



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

**Análisis de fractura en ensayos de
compresión para materiales compuestos
utilizando pruebas ópticas no destructivas**



Como requisito para obtener el grado de:

Maestría en Optomecatrónica

Asesor:

Dr. Manuel Humberto De la Torre Ibarra

Estudiante:

Ing. María Fernanda González Rodríguez

Diciembre 2017

León, Guanajuato, México

RESUMEN

En la actualidad los materiales compuestos juegan un papel muy importante debido a la necesidad que se tiene en obtener propiedades específicas que difícilmente se encuentran en materiales convencionales. Al crear un nuevo material es necesario caracterizarlo de acuerdo a su estructura y a su respuesta mecánica, en este último se pueden determinar parámetros como dureza, resistencia, elasticidad, plasticidad, etc., los cuales sirven para entender y/o predecir el comportamiento del material cuando está sometido a una fuerza.

La mayoría de los ensayos utilizados para la caracterización de materiales son de tipo destructivos y necesitan tener contacto mecánico con el objeto bajo estudio, razón por la cual pueden influir en el comportamiento estructural del material. Dentro del área de la metrología óptica se utilizan métodos no destructivos, remotos y de campo completo para la medición de diversas variables físicas. En el presente trabajo se decidió realizar un análisis de la formación y propagación de fracturas en probetas de poli metil-metacrialato (PMMA) compuesto, utilizando holografía digital interferométrica (DHI por sus siglas en ingles).

De los resultados obtenidos en el trabajo se muestra que DHI es una técnica que permite detectar cambios en la superficie de un objeto, los cuales pueden relacionarse con la concentración de materiales compuestos utilizando un tipo de probeta estandarizada. Adicionalmente, se puede observar la formación de micro-fracturas con el fin de predecir la fractura total del material. Esto es posible con técnicas ópticas y brinda la posibilidad de ampliar el estudio de nuevos materiales avanzados de ingeniería a fin de caracterizar su comportamiento micro mecánico.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia principalmente a mis padres, Jorge y María Eugenia por su apoyo incondicional y sabios consejos, ellos son mi motivación para salir adelante.

Agradezco a mi asesor de tesis, el Dr. Manuel H. De la Torre Ibarra por su paciencia infinita, pero sobre todo por compartir conmigo su conocimiento para la elaboración de esta tesis.

A mis compañeros de generación por todas las desveladas, risas y enojos, en especial a Jorge quien estuvo siempre a mi lado para apoyarme y motivarme a seguir adelante.

A mis sinodales por el tiempo sacrificado en la revisión de este trabajo y por sus consejos.

A todo el grupo de metrología óptica del CIO especialmente a mis compañeros de laboratorio “mis hermanos” Cesar, Jorge Mario, Manuel y Gloria quienes me ayudaron un millón de veces a reparar la montadora y estuvieron siempre dispuestos a escucharme y ayudarme.

Por ultimo al Centro de Investigaciones en Óptica y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la oportunidad y el apoyo económico al realizar mis estudios de maestría.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. Conceptos básicos de mecánica de materiales	3
2.1.1. Polímeros.....	3
2.1.2. Materiales compuestos.....	4
2.1.2.1. Materiales compuestos reforzados con partículas.....	5
2.1.3. Caracterización de nuevos materiales	5
2.1.4. Pruebas mecánicas	6
2.1.5. Pruebas mecánicas con máquina universal.....	7
2.1.5.1. Esfuerzo y deformación	9
2.1.5.2. Fractura.....	10
2.1.5.3. Propagación de una grieta	10
2.1.6. Brazilian Test.....	11
2.2. Conceptos básicos de Óptica	12
2.2.1. Interferometría óptica.....	12
2.2.2. Interferometría Holográfica Digital	13
2.2.2.1. DHI fuera de plano.....	13
2.2.2.2. Portadora espacial.....	15
2.2.2.3. Obtención de fase óptica por medio de la transformada de Fourier	16
2.3. Conclusión.....	19
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	20
3.1. Muestras.....	20
3.1.1. Fabricación de muestras de PMMA	20
3.1.2. Repetibilidad de aplicación de carga en la máquina de compresión	26
3.1.3. Pruebas preliminares de carga en Compuestos.....	29
3.2. Arreglo de DHI.....	31
3.2.1. Interferómetro fuera del plano de alta velocidad.....	31
3.2.2. Sincronización cámara rápida – máquina de compresión.....	32
3.3. Pruebas iniciales de carga con DHI.....	34
3.3.1. Prueba de repetibilidad para 27 muestras	34
4. RESULTADOS.....	38

4.1. Formación de la grieta	38
4.2. Propagación de la grieta	40
4.3. Transitorio	42
4.4. Estabilización después de la fractura	42
4.5. Medición del desplazamiento	43
4.5.1. Desplazamiento en probetas tipo M0.....	44
4.5.2. Desplazamiento en probetas tipo M1.....	46
4.5.3. Desplazamiento en probetas tipo M2.....	49
4.5.3.1. Comparación de los mapas de desplazamiento.....	51
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	55
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXO A	63
Manual de usuario de la máquina de compresión.....	63
ANEXO B.....	69
Problema con la máquina de termoformado	69
ANEXO C	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 El término polímero significa “muchos meros”; donde mero es el bloque básico de la molécula de la cadena.....	3
Figura 2.2 Ejemplos de (a) entrecruzamiento, que produce una estructura de red mediante la formación de enlaces primarios entre moléculas lineales adyacentes, (b) ramificación, que comprende la adición de una molécula polimérica al lado de la cadena molecular principal.	4
Figura 2.3 Dispersión de fase en materiales compuestos, (a) con partículas, (b) con fibras [8,9,11] y (c) laminares [10].	5
Figura 2.4 Representación esquemática de algunos ensayos a carga estática, (a) compresión, (b) tensión o tracción, flexión en (c) 3 y (d) 4 puntos.....	7
Figura 2.5 Aditamentos de una maquina universal utilizados para la pruebas de (a) tensión, (b) compresión, flexión de (c) 3 y (d) 4 puntos.	8
Figura 2.6. Esquema de la estructura mecánica básica de una maquina universal electromecánica.	8
Figura 2.7 Diagrama esfuerzo (σ) - deformación (ϵ) unitarios	9
Figura 2.8 Concentración de esfuerzos en un mismo material ³ con (a) esquinas afiladas y (b) esquinas redondeadas.	10
Figura 2.9 Ensayo brazilian test para un material anisotrópico	11
Figura 2.10 Diagrama esquemático de un interferómetro DHI fuera de plano	14
Figura 2.11 Transformada de Fourier para (a) una función $f(x)$ y (b) aplicando desplazamiento en la frecuencia.....	16
Figura 2.12 Procesamiento de los hologramas de imagen para obtener la fase óptica.	18
Figura 3.1 Preparación de una muestras (a) materiales utilizados por separado, (b) balanza analítica, (c) introducción de material en la montadora y (d) montadora cerrada	21
Figura 3.2 Fotografía del panel frontal de la montadora ALLIED Techpress 2 con indicadores de etapa.	22
Figura 3.3 Modos de fractura resultantes de las probetas en la prensa para (a) material compuesto 8mm, (b) Cobre 1gr., (c) Termoplástico 1gr y (d) acrílico de curado en frío.....	23
Figura 3.4 Comparación de la fuerza registrada por la máquina de compresión para las tres muestras de distinto grosor.	24
Figura 3.5 Fabricación de PMMA reforzado con partículas de cobre, (a) materiales antes de mezclarse, (b) uniformidad en el color al mezclar y (c) probeta obtenida.	25
Figura 3.6 Observación de la deformación en una probeta de PMMA, (a) sin carga, (b) a 300 lbf, (c) sin deformación plástica	25
Figura 3.7 Fotografía tomada con una cámara convencional para la observación de la concentración de esfuerzos utilizando fotoelasticidad en una probeta circular de acrílico curado en frío.	26
Figura 3.8 Comprobación de la repetibilidad en la carga para las 3 muestras de cada tipo de probeta (M0, M1, M2).	27
Figura 3.9 Comparación del promedio de la fuerza registrada durante la compresión de las 3 probetas.	28
Figura 3.10 Pruebas preliminares de aplicación de carga (a) M0 con precarga de 120lbf, (b) M1 con precarga de 140lbf y (c) M2 con precarga de 165 lbf.	30
Figura 3.11 Arreglo DHI fuera de plano.....	31

