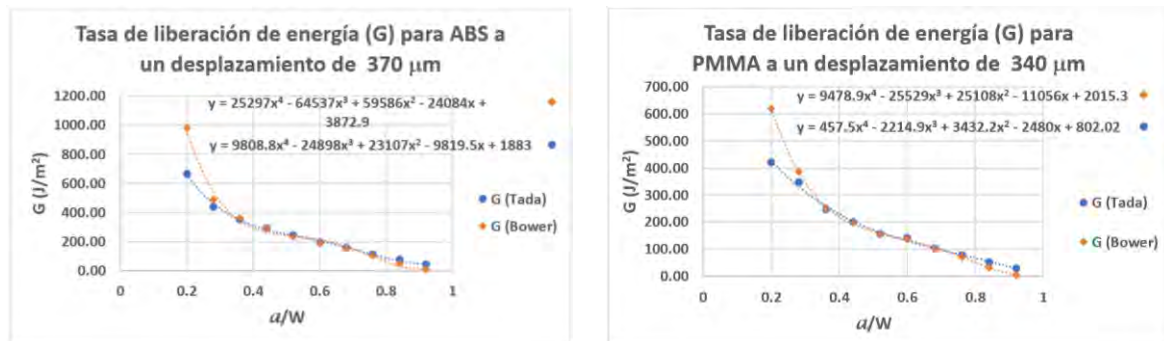


Figura 5. 3. Tasa de relajación de energía (G) considerando deformación plana.

El las gráficas para G, se aprecia una notable diferencia para el cálculo de dichos valores al inicio de la fisuración. Tal diferencia decrece a cero rápidamente cuando la grieta ha crecido en una razón de $a/w=0$ y se mantiene así hasta el final de la propagación.

Para la zona de daño, o bien, el tamaño de la zona de afectación en el frente de fisura; se tiene:

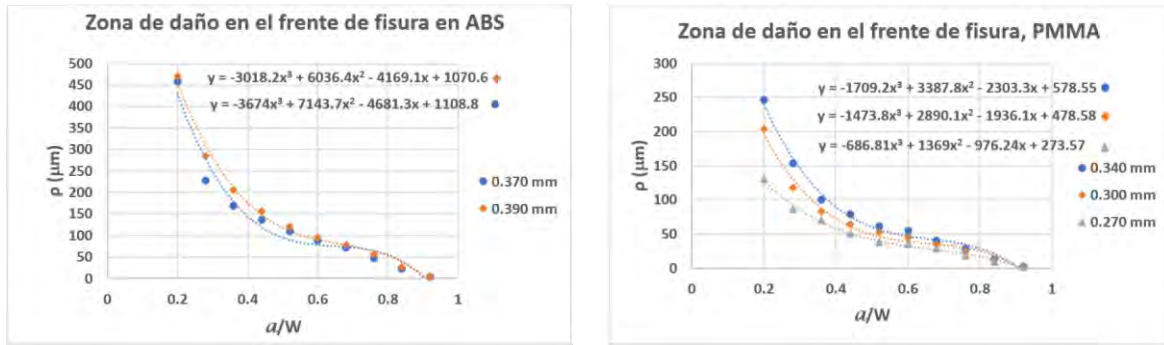


Figura 5. 4. Evolución de la medida en la zona de daño (zona de agrietamiento) localizada en el frente de fisura.

La longitud de agrietamiento aumenta con el aumento del desplazamiento constante aplicado, particularmente al comienzo de la propagación de grietas. Este comportamiento se presenta principalmente en el material PMMA debido a su naturaleza más frágil en comparación con el polímero ABS. La longitud de fisuración, es más alta cuando se inicia la propagación a para desplazamientos constantes aplicados; este valor, tiende a cero cuando a / W alcanza un valor de 0.9 aproximadamente, para los dos polímeros de prueba.

Con respecto al material de ABS, las pruebas de desplazamiento constante inducen que la fisuración detenga su propagación cuando $a / W \approx 0.9$, revelando que el rango del factor de intensidad de tensión experimental ΔK_I en este punto se vuelve más bajo que el umbral del rango del factor de intensidad de tensión (ΔK_{TH}); para este polímero se han registrado valores para el umbral de rango del factor de intensidad de esfuerzos ΔK_{TH} , que van desde 0.6 a 1 MPa m^{0.5} [59]. De esta forma, usando el estándar ASTM E-647 para evaluar el rango del factor de intensidad de esfuerzos ΔK , se tienen la ecuación:

$$\Delta K_I = \frac{\Delta PR}{B\sqrt{W}} \frac{2+\frac{a}{W}}{\left(1-\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (5.2)$$

Donde ΔPr es el rango de carga de fatiga (2.5 N para $a/W = 0.92$). La última ecuación arroja un resultado de: $\Delta KI \approx 0.66 \text{ MPa m}^{0.5}$ que es levemente más bajo comparado con ΔK_{TH} de este material, lo que lleva a que la propagación de fisura se detenga.

Con respecto al polímero PMMA, los valores registrados en la literatura para ΔK_{TH} varían de 0.1 a 0.8 MPa $m^{0.5}$, para bajas tasas del factor de intensidad de esfuerzos y razones de carga R que varían de -1 a 0.1 [60] [61] [62] [61]. El valor calculado para ΔKI de la ecuación 5 con: $\Delta Pr = 1.8 \text{ N}$ y $a/W = 0.9$, produce: $\Delta KI = 0.48 \text{ MPa m}^{0.5}$ que es un valor comprendido entre el rango de ΔK_{TH} para este material polimérico. Además, el valor de la resistencia a la fractura a temperatura ambiente de PMMA que se ha obtenido por indentación y por pruebas de flexión [63], han reportado valores: 1.25 MPa $m^{0.5}$ por indentación usando la ecuación de Laugier [64]; y 1.61 MPa $m^{0.5}$ para ensayos de flexión tres puntos y 1.42 MPa $m^{0.5}$ en el caso de flexión cuatro puntos.

En base a los ensayos experimentales se pueden concluir lo mostrado en las siguientes gráficas:

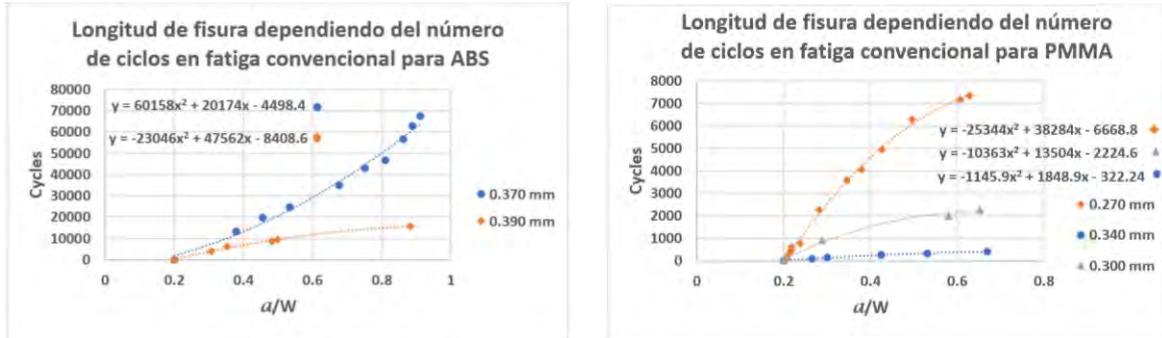


Figura 5. 5. Número de ciclos de ensayo correspondientes a cada longitud de fisura.

Las mediciones en los desplazamientos inducidos pueden ser plasmados apropiadamente debido al sensor inductivo utilizado durante cada ensayo, al igual que la variación representativa en el crecimiento de fisuras en relación al número de ciclos, o bien, al tiempo transcurrido. En las Figuras 5.6 y 5.7, se muestran longitudes de fisura características de cada material y que están relacionadas directamente con el número de ciclos de cada ensayo.