Figura 3.12 Documento de texto de una prueba de fractura para relacionar la fuerza leída con el holograma de imagen	33
Figura 3.13 Mapas de fase (a) Holograma 766 previo a la fractura, (b) Holograma 771 fractura de la muestra y (c) Holograma 1112 después de la fractura.	33
Figura 3.14 Colocación de la muestra. (a) cinta masking, (b) revelador, (c) marcas en la cruceta y (d) probeta perpendicular.	35
Figura 3.15 Repetibilidad en la carga aplicada para una muestra de 7 probetas de las 9 analizadas de (a) M0, (b) M1 y (c) M2.	36
Figura 3.16 Mapas de fase envueltos para comprobar la sincronización entre la máquina de compresión y la cámara rápida para (a) M0, (b) M1, (c) M2.	37
Figura 4. 1 Serie de mapas de fase envuelta de una muestra M1 para (a) compresión, (b) inicio de grieta, (c) grieta, (d) propagación de grieta y (e) probeta fracturada.....	39
Figura 4. 2 Mapas de fase envuelta en región plástica sin (izquierda) y con grieta (derecha) para muestras de (a) M0, (b) M1 y (c) M2.	40
Figura 4. 3 Instantes en la propagación de la grieta en M0.	41
Figura 4. 4 Instantes en la propagación de la grieta en M1.	41
Figura 4. 5 Instantes en la propagación de la grieta en M2.	41
Figura 4. 6 Mapas de fase durante la vibración de una muestra M0 (las imágenes resaltadas en azul representan la estabilización de la muestra).	42
Figura 4. 7 Mapas de fase envueltos en estabilización para las probetas M0, M1 y M2.	43
Figura 4. 8 Curva característica del ensayo de compresión indicando la región que se grabó para cada muestra.....	44
Figura 4. 9 Mapas de fase envuelta seleccionados de la probeta M0.	44
Figura 4. 10 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica antes de la grieta en M0.	45
Figura 4. 11 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica con presencia de la grieta en M0.	45
Figura 4. 12 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento después de la estabilización ante la fractura en M0.....	46
Figura 4. 13 Mapas de fase envuelta seleccionados de la probeta M1.	47
Figura 4. 14 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica antes de la grieta en M1.	47
Figura 4. 15 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica con presencia de la grieta en M1.	48
Figura 4. 16 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento después de la estabilización ante la fractura en M1.	48
Figura 4. 17 Mapas de fase envuelta seleccionados de la probeta M2.	49
Figura 4. 18 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica antes de la grieta en M2.	50
Figura 4. 19 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica con presencia de la grieta en M2.	50
Figura 4. 20 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento después de la estabilización ante la fractura en M2.	51

Figura 4. 21 Comparación pseudo 3D de los mapas de desplazamiento en la generación de la grieta para (a) M0, (b) M1 y (c) M2 con un Δt de 12.31ms.	52
Figura 4. 22 Comparación pseudo 3D de los mapas de desplazamiento al generarse la fractura en (a) M0, (b) M1 y (c) M2 con un Δt de 0.769 ms.	53
Figura 4. 23 Comparación pseudo 3D de los mapas de desplazamiento al generarse la fractura en (a) M0, (b) M1 y (c) M2 con un Δt de 12.31ms.	54
Figura anexo 1 Puertos COM del administrador de dispositivos	63
Figura anexo 2 Función Open Port.....	64
Figura anexo 3 Código del Test 0	64
Figura anexo 4 Ejemplo del valor leído por la celda de carga	64
Figura anexo 5 Sección de código de la función ReadForce	65
Figura anexo 6 Resultado al correr el programa con el valor corregido	65
Figura anexo 7 Triángulos para un control Fuzzy.....	66
Figura anexo 8 Pendientes con regla 1 (a) y regla 2 (b)	67
Figura anexo 9 Observación de las pendientes que afectan la posición de 110 lb.....	67
Figura anexo 10 Gráfica resultante de la compresión utilizando el Test 1	68
Figura anexo 11 Probeta de compuesto con falla en la parte superior	69
Figura anexo 12 Maquina montadora abierta. La zona marcada es la cámara donde se inserta el material y se fabrican las probetas mediante montaje por compresión en caliente	69
Figura anexo 13 Resistencias utilizadas para calentar el molde de termoformado	70
Figura anexo 14 Imagen secuencia temporal de mapas de fase envuelta durante una prueba de compresión.....	76

Capítulo I

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de contar con materiales que posean propiedades específicas para cierta aplicación es hoy en día un área de investigación que está en constante desarrollo. Un grupo dentro de estos materiales son los llamados materiales compuestos, que han sido utilizados en diversas aplicaciones industriales y militares desde hace décadas [1-2]. El poder combinar dos materiales de distintas características puede generar un nuevo material que se adapte a una aplicación en la que cada uno por separado no podría ser empleado.

Actualmente estos materiales son caracterizados de acuerdo a su composición (estructura molecular) y respuesta mediante pruebas mecánicas (principalmente destructivas), un método típico en la caracterización de materiales en la industria para la medición de deformaciones es el Hole Drilling (HD) [3], en el área de metrología óptica se utilizan métodos no invasivos, remotos y de campo completo para la medición de distintas variables físicas.

Algunos de los métodos ópticos más utilizados en pruebas ópticas no destructivas a campo completo son la interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI por sus siglas en inglés), proyección de franjas, Moire, correlación de imágenes y holografía digital interferométrica (DHI por sus siglas en inglés). Esta última, permite calcular la fase óptica por medio del procesamiento de la transformada de Fourier utilizando sólo dos hologramas de imagen. Lo anterior gracias al uso de una portadora en frecuencia que permite analizar eventos no repetibles y/o controlados en alta velocidad.

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo utilizar un arreglo óptico de DHI acoplado a una cámara de alta velocidad para analizar la formación y propagación de fracturas en probetas de Poli metil-metacrilato (PMMA) compuesto. La matriz PMMA de estas probetas es reforzada con micro partículas de cobre en tres tipos de probetas con diferentes concentraciones de material PMMA vs partículas de cobre.

A fin de tener una deformación controlada y repetible, se utilizó una máquina de ensayo por compresión desarrollada para pruebas ópticas no destructivas. Esto permitió poder comparar los instantes de formación y perfiles de las fracturas para cada tipo de muestra. Las probetas empleadas son circulares de una pulgada de diámetro con un espesor de ~ 1.7 mm fabricadas mediante una máquina termoformadora.

Los resultados obtenidos de estas pruebas muestran cambios que pueden ser fácilmente detectables con este tipo de técnicas ópticas y que brindan la posibilidad de ampliar el estudio de nuevos materiales compuestos avanzados de ingeniería a fin de caracterizar su comportamiento mecánico. Cabe señalar que se realizó un trabajo extenso y metódico durante la fabricación de las probetas para garantizar la repetitividad en las pruebas para cada una de las muestras.

Este documento está organizado como sigue: en el capítulo II se describen brevemente los fundamentos teóricos empleados en el trabajo. El capítulo III presenta a detalle el procedimiento experimental que se siguió para la fabricación y análisis de las muestras. El

capítulo IV muestra los resultados de la fase óptica para cada tipo de probeta y finalmente, en el capítulo V se dan las conclusiones a las que se llegó con este trabajo.

Capítulo II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presentan los conceptos básicos empleados en el desarrollo de esta tesis, donde se aborda el estudio de materiales, con una breve descripción de los materiales poliméricos y compuestos. Por otra parte, se da una introducción a la caracterización de nuevos materiales y a las pruebas mecánicas utilizadas para esto. Se da énfasis en las pruebas mecánicas de compresión realizadas por medio de una máquina universal y el tipo de muestra que se estudia. También se presentan conceptos básicos de óptica, iniciando con una breve descripción de interferometría óptica para concluir con la técnica en que se basa este trabajo, llamada Interferometría Holográfica Digital. En este apartado se explican la configuración, el concepto de portadora espacial y el método para la evaluación de fase por medio de la transformada de Fourier.

2.1. Conceptos básicos de mecánica de materiales

2.1.1. Polímeros

Los polímeros son grandes estructuras moleculares formadas por una reacción química entre una o más moléculas conocidas como monómeros. A esta reacción se le conoce como proceso de polimerización, y existen dos formas distintas que pueden dar lugar a este proceso. La primera es por medio del crecimiento de cadenas (polimerización por adición) que involucra una rápida reacción en cadena de monómeros activados químicamente. La segunda es crecimiento por etapas (polimerización por condensación) que incluye reacciones químicas individuales y es un proceso mucho más lento que el de adición. La reacción de crecimiento de cadenas se muestra en la figura 2.1 en donde el enlace doble del monómero se convierte en un sólo enlace [4].

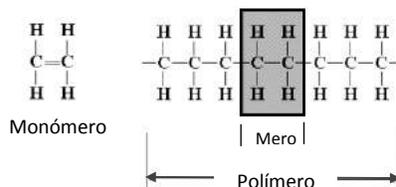


Figura 2.1 El término polímero significa “muchos meros”; donde mero es el bloque básico de la molécula de la cadena.

Al número de meros unidos en conjunto para formar una molécula polimérica se le llama: grado de polimerización. Este último y la estructura molecular ejercen gran influencia en las propiedades mecánicas finales que tendrá el polímero [5-6]. Para muchos polímeros, la rigidez y el punto de fusión se incrementan conforme aumenta la longitud y complejidad molecular. Esta complejidad se incrementa por irregularidades estructurales tales como el entrecruzamiento (figura 2.2a) y las ramificaciones (figura 2.2b).