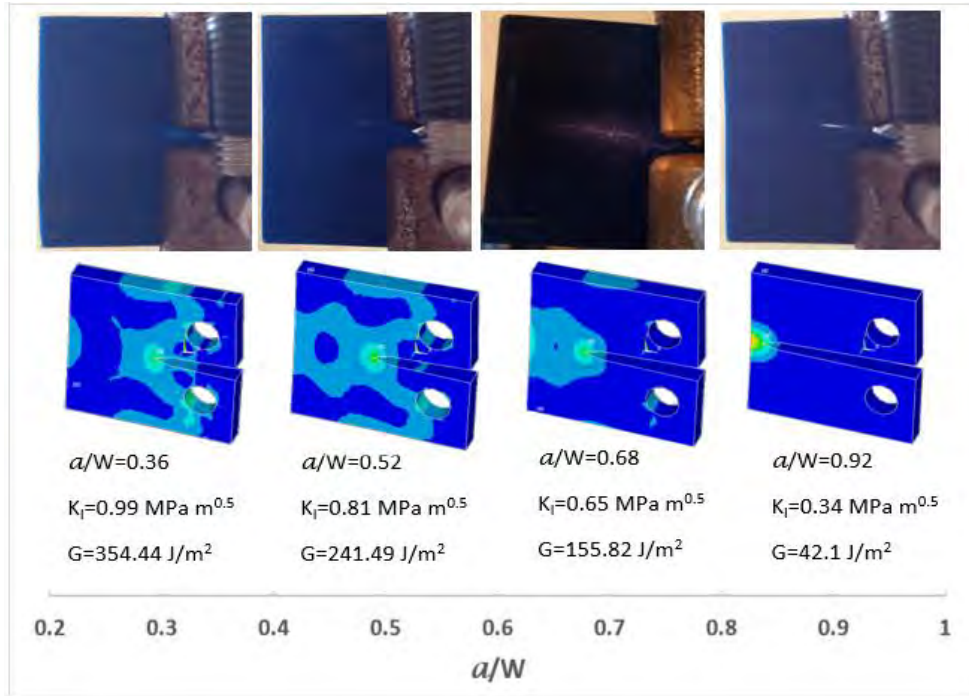


Figura 5. 6. Propagación de fisuras representativas en material ABS con un desplazamiento de 370 μm .

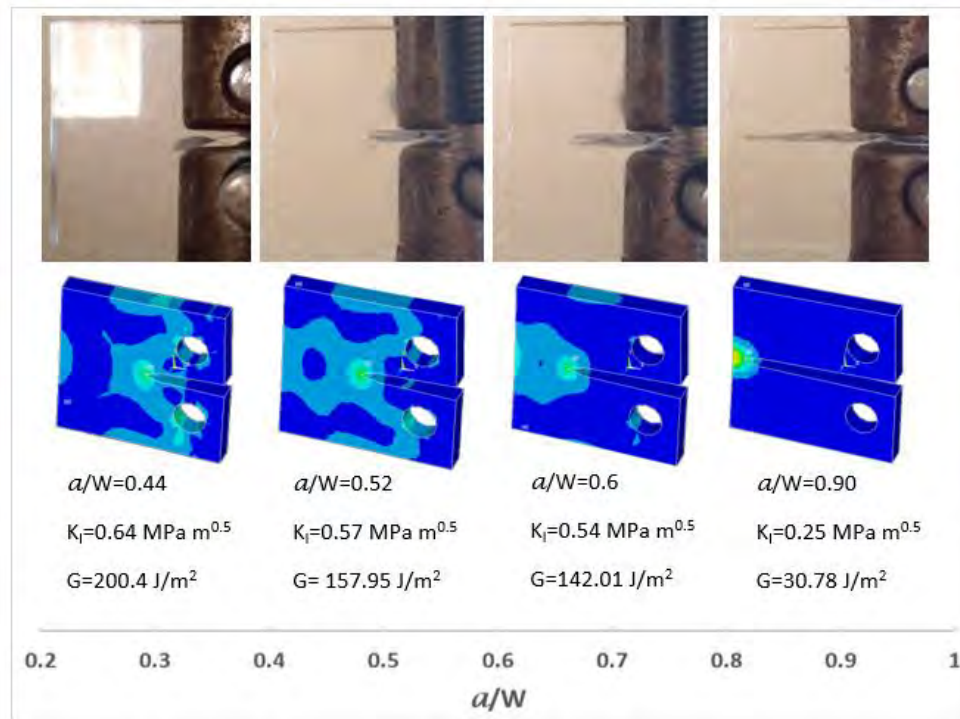


Figura 5. 7. Propagación de fisuras representativas en material PMMA con un desplazamiento de 340 μm .

5.2 SUPERFICIES DE FISURACIÓN

Una vez terminados los ensayos experimentales, se hace necesaria la inspección de las superficies de fractura en cada caso para ambos materiales y a los diferentes niveles de carga. Primeramente, se aprecian fibras de agrietamiento en el inicio de la fisuración en ambos materiales, las cuales aumentan la resistencia a la fractura en el material ensayado [65] [66] [67]., seguido de una notable disminución de las fibras de fisuración y dando paso a zonas de agrietamientos mayores de zonas embotadas [68] donde se aprecian bandas de estriación en el sentido de crecimiento, hasta llegar a un punto en el que claramente se detiene la propagación de la fisuración.

Se consideran muestras representativas para las visualizaciones en el microscopio electrónico.

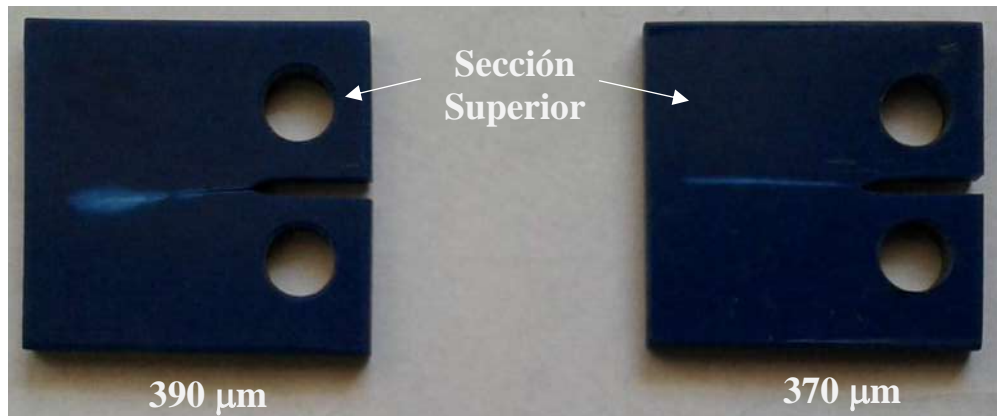


Figura 5. 8. Muestras representativas de ABS a los distintos desplazamientos inducidos.

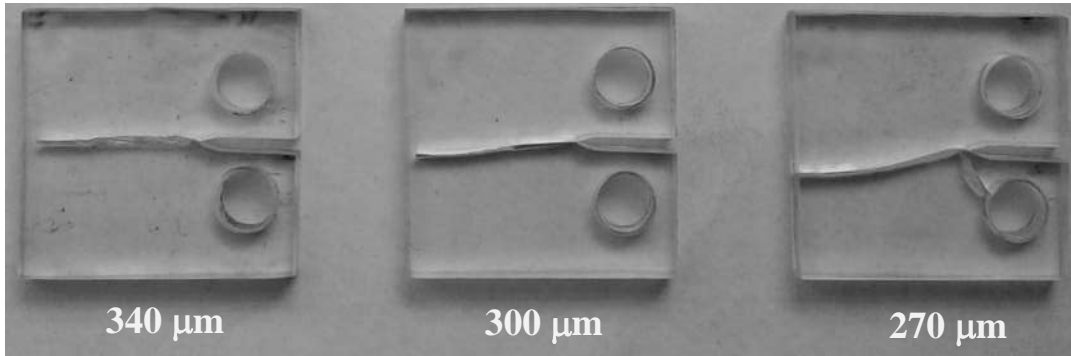


Figura 5. 9. Muestras representativas de PMMA a los distintos desplazamientos inducidos.

El hecho de tener diferentes niveles de aplicación de desplazamientos, conyeva notables diferencia en el patron general de propagacion de la grieta, con los cual de tiene :

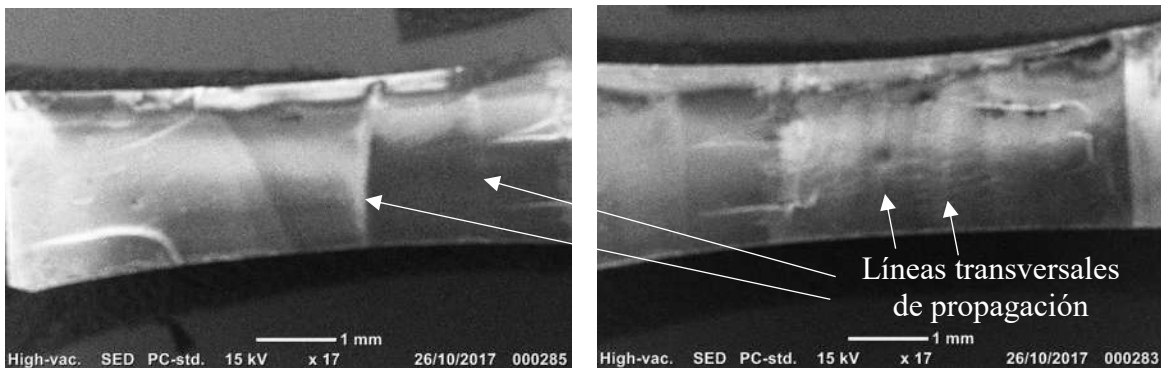


Figura 5. 10. Superficie superior de fisuración en ABS a 390 μm.

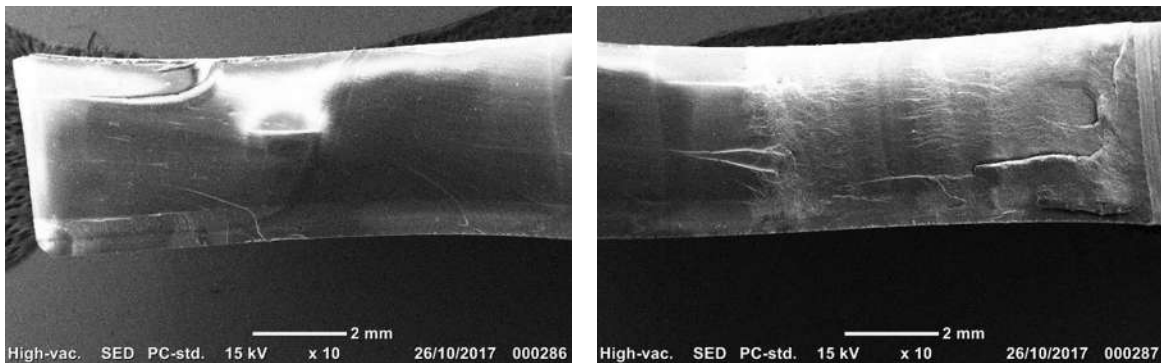


Figura 5. 11. Superficie inferior de fisuración en ABS a 390 μm.

En los ensayos realizados sobre material ABS, a un desplazamiento de $390\ \mu\text{m}$, se pueden apreciar marcas transversales que indican periodos de crecimiento de fisuras, que pudieron presentarse debido al tiempo de exposición de la carga. Existe la posibilidad de que, debido a la naturaleza del material, los periodos de propagación de fisuración aparentemente se detienen, seguidos de cortos periodos de tiempo con crecimientos pequeños. De igual forma, se aprecian estriaciones importantes en sentido longitudinal al inicio de la propagación de las fisuras, este último comportamiento es recurrente en la totalidad de los ensayos tanto en el material ABS, como en el PMMA.

Las Figuras 5.12 y 5.13, muestran las superficies de probetas de ABS ensayadas a un desplazamiento de $370\ \mu\text{m}$, en este caso, las estriaciones longitudinales se marcan de forma importante al inicio de la fisura, pero el resto de la superficie se presenta con irregularidades menos pronunciadas, con lo que se puede atribuir este hecho al tiempo prolongado de duración del ensayo los cuales tuvieron lugar en un lapso de tiempo cercano a las 100 horas.

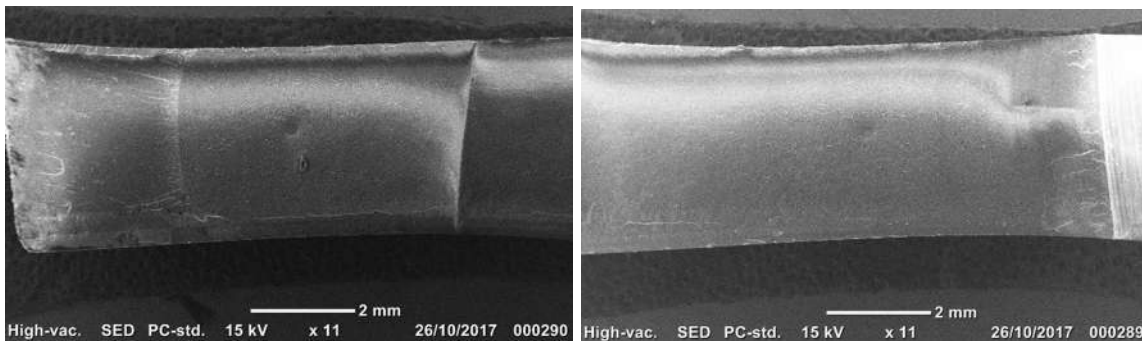


Figura 5. 12. Superficie superior de fisuración en ABS a $370\ \mu\text{m}$.

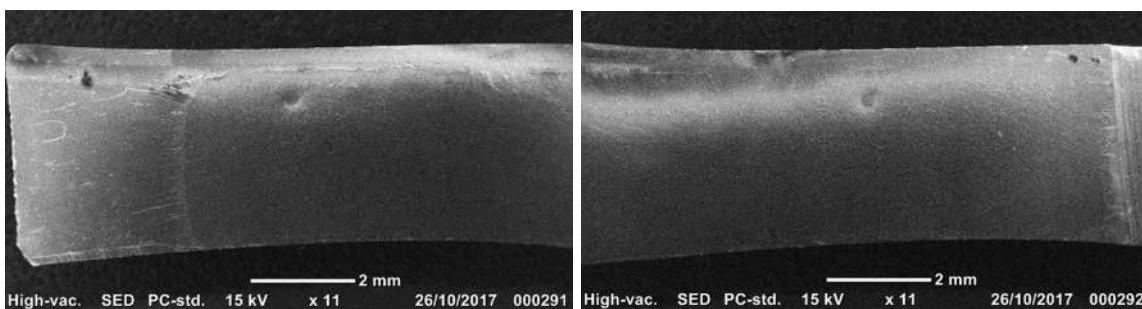
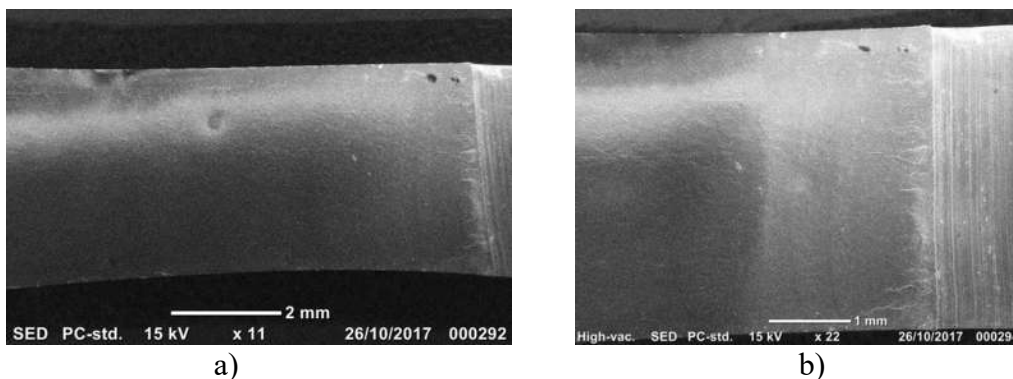


Figura 5. 13. Superficie inferior de fisuración en ABS a $370\ \mu\text{m}$.

En el lapso de tiempo de propagación de fisuras del material ABS ensayado a $370 \mu\text{m}$, se aprecia una propagación de la fractura relativamente rápida en las primeras 40 horas de ensayo, lo cual ocasiona fracturas que abarcan cerca del 65% de la longitud total de la probeta. Las propagaciones finales, una vez que se ha alcanzado un valor cercano a $a/W=0.75$, se desarrollan en un periodo largo de tiempo, lo que nos indica que el efecto de la fuerza aplicada para lograr los desplazamientos esperados, deja de tener una influencia relevante en el crecimiento y que al ser tan pequeña en esos puntos finalmente la fractura dejará de propagarse (comúnmente en valores comprendidos entre $a/W=0.9$ y $a/W=0.92$).

Las tendencias generales son las siguientes: el alto grado de agrietamiento se encuentra al comienzo de la propagación de la fractura, ya que la mayor carga en desplazamiento constante se aplica al comienzo de las pruebas; estas grietas (o fibrillas) en los polímeros aumentan la tenacidad a la fractura del material en dicha etapa de propagación y son perpendiculares a la carga aplicada [65] [66] [67]. Además, en las Figuras 5.14a y 5.14b, se muestran las estriaciones de propagación por fatiga, principalmente al comienzo de la grieta, seguida de una región desafilada con una disminución notable del agrietamiento [68]. La Figura 5.14c ilustra la zona final de propagación de grietas, donde el agrietamiento es insignificante (región desafilada), y se observa claramente la línea final de la propagación de la grieta y la zona de fractura generada manualmente después de la prueba.