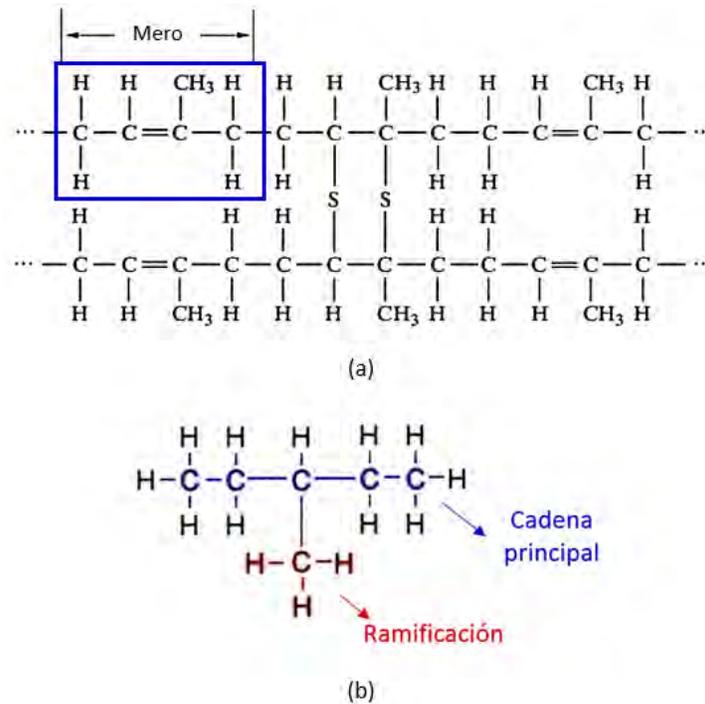


Figura 2.2 Ejemplos de (a) entrecruzamiento, que produce una estructura de red mediante la formación de enlaces primarios entre moléculas lineales adyacentes, (b) ramificación, que comprende la adición de una molécula polimérica al lado de la cadena molecular principal.

Los polímeros que poseen una gran flexibilidad son llamados *elastómeros*. Mientras que el término *termoestable* se le otorga a aquel polímero que adquiere plasticidad al empezar a calentarse y puede ser moldeado, pero una vez que completa la polimerización no puede volver a ser plástico de nuevo. En cambio, un material *termoplástico* adquiere plasticidad al calentarse y recupera su rigidez al enfriarse. Dentro de la clasificación de los materiales termoplásticos se encuentra el PMMA, el cual se produce por la polimerización de adición del monómero metil-metacrilato formando cadenas moleculares largas debido a la reacción química del monómero.

El PMMA es un plástico duro, resistente, transparente y de excelentes propiedades ópticas con un alto índice de refracción. Cuando se funde y se enfría cambia a un estado sólido por lo que se vuelve más difícil el movimiento de las cadenas moleculares que se encuentran enrolladas entre sí, esto hace al material resistente. Esta característica lo hace ampliamente utilizado para desarrollar materiales compuestos.

2.1.2. Materiales compuestos

La necesidad de obtener materiales con propiedades específicas que difícilmente se encuentran por separado en materiales cerámicos, metálicos o poliméricos convencionales ha aumentado gradualmente en la ingeniería de los materiales. La combinación de dos materiales puede poseer las propiedades deseadas y proporcionar una solución. Las uniones de estos materiales generan lo que se le conoce como un material compuesto [7]. Estos materiales compuestos son materiales multi-fase generalmente formados por dos materiales, donde uno actúa como matriz (continua) y el otro de refuerzo (dispersa). Dependiendo del refuerzo y la forma se pueden clasificar en tres grupos:

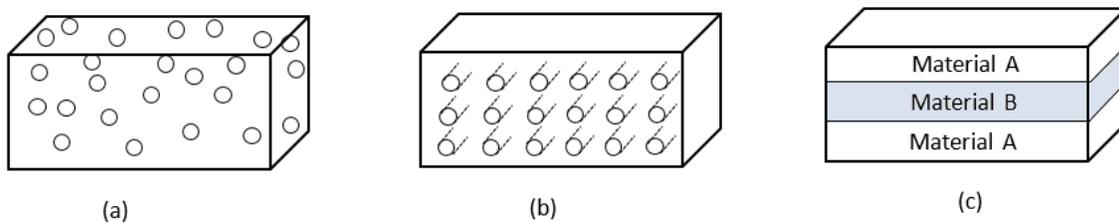


Figura 2.3 Dispersión de fase en materiales compuestos, (a) con partículas, (b) con fibras [8,9,11] y (c) laminares [10].

Este trabajo se centra en el estudio de materiales compuestos reforzados con partículas a diferentes concentraciones. Como matriz se utiliza PMMA termo formado y como refuerzo micro partículas de cobre.

2.1.2.1. Materiales compuestos reforzados con partículas

En este tipo de materiales su resistencia varía dependiendo de la distribución de las partículas, las cuales pueden tener distintas formas; si las partículas están distribuidas uniformemente el compuesto tendrá propiedades isotrópicas. Por lo general la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz así que las partículas tienden a restringir el movimiento de esta. La matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas así que la mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión en la interfaz matriz-partícula [12]. En general los materiales compuestos suelen formar estructuras más resistentes y livianas que los materiales por separado; por este motivo se utilizan principalmente en la ingeniería aeronáutica, fabricación de prótesis, ingeniería naval, ingeniería civil, entre otras.

2.1.3. Caracterización de nuevos materiales

Para el desarrollo de nuevos materiales es necesario conocer: su estructura, composición, morfología, propiedades mecánicas, etc. Esto se realiza mediante una caracterización de materiales la cual se establece a partir del estudio de propiedades mecánicas y químicas del material. Existen para ello distintas técnicas de caracterización, de acuerdo al interés que se

tenga sobre dicho material. Las técnicas que nos proporcionan información acerca de su estructura química o propiedades físico-químicas son aplicables a todos los materiales y entre ellas se encuentran [13]:

- ❖ Espectroscopia Infra-roja con Transformada de Fourier (TF-IR) [14]
- ❖ Resonancia Magnética Nuclear (RMN) [15]
- ❖ Difracción de Rayos X (DRX) [16]
- ❖ Microscopia de Efecto Túnel (MET) [17]
- ❖ Microscopia de Fuerza Atómica (MFA) [17]

Cuando un material se encuentra en uso, está sometido a fuerzas o cargas que lo deforman, por ello es necesario estudiar su comportamiento mecánico, de manera que cualquier deformación resultante no sea excesiva y produzca una fractura [18]. La determinación de estas características se realiza por medio de ensayos estandarizados, que deben suministrar los parámetros de respuesta de los materiales. Los ensayos son tan diversos como lo son las características o cualidades que se exigen del material [18]. Los ensayos que se requieren para calificar las características de resistencia de los materiales se dividen principalmente en dos grupos: estáticos y dinámicos.

- a) **Estáticos:** Simulan el comportamiento del material con pequeñas velocidades de aplicación de las cargas, entre ellos, tracción, fluencia, fractura y dureza.
- b) **Dinámicos:** Simulan el comportamiento frente a cargas variables con el tiempo, entre ellos fatiga y resistencia.

2.1.4. Pruebas mecánicas

Como ya se mencionó anteriormente, el área de aplicación de los materiales depende, en gran parte, de sus propiedades mecánicas tales como resistencia, dureza, ductilidad, etc. Es posible obtener valores numéricos que describan estas propiedades con las siguientes pruebas:

- Prueba de tensión o compresión: Da la capacidad de un material para soportar una carga estática. En la figura 2.4 se puede observar un esquema de la aplicación de la carga (p) en algunos ensayos a carga estática.
- Prueba de dureza: Resistencia a deformarse permanentemente.
- Cargas de choque: Determina la tenacidad del material.
- Prueba de fatiga: Mide el periodo de vida útil de un material sometido a carga y temperatura.
- Prueba de fluencia y ruptura: Evalúa el comportamiento de un material sometido a una carga elevada.



Figura 2.4 Representación esquemática de algunos ensayos a carga estática, (a) compresión, (b) tensión o tracción, flexión en (c) 3 y (d) 4 puntos.

2.1.5. Pruebas mecánicas con máquina universal

Una máquina universal es semejante a una prensa, pero a diferencia de esta, posee la facultad para realizar diversos tipos de ensayos mecánicos, tales como ensayo de compresión, tensión, torsión, etc. (es por ello que se denomina universal), mientras que una prensa sirve principalmente para el ensamble de piezas. La máquina universal es utilizada en la caracterización de nuevos materiales y es considerada como el estándar industrial. La máquina universal está compuesta por una cruceta que se desplaza verticalmente hacia arriba o hacia abajo, aplicando una fuerza controlada de tracción o compresión sobre la probeta a evaluar y la cual es leída mediante una celda de carga.

Dependiendo del rango de la fuerza aplicada a la probeta, las máquinas universales se clasifican en hidráulicas y electromecánicas. Las máquinas electromecánicas pueden aplicar hasta una fuerza de 0.135×10^6 lbf, mientras que las máquinas hidráulicas permiten aplicar fuerzas de hasta 1×10^6 lbf [19]. Para realizar una prueba mecánica es necesario colocar aditamentos en la máquina como mordazas para la prueba de tensión (figura 2.5a), soportes de apoyo en el caso de la prueba de compresión (figura 2.5b). En la figura 2.5c y 2.5d se muestran los aditamentos para las pruebas de flexión de 3 y 4 puntos respectivamente.