Fibras de agrietamiento

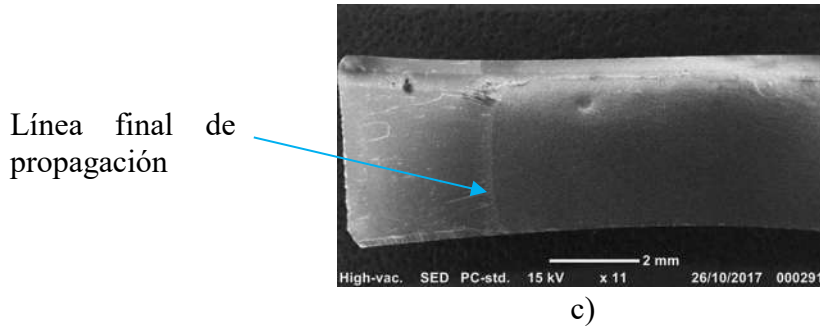


Figura 5. 14. Superficies de fisura en ABS, con 370 µm de desplazamiento.

A partir de la Figura 5.15 a 5.20, se pueden apreciar las superficies de fractura para distintos niveles de desplazamiento aplicado al material PMMA.

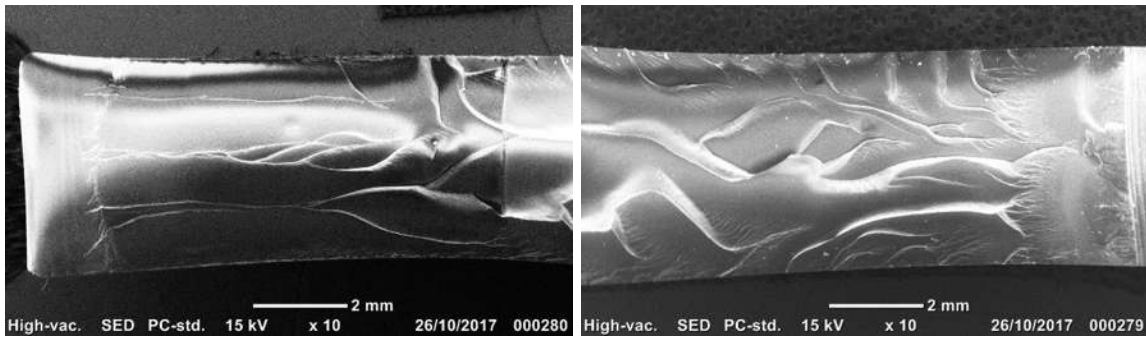


Figura 5. 15. Superficie superior de fisuración en PMMA a 340 µm.

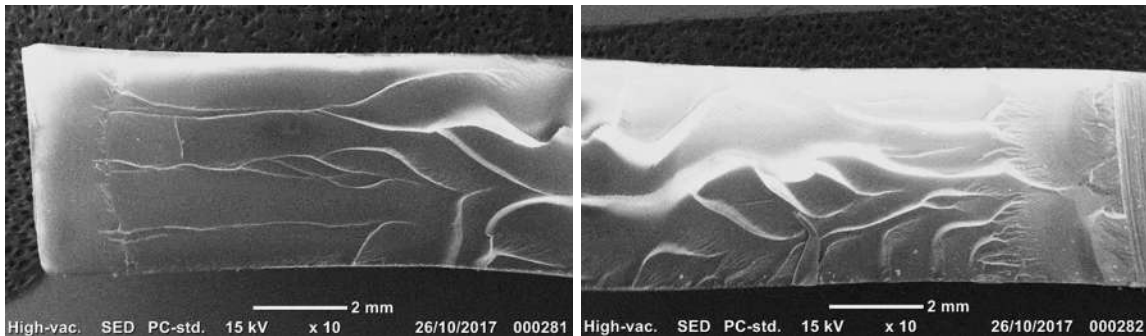


Figura 5. 16. Superficie inferior de fisuración en PMMA a 340 µm.

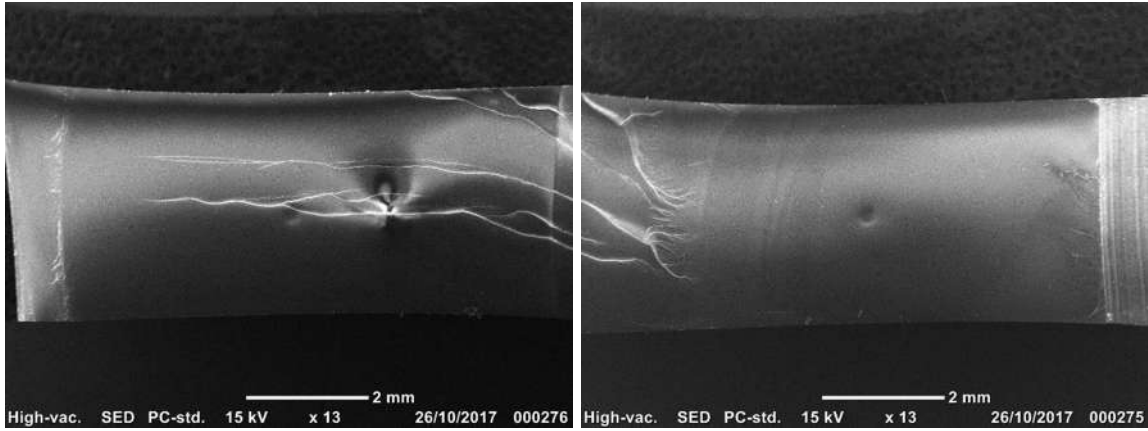


Figura 5. 17. Superficie superior de fisuración en PMMA a 300 μm .

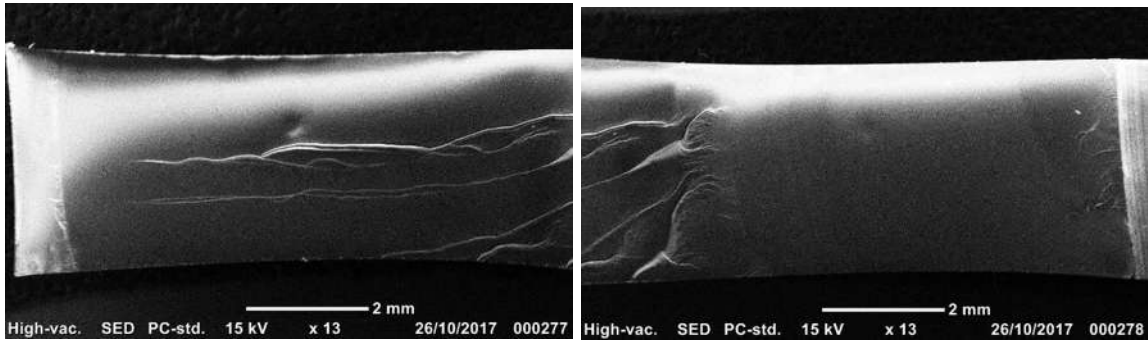


Figura 5. 18. Superficie inferior de fisuración en PMMA a 300 μm .

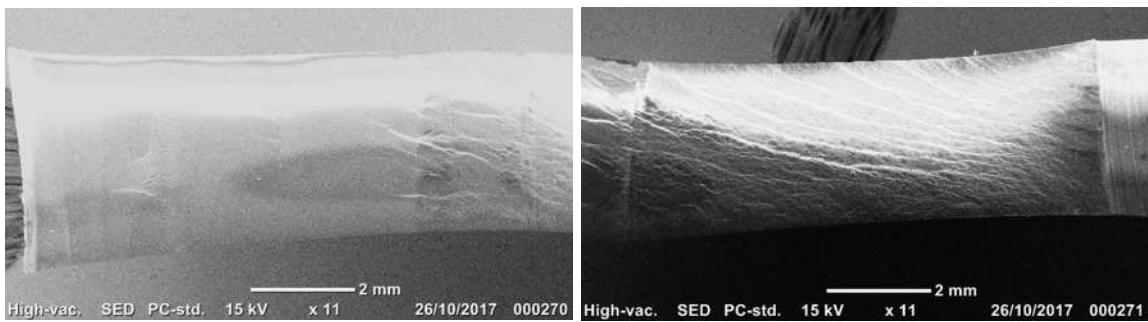


Figura 5. 19. Superficie superior de fisuración en PMMA a 270 μm .