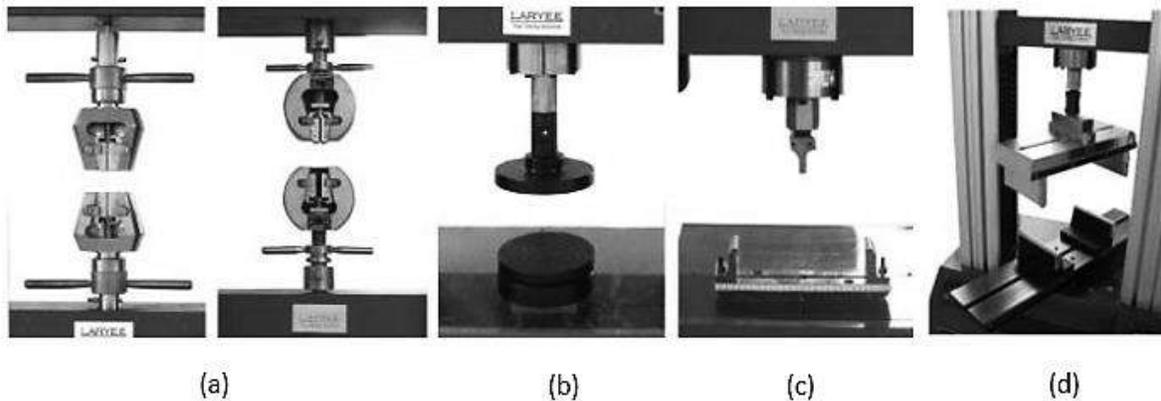


Figura 2.5 Aditamentos de una maquina universal utilizados para la pruebas de (a) tensión, (b) compresión, flexión de (c) 3 y (d) 4 puntos.

En la figura 2.6 se muestra la estructura mecánica básica para una máquina universal electromecánica. El desplazamiento de la cruceta es mediante dos husillos que rotan por la acción de un motor.

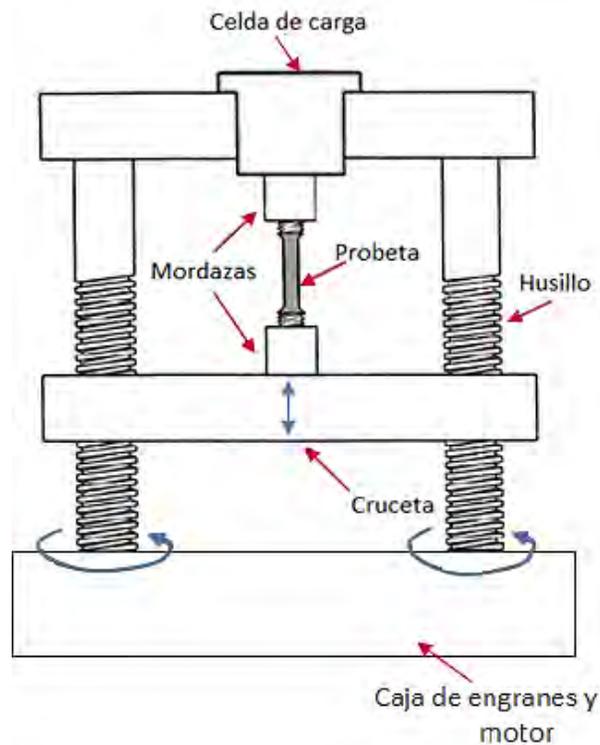


Figura 2.6. Esquema de la estructura mecánica básica de una maquina universal electromecánica.

2.1.5.1. Esfuerzo y deformación

El comportamiento mecánico de un material está principalmente gobernado por la relación que guarda entre el esfuerzo y la deformación. Esto para un estado general de carga y por un criterio de rotura que controle el fallo del mismo. Si una fuerza es estática o cambia de forma relativamente lenta con el tiempo y es aplicada uniformemente sobre una sección del material, el comportamiento mecánico del material puede ser estimado mediante un simple ensayo *esfuerzo-deformación*. Utilizando una máquina universal se puede obtener el diagrama de esfuerzo-deformación unitario.

Dependiendo de las características de la maquina universal, este diagrama se puede obtener en uno o dos pasos. Cuando la máquina solo registra la fuerza aplicada, se calcula el esfuerzo (σ), que es la fuerza (F) actuando por unidad de área (A), es decir:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

y utilizando el módulo de elasticidad del material y la ley de Hooke [20] se calcula la deformación. En la figura 2.7 se observa la curva esfuerzo-deformación, donde el eje de las abscisas corresponde a la deformación unitaria y el eje de las ordenadas a el esfuerzo unitario.

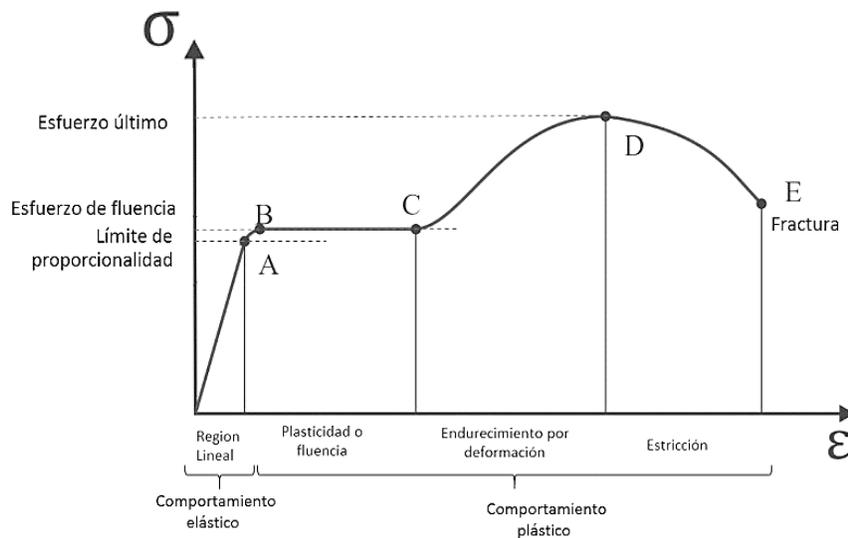


Figura 2.7 Diagrama esfuerzo (σ) - deformación (ϵ) unitarios

La alteración de la forma o dimensiones de un cuerpo como resultado de las tensiones aplicadas se le denomina deformación. Los esfuerzos de tracción causan en la pieza una elongación perpendicular a su propia dirección, mientras que los de compresión dan lugar a una contracción.

2.1.5.2. Fractura

La fractura por definición es la separación de un cuerpo en dos o más partes. Su naturaleza varía de acuerdo a las propiedades mecánicas del material y está influida por el tipo de esfuerzo aplicado, la geometría de la muestra y la velocidad de deformación. En los materiales de ingeniería, existen dos tipos generales de fractura: dúctil y frágil. La clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica. La fractura frágil ocurre por una propagación rápida de la fisura (grieta) después de poca o ninguna deformación plástica. Los materiales amorfos tales como el vidrio y los polímeros (PMMA) son totalmente frágiles.

La fractura dúctil se produce después de una deformación plástica extensa como sucede con los metales (i.e. cobre) y se caracteriza por la propagación lenta de la fisura [6]. Cualquier proceso de fractura está compuesto de dos etapas: la formación y la propagación de una fisura en respuesta a una tensión aplicada. El modo de fractura depende mucho del mecanismo de propagación de la grieta [7]

2.1.5.3. Propagación de una grieta

Las grietas (*cracks* en inglés) generalmente ocurren como defectos iniciales o esquinas afiladas del material que está sujeto a carga. En las aleaciones, el área más efectiva para la iniciación de una fractura se encuentra en la región cercana a una partícula. Cuando un sólido ya cuenta con una grieta y está siendo sometido a una compresión, las tensiones se “concentran” alrededor de la punta de grieta. A esto se conoce como concentración de esfuerzos y cuando las cargas están por encima de cierto umbral, las grietas crecen sin control y eventualmente alcanzarán un tamaño crítico que fracturará el material repentinamente [21]. La figura 2.8 muestra la diferencia en las concentraciones de esfuerzos para distintos terminados de un material.

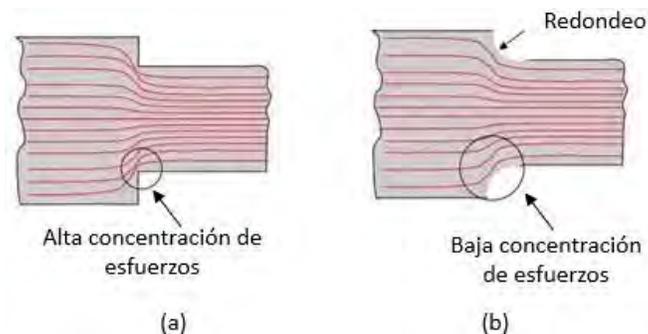


Figura 2.8 Concentración de esfuerzos en un mismo material ³ con (a) esquinas afiladas y (b) esquinas redondeadas.

Es por ello que es de gran importancia detectar las grietas producidas por la fatiga del material y la forma en que se propagan para tomar medidas que eviten que la estructura se deteriore o fracture en el futuro. La teoría de la fractura de Griffith [22] propone la primera explicación para la diferencia entre la resistencia teórica y la real en materiales frágiles. El supuesto que existen numerosas fisuras microscópicas de forma elíptica y que en el extremo de ellas se genera una concentración elevada de esfuerzos. La detección y monitoreo de grietas ha recibido cada vez más atención en los últimos años para un monitoreo de salud estructural (SHM por sus siglas en inglés) [23], que pueden ser categorizados como métodos basados en vibraciones y en propagación de ondas.

2.1.6. Brazilian Test

El ensayo de tracción indirecta conocido como *brazilian test* (figura 2.9) es un método simple de prueba indirecta para obtener la resistencia a la tracción de material quebradizo como concreto, roca y materiales similares. En este ensayo, un cilindro se comprime diametralmente aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas opuestas hasta alcanzar la rotura.

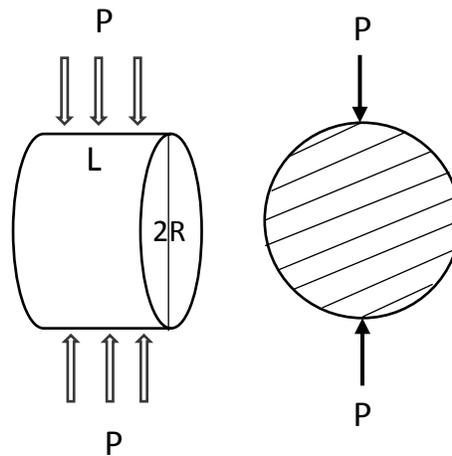


Figura 2.9 Ensayo brazilian test para un material anisotrópico

La compresión induce tensiones de tracción normales al diámetro vertical que son esencialmente constantes sobre una región alrededor del centro. La resistencia a la tracción indirecta se calcula típicamente basándose en que el fallo se produce en el punto de tensión máxima de tracción, es decir, en el centro del disco. La fórmula sugerida para el cálculo de la resistencia a la rotura (MPa) [24] es:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} = 0.636 \frac{P}{DL}, \quad (2)$$

donde (P) es la carga al fallo, (D) es el diámetro de la probeta (mm) y (L) es el espesor de la probeta medida en el centro. La ecuación 2 se basa en la teoría de la elasticidad para medios isotrópicos, la fórmula da la tensión de tracción perpendicular al diámetro cargado en el centro del disco al tiempo de fallo [25]. El PMMA es uno de los mejores plásticos en cuanto a su resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado. Por ello, es altamente utilizado en el desarrollo de materiales compuestos avanzados los cuales son utilizados en diferentes aplicaciones tanto biológicas como de ingeniería y si llegase a fallar (fracturar) puede traer consigo altos costos, en términos económicos, de producción o de vidas humanas.

Por esta razón en este trabajo se decide analizar el comportamiento que tienen las probetas de PMMA compuesto cuando se encuentran sometidas a una compresión constante, específicamente se estudia el momento en el que el material va a fallar esto con el propósito de detectar el inicio de la fractura total que se presenta como una grieta en el orden de micras entre más rápido se pueda detectar se tendrá una predicción de falla por fractura del material y se evitara estas pérdidas, para ello utilizamos una técnica óptica no destructiva, el uso de estas pruebas nos brinda la posibilidad de analizar la deformación del material en forma remota y en campo completo con una alta resolución de manera que será posible observar la generación de una microfractura y su propagación en respuesta a la carga aplicada teniendo como resultado un comportamiento diferente entre las distintas concentraciones, pero repetible entre cada grupo de ellas. Para entender mejor por qué se usa esta técnica se explicarán algunos conceptos básicos de óptica y la técnica empleada de interferometría holográfica digital a continuación.

2.2. Conceptos básicos de Óptica

2.2.1. Interferometría óptica

La interferometría óptica es una técnica de medición no destructiva basada en la interferencia de dos ondas electromagnéticas que han sufrido refracción, difracción o reflexión. Es la base de diversas técnicas como la holografía y la interferometría de patrones de moteado. El principio básico de la interferometría consiste en la superposición de dos ondas electromagnéticas emitidas de la misma fuente, una ilumina el objeto y la otra se le conoce como haz de referencia. Esta superposición es conocida como patrón de interferencia y se puede describir con la siguiente ecuación [26]:

$$I = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\varphi_o + \varphi_r). \quad (3)$$

De acuerdo a la ecuación 3, la intensidad resultante (I) es la suma de las intensidades individuales de los haces ($I_o + I_r$) más el término de interferencia $2\sqrt{I_o I_r} \cos(\varphi_o + \varphi_r)$, donde, (φ) es la fase, y (o) y (r) corresponden a las letras iniciales para los frentes de onda del haz objeto y el haz de referencia. De acuerdo al valor de la fase, se obtendrá un mínimo o un máximo en el patrón de franjas de tipo cosenoidal. Si se toman en cuenta las siguientes expresiones:

$$a = I_o + I_r \quad (4)$$

$$b = 2\sqrt{I_o I_r}, \quad (5)$$

la ecuación (3) se puede reescribir para fines prácticos como:

$$I = a + b \cos(\varphi_o + \varphi_r), \quad (6)$$

donde al término “*a*” se conoce como iluminación de fondo y “*b*” como modulación de franjas (de este último depende el contraste de las franjas). Cuando se ilumina un objeto con un frente de onda de luz, este se deforma debido al esparcimiento producido por el objeto y se caracteriza por tener amplitud y fase. La amplitud se relaciona con la intensidad de cada punto del objeto, mientras que la fase está relacionada con la forma del objeto y permite conocer la posición del objeto en la que se esparció la luz [27]. Si las irregularidades de la superficie son mayores a la longitud de onda (λ) utilizada, será posible medirlas, ya que la diferencia de la trayectoria óptica entre los dos haces producirá cambios en la intensidad del patrón de interferencia.

2.2.2. Interferometría Holográfica Digital

La interferometría holográfica digital (DHI por sus siglas en inglés) es una técnica óptica no destructiva [28] que brinda la posibilidad de analizar las muestras en forma remota, en tiempo real y en campo completo. Posee una alta sensibilidad capaz de registrar deformaciones rápidas con el uso de una cámara rápida. Graba el patrón de interferencia a través de un holograma de imagen que tiene la superposición de los frentes de onda del objeto y de la referencia. La utilización de un holograma de imagen permite guardar no solo la amplitud del frente de onda del objeto (intensidad) si no también su fase [26-28]. DHI es una técnica de doble exposición que necesita adquirir un par de hologramas de imagen mediante un sensor digital. El primer holograma pertenece a un estado inicial en cualquier momento del tiempo, mientras que el segundo holograma corresponde a un estado deformado del objeto.

A diferencia de otras técnicas, DHI utiliza una portadora de frecuencia espacial para obtener la fase y así evitar el uso de técnicas como corrimiento de fase, que pueden implicar el uso de partes móviles dentro del sistema óptico [29]. Una vez registrados los dos hologramas, se obtiene la diferencia de fase relativa por medio de la transformada de Fourier (esto permite observar la fase envuelta en tiempo real de forma sencilla).

2.2.2.1. DHI fuera de plano

Un sistema interferométrico puede usarse para obtener información de los desplazamientos a lo largo de los ejes x , y , z de un sistema de coordenadas previamente establecido sobre el

objeto. La sensibilidad del interferómetro depende de la dirección de iluminación y de la de observación. Un interferómetro fuera de plano tiene su máxima sensibilidad a desplazamientos que se produzcan a lo largo del eje óptico (z), es decir perpendiculares a la superficie del objeto. La configuración específica de este arreglo se muestra en la figura 2.10.

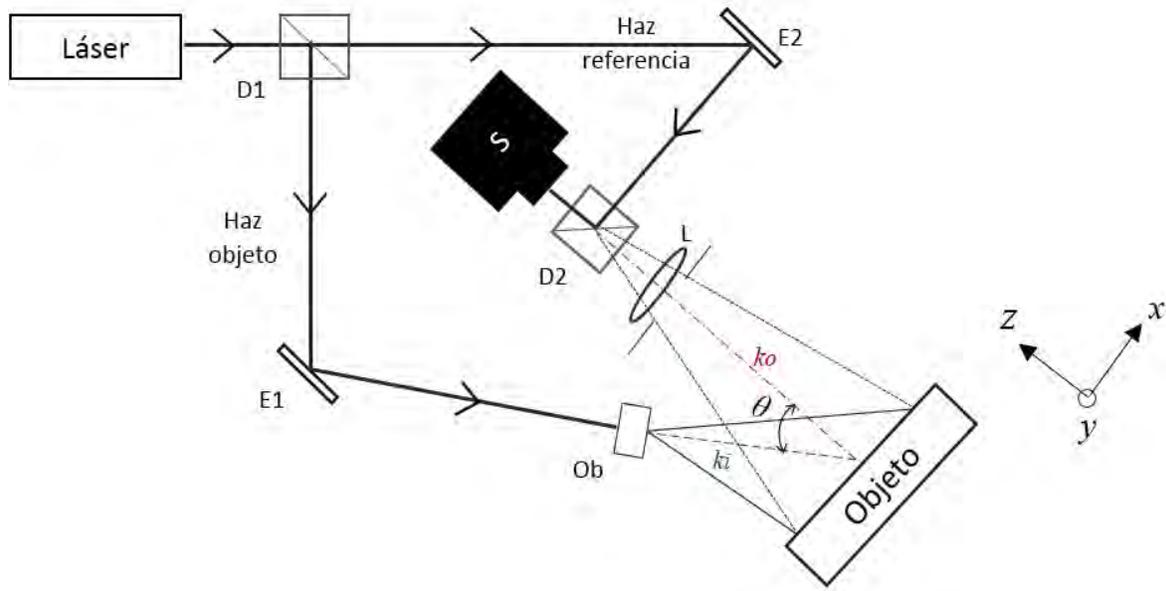


Figura 2.10 Diagrama esquemático de un interferómetro DHI fuera de plano

Se utiliza un haz de luz láser el cual es dividido por medio de un divisor de haz (D1) en dos haces: haz de referencia y haz objeto. El haz objeto se dirige hacia el espejo (E1), y al pasar por un objetivo de microscopio (Ob) se expande e incide directamente en la superficie de la muestra a un ángulo (θ), la luz esparcida por la muestra pasa por una lente con pupila (L) y llega al cubo combinador (D2). Mientras que el haz de referencia se dirige al espejo (E2) que lo refleja a D2 el cual junta ambos haces de luz y los dirige al sensor (S). La sensibilidad del interferómetro está determinada y controlada por el ángulo (θ) que se forma entre el vector de observación (k_o) y el vector de iluminación (k_i). El desplazamiento (w) que sufre el objeto está relacionado con el cambio de fase ($\Delta\phi$), la longitud de onda (λ) y el ángulo de iluminación (θ). Esta relación se observa en la ecuación (7) [26, 29].