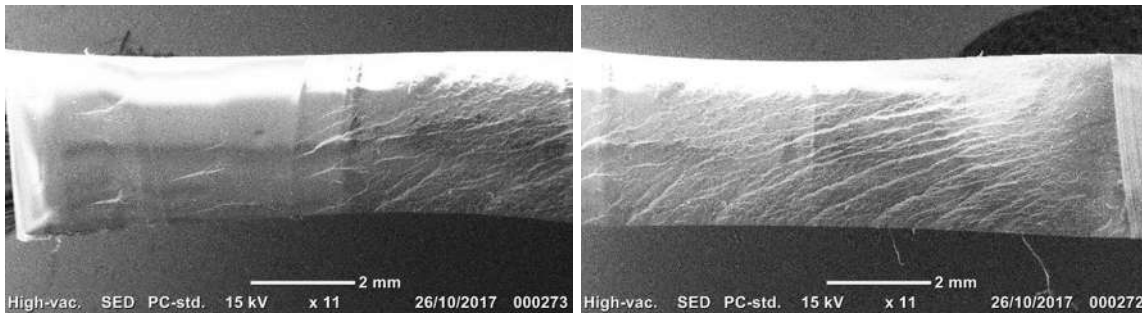


Figura 5. 20. Superficie inferior de fisuración en PMMA a 270 μm .

Independientemente de la aplicación de la carga (magnitud de desplazamiento constante), las tendencias generales de propagación de grietas en PMMA a baja velocidad de deformación son los siguientes: zona “espejo” perceptible al inicio, seguida por estrías de propagación de grietas (que corresponde a una carga elevada), acompañado con grietas apreciables [69] [70]. Más adelante, las estrías disminuyen con dos patrones diferentes según la carga aplicada: alta densidad de finas grietas o fibrillas para una carga aplicada baja, que tienden a disminuir con la carga aplicada. La longitud de las fibras de crecimiento en el material PMMA bajo pruebas de fatiga, revelan que, independientemente de la relación de carga R; dichas fibras dependen solo del factor de intensidad de tensión local (la carga aplicada, la longitud de la grieta y las dimensiones del espécimen) [71]. Además, para la condición de carga más baja que se aplicó (270 μm de desplazamiento constante), el agrietamiento disminuye antes de la línea final de propagación de las grietas, como se muestra en la Figura 5.21d.

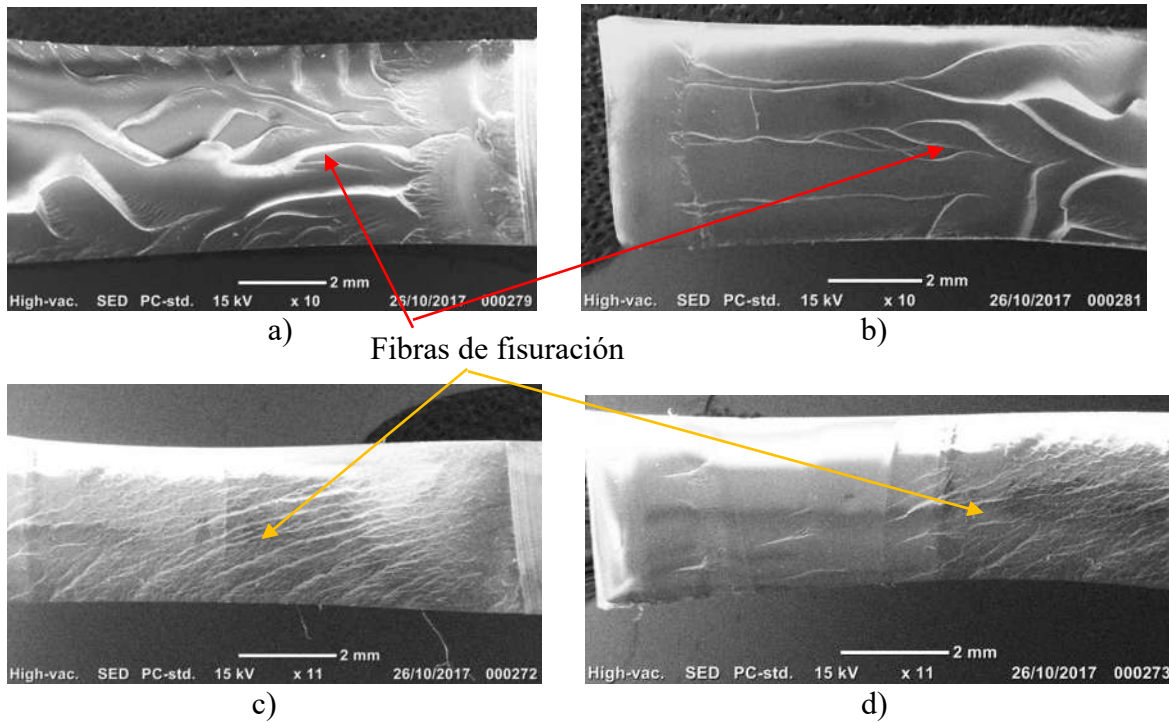


Figura 5. 21. Superficies de fisura de PMMA. Con 340 y 270 μm de desplazamiento.

CONCLUSIONES

1. Es posible desarrollar ensayos mecánicos bajo la consideración de desplazamiento constante en materiales polímeros para la determinación del factor de intensidad de esfuerzos (K) y de la tasa de liberación de energía (G) conforme crece una fisura (a).
2. La propagación de grietas se ha estudiado bajo la consideración de desplazamiento constante en muestras de CT en base a la norma ASTM E647-00, para dos materiales poliméricos: ABS y PMMA.
3. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en una máquina de prueba diseñada y fabricada dentro de la continuidad del proyecto de investigación.
4. La carga aplicada, el factor de intensidad de tensión y la tasa de liberación de energía disminuyen conforme se propaga una fisura en los materiales, bajo esta modalidad de desplazamiento constante.
5. Se realizaron pruebas experimentales bajo tasas bajas de factor de intensidad de tensiones y bajas tasas de deformación, por lo que no se consideran efectos viscosos durante la propagación de grietas.
6. Los parámetros de fractura se obtuvieron usando dos modelos para el factor de intensidad de tensión: los modelos Tada y Bower, y para diferentes cargas aplicadas en ambos polímeros.
7. Con el equipo desarrollado en la facultad, se pueden inducir desplazamientos máximos de 390 μm ; desplazamiento suficiente para ejercer condiciones de tracción-compresión ($R=-1$) sin sobrepasar el límite elástico de los materiales de estudio a una frecuencia de 0.25Hz.
8. La fuerza máxima ejercida sobre el material ABS fue de 202.5 N, mientras que para el PMMA fue de 137.5 N.
9. El factor de intensidad de esfuerzos máximo obtenido para el ABS es de 1.6 MPa $\text{m}^{0.5}$, mientras que para el PMMA fue de 1.13 MPa $\text{m}^{0.5}$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Duga, J.J., Fisher, W.H., Buxbaum, R.W., Rosenfeld, A.R. y Mc Millan, S.C., «The economic effects of fracture in the United States, Part 2-Report to NBS,» *Batelle Columbus Laboratories, Technical Report, Special Publication*, 1983.
- [2] Anderson T.L., *Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications*, Taylor & Francis. Tercera Edición, 2005.
- [3] Arana, J.L. y Gonzalez, J.J., *Mecánica de la Fractura*, Universidad del País Vasco, 2002.
- [4] Griffith, A.A., «The phenomena of rupture and flow in solids,» *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A221*, pp. 163-198, 1921.
- [5] Williams, M.L. y Ellinger, G.A., «Investigation of Structural Failures of Welded Ships,» *Welding Journal*, vol. 32, pp. 498-528, 1953.
- [6] Erdogan, E. , «Fracture Mechanics,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 27, pp. 171-183, 2000.
- [7] Irwin, G. , «Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate,» *Journal of Applied Mechanics* , vol. 24, pp. 361-364.
- [8] Domínguez Almaraz, G.M. y Guzmán Tapia, M., «Máquina para pruebas de fatiga en flexión rotativa a gran número de ciclos». Patente MX276818, 2010.
- [9] Domínguez Almaraz, G.M., Avila Ambriz, J.L. y Cadenas Calderon, E., «Fatigue endurance and crack propagation under rotating bending fatigue tests on aluminum alloy AISI 6063-T5 with controlled corrosion attack,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 93, pp. 119-131, 2012.