$$w = \frac{\lambda}{2\pi(1+\cos\theta)} \Delta\phi \quad (7)$$

2.2.2.2. Portadora espacial

Como ya se mencionó, DHI obtiene la fase utilizando el método de la transformada rápida de Fourier [30], el cual utiliza una portadora de frecuencia para obtener la fase óptica. Esta portadora es introducida en cada holograma. De acuerdo a las propiedades de la transformada de Fourier esto se conoce como traslación en frecuencia. Esto se puede observar gráficamente en la figura 2.11 y se define de la siguiente forma.

$$g(x) = f(x) \cos(2\pi u_0 x), \quad (9)$$

en donde u_0 es la frecuencia portadora (desfase) y x es la variable independiente. Para analizar la relación del desfase (u_0) utilizamos la forma exponencial del coseno:

$$g(x) = f(x) \cos(2\pi u_0 x) = \frac{1}{2} (f(x)e^{i2\pi u_0 x} + f(x)e^{-i2\pi u_0 x}). \quad (10)$$

Al evaluar la transformada de Fourier de la función $g(x)$ se tiene que

$$\begin{aligned} F(g(x)) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} (f(x)e^{i2\pi u_0 x} + f(x)e^{-i2\pi u_0 x}) e^{-i2\pi u x} dx \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2i\pi(u-u_0)x} dx + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2i\pi(u+u_0)x} dx \\ &= \frac{1}{2} F(u - u_0) + \frac{1}{2} F(u + u_0) = G(u). \end{aligned} \quad (11)$$

La ecuación (11) indica que la transformada de Fourier de una función $f(x)$ (figura 2.11a) multiplicada o modulada por una función coseno, es la transformada de Fourier de la función $f(x)$ desplazada simétricamente por la frecuencia de la función coseno (figura 2.11b).

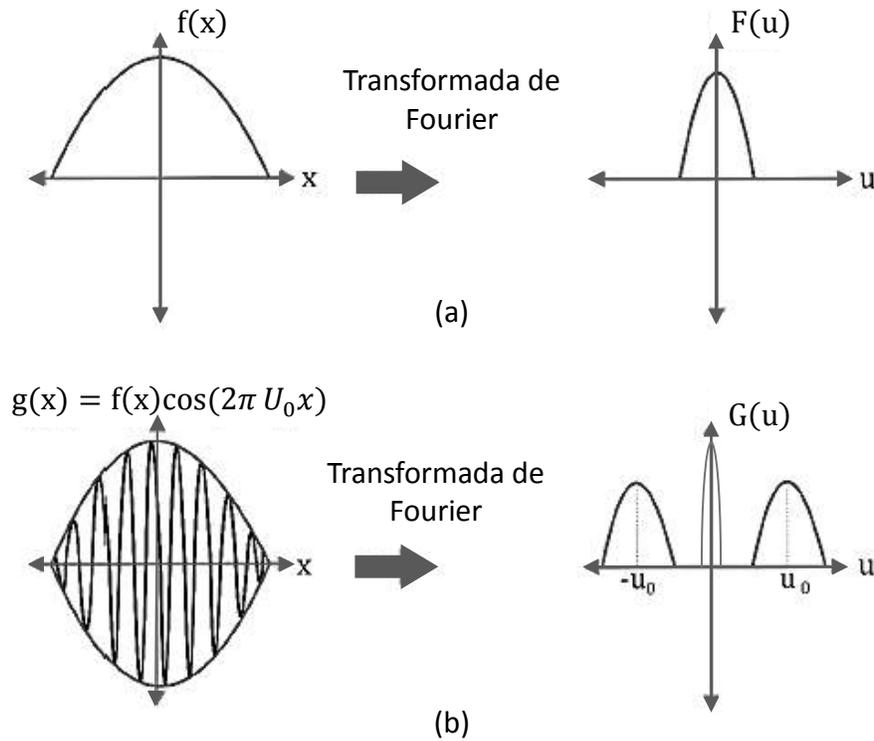


Figura 2.11 Transformada de Fourier para (a) una función $f(x)$ y (b) aplicando desplazamiento en la frecuencia.

2.2.2.3. Obtención de fase óptica por medio de la transformada de Fourier

En este método, se graban hologramas digitales con una portadora espacial en el espacio de frecuencias u_0 . Si esta portadora es lo suficientemente alta para separar el espectro de la intensidad media del patrón, se puede eliminar el término DC o de baja frecuencia. Al variar la portadora en el interferómetro se estarán variando indirectamente las posiciones de los lóbulos del holograma de imagen. Para obtener el patrón de interferencia se realiza una correlación entre las intensidades de los hologramas descritos en la ecuación (6), I_r corresponde a la intensidad del holograma de referencia mientras I_d corresponde al holograma deformado.

$$I_r = a + b \cos(\varphi_o - \varphi_r) \quad (12)$$

$$I_d = a + b \cos(\varphi'_o - \varphi'_r). \quad (13)$$

Ya que el frente de onda del haz de referencia siempre se mantiene igual, se asume que: $\varphi_r = \varphi'_r$. Se aplica la transformada de Fourier a cada holograma y se multiplica por una máscara que actúa como un filtro pasa bandas, dando como resultado Fr y Fd (holograma de referencia y deformado respectivamente). A estos se les aplica la transformada inversa de

Fourier por separado dando como resultado las expresiones iFr y iFd , las cuales se relacionan para poder calcular la fase óptica como mapa de fase envuelta [31-32]:

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \frac{Re(iFr)Im(iFd) - Im(iFr)Re(iFd)}{Re(iFr)Re(iFd) + Im(iFr)Im(iFd)} \quad (14)$$

Los términos Re e Im son la parte real e imaginaria del valor complejo para cada transformada del holograma de imagen. Dado que el mapa de fase envuelto calculado tiene valores entre $-\pi$ y π (blanco y negro, respectivamente), es necesario utilizar un algoritmo de desenvolvimiento para representar un mapa de fase continua. Con él es posible calcular el desplazamiento de la muestra (w). La figura 2.12 muestra los pasos para la obtención de la fase óptica envuelta y el desplazamiento.

Recientemente en DHI se han utilizado cámaras de alta velocidad para el estudio de eventos transitorios muy rápidos, que no son repetibles y difíciles de controlar ya que la fase óptica puede ser recuperada sin el uso de ningún hardware adicional [33-35]. Para el análisis de fractura de probetas de PMMA compuesto, se utilizó DHI de alta velocidad, por que como ya se mencionó este material es totalmente frágil así que hay una propagación rápida de la grieta en el material.