- [10] ASM HANDBOOK, *Fatigue and Fracture (ref 1)* A. WOHLER, Z. BAUM, vol. 19, ASM International, 1996.
- [11] Yung- Li Lee, Jwo Pan, Hathaway R.B. y Barkey. M.E., *Fatigue testing and analysis*, Elsevier, 2005.
- [12] ASM HANDBOOK, *Fatigue and Fracture (Ref 2)* ASTM E 1150-1987, Standard Definition of Fatigue, Annual Book of standards, ASTM, vol. 19, ASM International, 1995, pp. 753-762.
- [13] Manson, S.S., «Fatigue: a complex subject-some simple approximations,» *Exp. Mech*, vol. 5, pp. 193-226, 1965.
- [14] Erena Guardia, D., «Máster diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica,» Universidad de Sevilla.
- [15] Paris, P. y Erdogan, F., «A critical analysis of crack propagation laws,» *J. Fluids Eng.*, vol. 85, pp. 528-533, 1963.
- [16] Boresi, A.P. y Schmidt, R.J., *Advanced Mechanics of Materials.*, John Wiley & Sons, INC., 2003.
- [17] Gdoutos, E.E., *Fracture Mechanics. An Introduction.*, Springer, 2005.
- [18] Askeland, D. y Phulé, P., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.*, Thomson, 2004.
- [19] Schaffer, J. y Saxena, A., *Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería*, CECSA, 2000.
- [20] Gallego Sevilla, R. y Puertas García, E., «Apuntes de Mecánica de la Fractura,» Universidad de Granada., 2011-12.
- [21] Andrade, A.A., Mosquera, W.A. y Vanegas, L.V., «Modelos de crecimiento de grietas por fatiga, Models of fatigue crack growth,» *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 9, 2015.

- [22] William, D. y Callister Jr., *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Reverté, S.A..
- [23] Bower, A.F., *Applied Mechanics of Solids*, CRC Press, 2009.
- [24] ASTM E647-00, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM International.
- [25] Ashby & Jones., *Engineering Materials*, Pergamon, 1980.
- [26] Tada, H. , Paris, P.C. y Irwin, G.R., *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. 2nd, St. Louis, MO: Paris Production , 1985.
- [27] Rice, J.R., «A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks,» *Journal of Applied Mechanics* , vol. 35, pp. 379-386, 1968.
- [28] Begley, J.A. y Landers J.D.:, «The J-Integral as a Fracture Criterion,» *ASTM STP 514, American Society for Testing Materials*, pp. 1-20, 1972.
- [29] Guiu Giralt, F., *Fundamentos físicos de la mecánica de la fractura*, CSIC-CSIC Press, 1997.
- [30] Krevelen, V. y Nijenhuiste, K., «Properties of Polymers,» *Elsevier*, 2009.
- [31] Slutsker, A.I., Gilyarov, V.L. y Polikarpov, Y.I., «Effects of mechanical loading on the kinetics of electrical breakdown in polymers,» *Technical Physics*, vol. 53, pp. 1447-1450, 2008.
- [32] Rambert, G. y Grandidier, J.C., «An Approach to the coupled behavior of polymers subjected to a thermo-mechanical loading in a gaseous environment,» *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 24, pp. 151-168, 2006.

- [33] «El material de impresión ABS y sus características-impresoras3d.com,» 1970. [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/el-material-de-impresion-abs-y-sus-caracteristicas/> .
- [34] «ABS. Textos científicos. Polímeros,» 12 08 2005. [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs>.
- [35] Schwarcz, Joe. , «The Right Chemistry: 108 Enlightening, Nutritious, Health-Conscious and Occasionally Bizarre Inquiries into the Science of Daily Life,» p. 226, 2012.
- [36] «Dorland's Illustrated Medical Dictionary,» *Elsevier*.
- [37] Merriam-Webster, «Merriam-Webster's Collegiate Dictionary».
- [38] «Materials. Universitat de Barcelona,» 1999. [En línea]. Available: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polimetil-metacrilato>.
- [39] García Librero, J., «POLIMETILMETACRILATO. Características y propiedades.,» 05 2012. [En línea]. Available: <https://arquimaterials.wordpress.com/2012/05/07/polimetilmetacrilato-caracteristicas-y-propiedades/>.
- [40] Romero, I., «Mecanica de Solidos. Capítulo 10, Fatiga en Metales,» [En línea]. Available: <http://bigmac.mecaest.etsii.upm.es/~ignacio/resources/MSD/Apuntes/MSDcap10.pdf>.
- [41] Domínguez Almaraz, G.M. y Cadenas Calderón, E., «Solución analítica para el perfil de una probeta de ensayos en fatiga a gran número de ciclos.,» *1º foro académico de la DES de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de hidalgo.* , 2005.

- [42] ASM HANDBOOK, Fatigue and Fracture. (Ref 5) L.F. Coffin, Fatigue in Machines and Structures, Fatigue and Microstructure, American Society for Materials, vol. 19, ASM International, 1979.
- [43] POLOLU. [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/2307>,.
- [44] ARDUINO. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [45] Ramsteiner, F. y Armbrust, T., «Fatigue crack growth in polymers.,» *Polymer Test.*, vol. 20, pp. 321-327, 2001.
- [46] Schoeff, P.F., Bradler, P.R. y Lang, Reinhold W., «Yielding and crack growth testing of polymers under severe liquid media conditions.,» *Polymer Tes.*, vol. 40, pp. 225-233, 2014.
- [47] Andena, L. , Castellani, A., Castiglioni, A., Rink, M. y Sacchettia, F., «determination of environmental stress cracking resistance of polymers: Effects of loading history and testing configuration.,» *Eng. Fracture Mech.*, vol. 101, pp. 33-46, 2013.
- [48] Hart, K.R. y Wetzel, E.D., «Fracture behavior of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS) materials.,» *Eng, Fract. Mech.*, vol. 177, pp. 1-13, 2017.
- [49] Belter, J.T. y Dollar, A.M., «Strengthening of 3D printed fused deposition manufactured.,» *J. PLoS ONE*, vol. 10, pp. 1-19, 2015.
- [50] Smith, W.C. y Dean, R.W., «Structural characteristics of fused deposition modeling.,» *Polymer Test*, vol. 32, pp. 1306-1312, 2013.
- [51] Weerasooriya, T., Moy, P., Casem, D., Cheng, M. y Chen, W., «Fracture toughness for PMMA as a function of loading rate.,» *roceedings of the 2006 SEM Annual Conference on Experimental Mechanics*, 2006.

- [52] Tiganis, B.E., Burn, L.S., Davis, P. y Hill, A.J., «Thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blends.,» *Polymer Degradation and Stability*, vol. 76, pp. 425-434, 2002.
- [53] Domínguez Almaraz, G.M., Correa Gómez, E., Faisal M, Z.A. y Mena Mena, E.R., «ULTRASONIC FATIGUE TESTING ON POLYMERIC MATERIAL ABS (ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE).,» *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE)*., vol. 3, pp. 404-409, 2013.
- [54] Lu, M.L., Chiou, K.Ch. y Chang, F.Ch., «Elastic-plastic fracture toughness of PC/ABS blend based on CTOD and J-integral methods.,» *Polymers*, vol. 37, pp. 4289-4297, 1996.
- [55] Bao, R. , Liu, S., <lu, Ch. y Fei, B., «Experimental investigation of creep crack growth behavior in nickel base superally by constant displacement loading method at elevated temperature.,» *Mat, Sci and Eng. A.*, vol. 665, pp. 161-170, 2016.
- [56] Suzuki, S., Kumagai, K., Namatame, S., Kikuchi, M., Itow, M. y Futami, T., «Study on the SCC growth of alloy 182 under constant displacement condition in high temperature oxygenated water.,» 2004.
- [57] Arivazhagan, A. y Massod, S.H., «Dynamic mechanical properties of ABS material precessed by fused deposition modeling.,» *Int. J. of Eng. and Applic.*, vol. 2, pp. 2009-2014, 2012.
- [58] Jung, S.S., Jeon, B.S., Jin, J. y Lee, Y.B., «Measurement of the loss factor and the Young's modulus in acrylonitrile butadiene sttyrene and polymethyl methacrylate bu using an acoustic wave generator.,» *Int. J. of Prec. Eng. and Manuf.* , vol. 15, pp. 2493-2497, 2014.
- [59] Fang, Q.Z., Wang, T.J. y LI, H.M., «Tail phenmenon and fatigue crack propagation of PC/ABS alloy.,» *Poly. Degrad. and Stabil.*, vol. 93, pp. 281-290, 2008.

- [60] Clark, T., Hertzberg, R.W. y Manson, J.A., «Influence of test methodology on fatigue crack propagation in engineering plastics.,» *J. of Test. and Eval.* , vol. 18, pp. 319-327, 1990.
- [61] Hao, W., Ma, L. , Chen, X., Yuan, Y. y Ma, Y., «Comparison of the fatigue crack propagation behavior of two different forms of PMMA using two-stage zone model.,» *J. of Materi. Eng. and Perform.*, vol. 25, pp. 493-501, 2016.
- [62] Evans, S.L. , «Fatigue crack propagation under variable amplitude loading in PMMA and bone cement,» *J. Mater. Sci.: Mater. Med.*, vol. 18, pp. 1711-1717, 2007.
- [63] Lach, R., Gyurova, L.A. y Grellmann, W, «Application of indentation fracture mechanics approach for determination of fracture toughness of brittle polymer systems,» *Poly, Test.*, vol. 26, pp. 51-59, 2007.
- [64] Laugier, M.T., «New formula for indentation toughness in ceramics,» *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 6, 1987.
- [65] Bucknall, C.B. , «Role of surface chain mobility in crazing,» *Polymers*, vol. 53, pp. 4778-4786, 2012.
- [66] Donald, A.M. y Krame, E.J., «Plastic deformation mechanisms in poly(acrylonitrile-butadiene styrene) [ABS],» *J. of Mat. Scie.* , vol. 17, pp. 1765-1772, 1982.
- [67] Agnelli, S., Baldi, F., Castellani, L., Pisoni, K., Vighni, M. y Laiarinandrasana, L., «Study of the plastic deformation behavior of ductile polymers: Use of the material key curves.,» *Mech. of Mec.*, accepted 2017.
- [68] Adams, M.E. , buckley, D.J. y Colborn, R.E., Acrylonitrile-Butadiene-Styrene polymers., Shawbury, Shrewsbury Shropshire, United Kingdom: Smithers Rapra Publishing, 1993.

- [69] Doyle, M.J., «A mechanism of crack branching in polymethyl methacrylate and the origin of the bands on the surfaces of fracture.,» *J. of Mat. Scien.*, vol. 18, pp. 687-702, 1983.
- [70] Döll, W., Könczöl, L. y Schinker, G., «Size and mechanical properties of craze zones at propagating crack tips in poly(methyl methacrylate) during fatigue loading.,» *Polymer*, vol. 24, pp. 1213-1219, 1983.
- [71] Lang, R.W., Manson, J.A., Hertzberg, R.W. y Schirrer, R., «Craze development in poly(methyl methacrylate) during stable fatigue crack propagation.,» *Poly. Eng. and Scie.*, vol. 24, pp. 833-842, 1984.
- [72] Manson, J.A., Hertzberg, R.W y Bretz, P.E., «Normalization of fatigue crack propagation behavior in polymers.,» *In. Adv. In Fract. Med.*, vol. 18, pp. 443-448, 2007.
- [73] Kausch, H.H. y Williams, J.G., *Encyclopedia of Polymers Science and Technology* 2, 2001.
- [74] Bradchaw, R.D. y Brinson, L.D., «Physical aging in polymer composites: An analysis and method for time-aging superposition.,» *Polymer Engineering & Science*, vol. 37, pp. 31-44, 1997.

ACCIONES DE DIFUSIÓN

Durante la permanencia en el Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica de la UMSNH, se realizaron las siguientes actividades de difusión.

a. REVISTAS ARBITRADAS Y MEMORIAS DE CONGRESOS

[12] DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TORSION FATIGUE MACHINE: TORSION FATIGUE TESTS ON TWO INDUSTRIAL ALUMINUM ALLOYS. Jorge L. AVILA AMBRIZ, Gonzalo M. DOMINGUEZ ALMARAZ, Julio C. VERDUZCO JUAREZ, Erasmo CORREA GOMEZ, Ishvari F. ZUÑIGA TELLO. U.P.B. Scientific Bulletin, Series D, mechanical engineering Vol. 79, Iss. 2, 2017. pp. 169-182. **ISSN 1454-2358**

[11] ULTRASONIC FATIGUE TESTS ON THE NAFION PROTON EXCHANGE MEMBRANE, UNDER THE MODALITY OF THREE POINTS BENDING. G.M. Domínguez Almaraz, R. Hernández Sánchez, A. Gutiérrez Martínez, E. Correa Gómez, J.C. Verduzco Juárez, V. López Garza. ELSEVIER. Procedia Structural Integrity. Volume 3, 2017, pp 571–578. **ISSN: 2452-3216**

<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.021>

[10] ULTRASONIC FATIGUE TESTING ON THE POLYMERIC MATERIAL PMMA, USED IN ODONTOLOGY APPLICATIONS. G.M. Domínguez Almaraz, A. Gutiérrez Martínez, R. Hernández Sánchez, E. Correa Gómez, M. Guzmán Tapia, J.C. Verduzco Juárez. ELSEVIER. Procedia Structural Integrity. Volume 3, 2017, pp 562–570. **ISSN: 2452-3216**

<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.04.039>

[9] RESISTENCIA A LA FATIGA POR FLEXIÓN ROTATIVA Y POR TORSIÓN DEL ALUMINIO 6063-T5 FATIGUE ENDURANCE OF THE 6063-T5 ALUMINUM UNDER TORSION AND ROTATING BENDING. Ávila-Ambriz, J.L., Domínguez-Almaraz, G.M., Verduzco-Juárez, J.C., Correa-Gómez, E. Revista Internacional de

Investigación e Innovación Tecnológica, (RIIIT). Noviembre – Diciembre 2016, Vol. 4, No. 23. **ISSN: 2007-9753.**

http://riiit.com.mx/apps/site/idem.php?module=Catalog&action=ViewItem&id=5039&item_id=84328&id=5039

[8] EFECTOS DE PICADURAS POR PRE-CORROSIÓN EN LA VIDA EN FATIGA A ALTO NÚMERO DE CICLOS DE LA ALEACIÓN DE TITANIO TI-6AL-4V. Ishvari F. Zúñiga Tello, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Manuel Guzmán Tapia, Jorge L. Ávila Ambriz, Erasmó Correa Gómez. Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2016. Noviembre 9-11, 2016. Volumen 8, No.5, pp. 6692-6697. Elibro Online **ISSN:1946-5351.**

Tomo 40.

<https://drive.google.com/drive/folders/0B4GS5FQQLif9MGR6aTVkVUZmdkE>

[7] TORSION FATIGUE ENDURANCE AND LOAD RATIO CONFRONTATION R=0 VS. R=-1 ON THE AISI 6061-T6 ALUMINUM ALLOY. Jorge L. Ávila Ambriz, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmó Correa Gómez, Julio C. Verduzco Juárez. International Journal of Advanced Research. Diciembre 2015, VOL 3, Issue 12, 1428-1433. **ISSN NO. 2320-5407.**

<http://www.journalijar.com/article/7422/torsion-fatigue-endurance-and-load-ratio-confrontation-r=0-vs.-r=-1-on-the-aisi-6061-t6-aluminum-alloy./>

[6] CRACK INITIATION AND PROPAGATION ON THE POLYMERIC MATERIAL ABS (ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE), UNDER ULTRASONIC FATIGUE TESTING. G. M. Domínguez Almaraz, E. Correa Gómez, J.C. Verduzco Juárez, J.L. Avila Ambriz. Frattura ed Integrità Strutturale, 34 (2015) pp. 498-506; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.34.55. **ISSN 1971-8993.**

<http://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/IGF-ESIS.34.55/1632>

[5] FATIGUE ENDURANCE UNDER ROTATING BENDING AND TORSIÓN TESTING, OF AISI 6063-T5 ALUMINUM ALLOY. Jorge L. Ávila Ambriz, Gonzalo M.

Domínguez Almaraz, Erasmó Correa Gómez, Julio C. Verduzco Juárez. International Journal of Advanced Materials Research (IJAMR). Vol. 1, No. 4 (Sep), 2015, pp. 120-125.

ISSN Print: 2381-6805

ISSN Online: 2381-6813

<http://files.aiscience.org/journal/article/html/70120020.html>

[4] FATIGUE TESTING MACHINE FOR DEVELOPING FATIGUE TESTS UNDER DIFFERENT MODES, INCLUDING: ROTATING BENDING, TORSION AND ITS COMBINATIONS. Jorge L. Ávila Ambriz, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmó Correa Gómez, Renato González Bernal. (JOM) Journal of Mechatronics Vol. 2, 1–5, 2014. J. Mechatron. 2014, Vol. 2, No. 4,

ISSN: 2326-2885

doi:10.1166/jom.2014.1076

<http://www.ingentaconnect.com/content/asp/jom/2014/00000002/00000004/art00002>

[3] PARAMETRIC NUMERICAL ANALYSIS OF J INTEGRAL AND THE STRESS INTENSITY FACTOR K, OF PLANE STRAIN PLATE UNDER UNIAXIAL LOADING. Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmó Correa Gómez, Jorge L. Ávila Ambriz, Julio Cesar Verduzco Juárez. IPASJ International Journal of Mechanical Engineering (IJME). Volume 2, Issue 10. Pp. 17-21, Octubre 2014. **ISSN 2321-6441**.