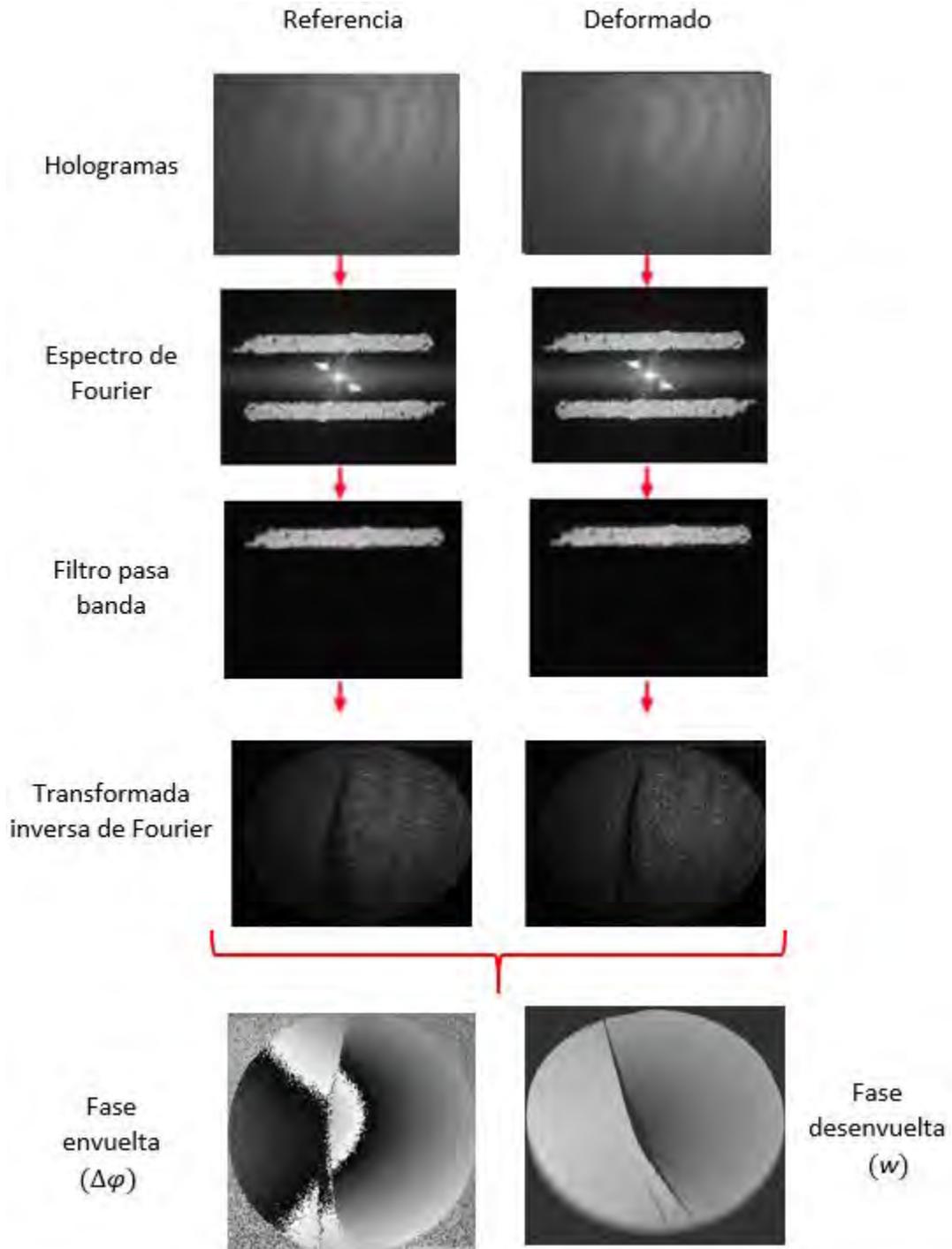


Figura 2.12 Procesamiento de los hologramas de imagen para obtener la fase óptica.

2.3. Conclusión

En este capítulo se han mostrado los fundamentos teóricos implementados en el desarrollo de la tesis, como se describió el PMMA es un material altamente utilizado para desarrollar materiales compuestos avanzados poliméricos gracias a las excelentes propiedades ópticas y mecánicas que posee, por esta razón en este trabajo se estudia el comportamiento bajo compresión antes y después de fracturar de probetas circulares fabricadas con PMMA reforzado con micropartículas metálicas, específicamente se realiza un análisis de la formación y propagación de fracturas utilizando la técnica de interferometría holográfica digital en alta velocidad. Esta técnica a diferencia de los ensayos mecánicos utilizados en la industria permite obtener información del material de manera no invasiva y en campo completo, lo que significa que no está limitada a pequeñas secciones del material y tampoco influye en su respuesta mecánica.

Capítulo III

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el procedimiento experimental del trabajo, se divide en tres secciones, en la primera de ellas se habla de la preparación y fabricación de las muestras PMMA compuesto con las cuales se realizaron varias pruebas de repetibilidad. La segunda sección corresponde a la construcción del arreglo óptico y su sincronización con la máquina de compresión. Por último, se presentan las pruebas iniciales del sistema óptico en conjunto con el sistema mecánico.

3.1. Muestras

En esta sección se describe el procedimiento de la preparación de las probetas de material compuesto, al ser un nuevo material no se cuenta con ecuaciones que describan o relacionen el peso del material con el espesor que se obtendrá o la carga que soportara, todo esto es debe de obtener de manera experimental, por lo tanto, explicara cómo fue que se seleccionaron las dimensiones y la relación de materiales que se manejó.

3.1.1. Fabricación de muestras de PMMA

Para fabricar las muestras que se utilizaron en este trabajo fue necesario conocer primero la relación que había entre el peso del material y el espesor resultante de la probeta, ya que se necesita obtener un grosor específico que permita observar la fractura en el rango de compresión de la máquina de ensayo (entre mayor sea el espesor más fuerza se requiere para generar la fractura). Para conocer esta relación se fabricaron dos probetas de 1 gr de cada material (PMMA y cobre) con la máquina de montaje Techpress2 de Allied utilizando un molde de 1" de diámetro. Los materiales que se utilizaron fueron: polvo de termoplástico (transparent thermoplastic powder) fabricado por montaje de compresión en caliente y polvo conductivo de cobre (cooper conductive powder) por separado (figura 3.1a). El primer paso fue pesar 1gr de ambos materiales con una balanza analítica de la marca Citizen (figura 3.1b). Esta balanza cuenta con una resolución de 0.0001gr. Una vez pesados se colocan uno a la vez dentro de la montadora utilizando un embudo (figura 3.1 c) esto para evitar que el material caiga fuera del molde. Se cierra la maquina montadora (figura 3.1d) y se configuran los tiempos de precalentado, calentado y enfriado.

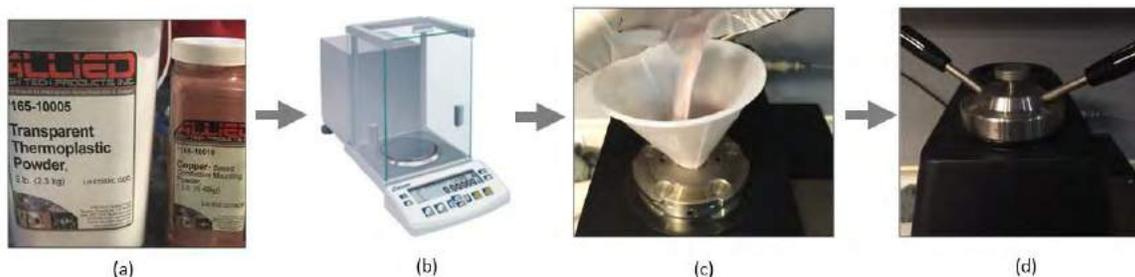


Figura 3.1 Preparación de una muestras (a) materiales utilizados por separado, (b) balanza analítica, (c) introducción de material en la montadora y (d) montadora cerrada

Los parámetros de termo formado establecidos por el proveedor (temperatura y tiempo) considerando un peso de probeta de entre 8 y 9 gr, por lo tanto un 1gr de material necesita menos calor para elevar su temperatura (calor específico) por esta razón se disminuyó 20 °C respecto al valor establecido, cuidando de no alterar el proceso de polimerización en el caso del PMMA, este cambio no tiene consecuencia en el espesor de la probeta ya que una vez que el material se funde y pasa a un estado líquido no es posible comprimirse es decir se mantiene el mismo volumen. El proceso de termo formado consta de 3 etapas principales, la primera de ellas es el precalentado del molde, esta no tiene parámetros estrictos ya que solo es de apoyo para poder llegar a la temperatura marcada por la etapa de calentado, donde el tiempo y la temperatura varían de acuerdo al material que se utilice. La última etapa es la de enfriado por medio de agua, en esta también varía la duración dependiendo del material.

Los parámetros utilizados se muestran en la tabla 3.1, de acuerdo a ellos se programa la máquina de montaje desde su panel de control (figura 3.2) y se inicia el ciclo de termo formado. En el display se puede observar el tiempo restante de la etapa en la que se esté trabajando, esta puede visualizarse en los leds indicadores de estado.

Material	Precalentado		Calentado		Enfriado
	Tiempo	Temperatura	Tiempo	Temperatura	Tiempo
PMMA	6min	75°C	14min	120°C	9min
Cobre	6min	75°C	12min	130°C	4min

Tabla 3.1 Parámetros específicos de cada material



Figura 3.2 Fotografía del panel frontal de la montadora ALLIED Techpress 2 con indicadores de etapa.

La máquina cuenta con una alarma sonora que indica que el ciclo total de termo formado concluyó, al retirar las probetas se miden los espesores utilizando un vernier digital; cabe señalar que el espesor obtenido variaba en toda el área, sin embargo, esta diferencia fue mínima y no afectó en el comportamiento del material por lo tanto se consideró constante para toda la probeta. Utilizando PMMA se obtuvo un grosor de 1.68mm mientras que para el cobre el espesor fue de 0.803mm. Los espesores no son iguales a pesar de introducir la misma cantidad de material ya que el cobre, al ser un metal se funde y se compacta más. Con estos valores fue posible calcular la cantidad necesaria de ambos materiales para obtener un espesor cercano a 8mm con una relación 2:1 (PMMA:Cu). Esta fue la primera aproximación de un espesor controlado y al introducirla en la máquina de compresión no se logró fracturarla, por lo que se utilizó un tornillo de banco (prensa) y se comprobó que la fuerza requerida para fracturarlas era mucho mayor a la que proporcionaba la máquina (por esta razón el espesor debe ser menor).