<http://ipasj.org/issue1.php?vol=Volume2Issue10&Jname=4>

<http://ipasj.org/IJME/Volume2Issue10/IJME-2014-10-15-6.pdf>

[2] MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA PARA DESARROLLAR ENSAYOS EN FATIGA EN DIFERENTES MODOS, INCLUYENDO FLEXIÓN ROTATIVA, TORSIÓN Y SUS COMBINACIONES. Jorge L. Ávila Ambriz, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmó Correa Gómez, Renato Gonzales Bernal. Congreso internacional de investigación de Academia Journals. Celaya, Guanajuato. México 2014. Celaya.AcademiaJournals.com **ISSN 1946-5351** online, Tomo 2, VOL 6, No. 5. pp. 317-322.

https://drive.google.com/folderview?id=0B4GS5FQQLif9T2VreEszM19JU2c&usp=drive_web

[1] FATIGUE ENDURANCE OF WELDED (GMAW-MIG PROCESS) ALUMINUM ALLOY 6061-T6 UNDER ROTATING BENDING FATIGUE TESTING. G. M. Domínguez Almaraz, J. C. Verduzco Juárez, R. Gonzalez Bernal, J. L. Avila Ambriz, Erasmó Correa Gomez. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE).

ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 4, Issue 10, Octubre 2014. pp. 583-593.

http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue10/IJETAE_1014_88.pdf

b. PRESENTACIONES EN CONGRESOS.

[17] CRACK INITIATION AND PROPAGATION UNDER CONSTANT DISPLACEMENT LOADING USING CT SPECIMENS, FOR THE POLYMERS ABS AND PMMA. Erasmó Correa Gómez, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Julio C. Verduzco Juárez, Alberto Gutiérrez Martínez, Ramón Hernández Sánchez. INTERNATIONAL CONFERENCE ON POLYMERS AND ADVANCED MATERIALS/ POLYMAT-2017. Huatulco, Oaxaca. October 15-19, 2017

[16] DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A MODEL OF THREE POINTS BENDING IN ULTRASONIC FATIGUE OF NAFION MEMBRANE 115. Ramón Hernández Sánchez, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmó Correa Gómez, Micaela Sánchez Salas, Alberto Gutiérrez Martínez, Carlos A. García Castañeda, Salvador Benítez Villasana. INTERNATIONAL CONFERENCE ON POLYMERS AND ADVANCED MATERIALS/ POLYMAT-2017. Huatulco, Oaxaca. October 15-19, 2017

[15] ULTRASONIC FATIGUE TESTS ON METILMETACRYLATE POLYMER USED IN THE MEDICAL INDUSTRY. Gutiérrez Martínez Alberto, Domínguez Almaraz Gonzalo M, Correa Gómez Erasmó, Manuel Guzmán Tapia, Hernández Sánchez Ramón,

Huerta Balcázar Jorge A. INTERNATIONAL CONFERENCE ON POLYMERS AND ADVANCED MATERIALS/ POLYMAT-2017. Huatulco, Oaxaca. October 15-19, 2017

[14] DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO DE SUJECCIÓN PARA LA MEMBRANA POLIMÉRICA NAFION 105. Hernández Sánchez Ramón, Domínguez Almaraz Gonzalo Mariano, López Garza Víctor, Gutiérrez Martínez Alberto, Benítez Villasana Salvador, Correa Gómez Erasmo y Verduzco Juárez Julio Cesar. XIV encuentro participación de la mujer en la ciencia. León, Guanajuato. 17-19 mayo 2017.

[13] ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA EN FATIGA ULTRASÓNICA EN MATERIALES POLÍMEROS DE APLICACIÓN INDUSTRIAL. 1er Seminario de Ingeniería Metal Mecánica. Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero. Petatlán, Guerrero. 24 y 25 de noviembre, 2016.

[12] MESA REDONDA, TENDENCIAS DE LA INGENIERÍA METAL MECÁNICA. 1er Seminario de Ingeniería Metal Mecánica. Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero. Petatlán, Guerrero. 24 y 25 de noviembre, 2016.

[11] TORSION FATIGUE TEST ON THE AERONAUTICAL ALUMINUM ALLOYS 6061-T6 AND 6063-T5. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Jorge Luis Ávila Ambriz, Julio Cesar Verduzco Juárez, Erasmo Correa Gómez, Renato González Bernal. XXV International Materials Research Congress (IMRC). Cancún, Qroo. México. Agosto 2016.

[10] PRE-CORROSION ATTACK EFFECT UNDER ULTRASONIC FATIGUE RESISTANT IN TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V. Ishvari Fernanda Zuñiga Tello, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Manuel Guzman Tapia, Jorge Luis Ávila Ambriz, Erasmo Correa Gómez. XXV International Materials Research Congress (IMRC). Cancún, Qroo. México. Agosto 2016.

[9] MINI MÁQUINA DE FATIGA POR TORSIÓN: CONCEPCIÓN, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE FUNCIONABILIDAD. Jorge Luis Ávila Ambriz, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Julio Cesar Verduzco Juárez, Erasmo Correa Gómez, Ishvari F. Zúñiga Tello. Congreso Internacional de Investigación de Academia Journals.Com, Celaya 2016.

[8] EFECTOS DE PICADURAS POR PRE-CORROSIÓN EN LA VIDA EN FATIGA A ALTO NÚMERO DE CICLOS DE LA ALEACIÓN DE TITANIO TI-6AL-4V. Ishvari F. Zúñiga Tello, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Manuel Guzmán Tapia, Jorge L. Ávila Ambriz, Erasmus Correa Gómez. Congreso Internacional de Investigación de Academia Journals.Com, Celaya 2016.

[7] ULTRASONIC FATIGUE ANALYSIS INDUCING CRACK INITIATION AND PROPAGATION ON THE POLYMERIC MATERIAL ABS (ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE). E. Correa-Gómez, G M. Domínguez-Almaraz, J.C. Verduzco-Juárez, J .L Avila-Ambriz. INTERNATIONAL CONFERENCE ON POLYMERS AND ADVANCED MATERIALS / POLYMAT-2015. Huatulco, Oaxaca. Octubre 18-22, 2015.

[6] DISEÑO Y CONCEPCIÓN DE UNA MÁQUINA DE ENSAYOS EN FATIGA EN TORSIÓN: VINCULACIÓN CON EL SECTOR INDUSTRIAL METAL- MECÁNICO. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Jorge Luis Ávila Ambriz, Julio Cesar Verduzco Juárez, Erasmus Correa Gómez. XXIV International Materials Research Congress (IMRC). Cancún, Qroo. México. Agosto 2015.

[5] ROTATING BENDING AND TORSION FATIGUE ENDURANCE OF AISI 6063-T5 ALUMINUM ALLOY. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Jorge Luis Ávila Ambriz, Julio Cesar Verduzco Juárez, Erasmus Correa Gómez, Renato Gonzales Bernal. XXIV International Materials Research Congress (IMRC). Cancún, Qroo. México. Agosto 2015.

[4] MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA PARA DESARROLLAR ENSAYOS EN FATIGA EN DIFERENTES MODOS, INCLUYENDO FLEXIÓN ROTATIVA, TORSIÓN Y SUS COMBINACIONES. Jorge L. Ávila Ambriz, Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Erasmus Correa Gómez, Renato Gonzales Bernal. Congreso internacional de investigación de Academia Journals. Celaya, Guanajuato. México 2014.

[3] PARAMETRIC NUMERICAL ANALYSIS OF J INTEGRAL AND THE STRESS INTENSITY FACTOR K, OF PLANE STRAIN PLATE UNDER UNIAXIAL LOADING. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Erasmus Correa Gómez, Julio Cesar Verduzco

Juarez, Jorge Luis Avila Ambriz. XXIII International Materials Research Congress (IMRC). Cancún, Qroo. México. Agosto 2014.

[2] FATIGUE LIFE BEHAVIOR UNDER ROTATING BENDING FATIGUE TESTS ON ALUMINUM 6061 T6 AT THE HEAT AFFECTED ZONE, AFTER GAS METAL ARC WELDING PROCESS. Jorge Luis Ávila Ambriz, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Erasmó Correa Gómez, Julio Cesar Verduzco Juarez. XXIII International Materials Research Congress (IMRC). Cancún, Qroo. México. Agosto 2014.

[1] ULTRASONIC FATIGUE TESTING ON POLYMERIC MATERIAL ABS (ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE). Erasmó Correa Gomez. Congreso internacional de investigación e innovación. UNIVERSIDAD CENTRO DE ESTUDIOS CORTÁZAR. Guanajuato, México. Abril 2014.