La figura 3.3a muestra la probeta de 8 mm de grosor después de la compresión en la prensa. De forma similar se decidió comprobar la resistencia y la dirección de la fractura de cada material de las primeras probetas de 1gr en la prensa. El comportamiento que tuvieron las muestras de PMMA y Cu respectivamente es opuesto, ya que la dirección de propagación de la fractura en el cobre fue perpendicular a la de PMMA como se muestra en las figuras 3.3b y 3.3c respectivamente. Esto es muy importante ya que de acuerdo a las condiciones de sujeción por la máquina de compresión si la fractura se genera en dirección perpendicular a la dirección de la carga el material habrá fallado por pandeo como se muestra en la figura 3.3d, esto se observó al utilizar una probeta fabricada de PMMA curado en frío (la activación

química se realiza mediante la adición un líquido conocido como monómero) con las mismas dimensiones en área.

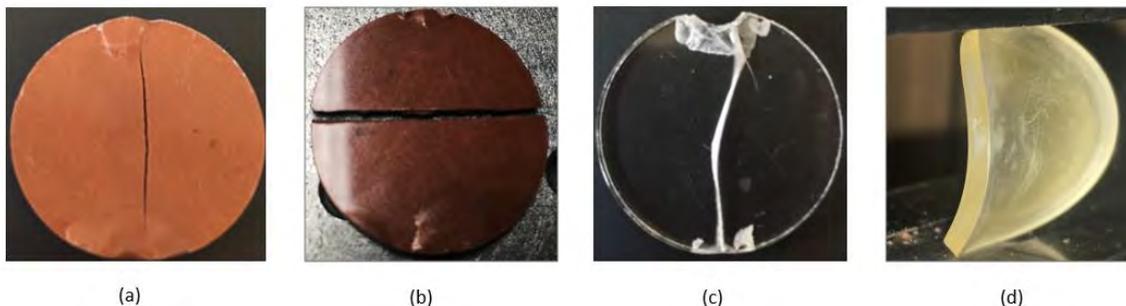


Figura 3.3 Modos de fractura resultantes de las probetas en la prensa para (a) material compuesto 8mm, (b) Cobre 1gr., (c) Termoplástico 1gr y (d) acrílico de curado en frío.

De acuerdo a los comportamientos observados en la figura 3.3, antes de fabricar las probetas del material compuesto se optó por fabricar tres muestras de PMMA a diferentes espesores ya que este es la matriz de nuestro compuesto. Esto con el fin de someterlas a carga en la máquina de compresión hasta obtener su fractura y de acuerdo a esta respuesta seleccionar la cantidad de material a utilizar. El espesor que se requiere debe permitir analizar la fractura respecto al tiempo, esto implica observar la formación de una grieta y su propagación, hasta llegar a la fractura completa del material. Para ello se debe considerar que la fuerza máxima que puede aplicar la máquina de compresión de manera lineal y controlada [36] es de 300lb-f, por lo tanto, la fuerza máxima que soporte el material debe estar entre las 140-200 lb-f para tener un rango de fuerza adecuado.

En la figura 3.4 se pueden ver las curvas de fuerza obtenidas para los tres espesores seleccionados (T1, T2 y T3). Es notorio que T1 y T3 se encuentran muy alejados del valor de fuerza requerido. La tabla 3.2 nos muestra una imagen de la probeta al final de aplicarle la carga, así como los valores de la cantidad de material, el espesor y la fuerza máxima registrada por la celda de carga. Tomando en cuenta las curvas mostradas en la figura 3.4, se seleccionó como matriz del compuesto 1gr de PMMA y se reforzó con 0.2gr de partículas de cobre para obtener una relación 5:1. A esta muestra se le llamó M1 y a partir de ella se disminuyó el refuerzo a la mitad (0.1gr) y se duplicó (0.4gr) para generar las muestras M2 y M0 respectivamente. En todas ellas el objetivo es tener siempre 1.2gr de material total, por lo tanto, la matriz también se modificó de acuerdo al refuerzo empleado (ver tabla 3.3).

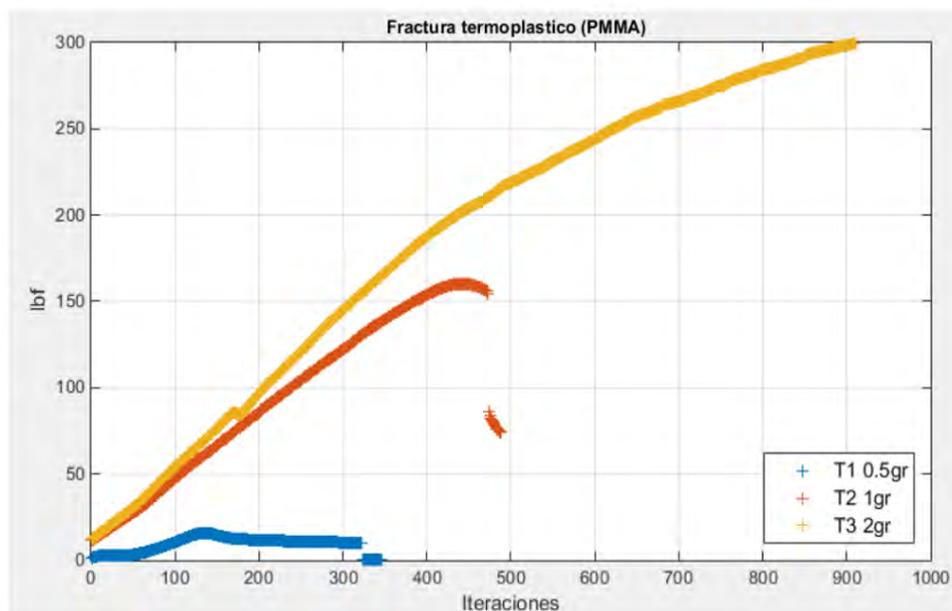


Figura 3.4 Comparación de la fuerza registrada por la máquina de compresión para las tres muestras de distinto grosor.

	Fractura	Cantidad	Fuerza máxima	espesor
T1		2gr	No fracturo	~3.4 mm
T2		1 gr	160 lb	~1.7 mm
T3		0.6 gr	20 lb	~1 mm

Tabla 3.2 Tabla comparativa de los parámetros de las probetas analizadas

Nombre	PMMA (gr)	Cobre (gr)	Total (gr)	Espesor (mm)
M0	0.8gr	0.4gr	1.2gr	1.65
M1	1gr	0.2gr	1.2gr	1.73
M2	1.1gr	0.1gr	1.2gr	1.79

Tabla 3.3 Concentraciones empleadas para los tres tipos de probetas a estudiar.

La única diferencia al fabricar probetas de PMMA reforzado es que los materiales deben mezclarse antes de colocarlos dentro de la máquina de montaje, para esto se utiliza papel encerado que evita que el material se adhiera a él y por lo tanto disminuye las pérdidas de éste. Se colocan ambos materiales sobre el papel (figura 3.5a) y se mezclan a mano utilizando un abatelenguas hasta obtener una mezcla de color uniforme (figura 3.5b) a fin de obtener una probeta homogénea (figura 3.5c) puesto que de acuerdo a la distribución que tenga el refuerzo en la matriz las propiedades del material cambiarían, el tiempo que se permanezca mezclando los materiales no afecta al espesor de las probetas ya que en este caso ambos materiales no generan estática por lo cual no hay pérdidas.

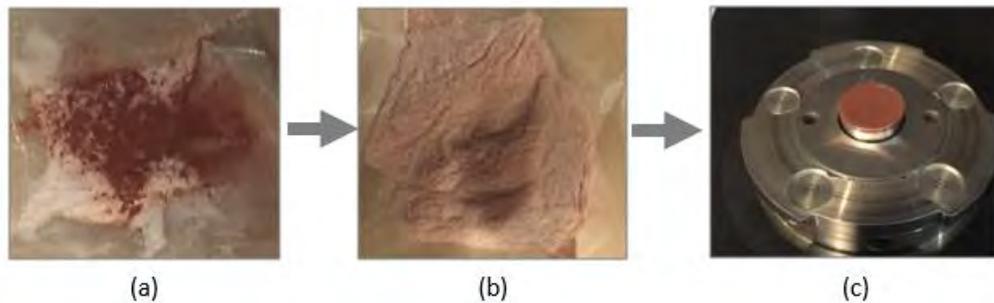


Figura 3.5 Fabricación de PMMA reforzado con partículas de cobre, (a) materiales antes de mezclarse, (b) uniformidad en el color al mezclar y (c) probeta obtenida.

Para conocer las zonas en las que se genera la deformación o bien la concentración de esfuerzos en las probetas se utilizó una probeta de 2 gr de PMMA que no se consiguió llevar a la fractura (muestra T1) y se le colocó una cuadrícula detrás. Al ser un material transparente fue posible ver la rejilla (figura 3.6a) durante y después de la aplicación de la carga (figuras 3.6b y 3.6c respectivamente). De la figura 3.6b se observa distorsión en las zonas donde existe concentración de esfuerzos, ya que al hacerlo modificamos su estructura interna generando un cambio en el camino óptico que provoca ver la imagen de la rejilla de esta manera. En la figura 3.6c se pudo observar como al remover la carga aplicada el material se recupera debido a que la deformación inducida aún se encontraba en la zona elástica, lo que le permitió no generar una deformación permanente.

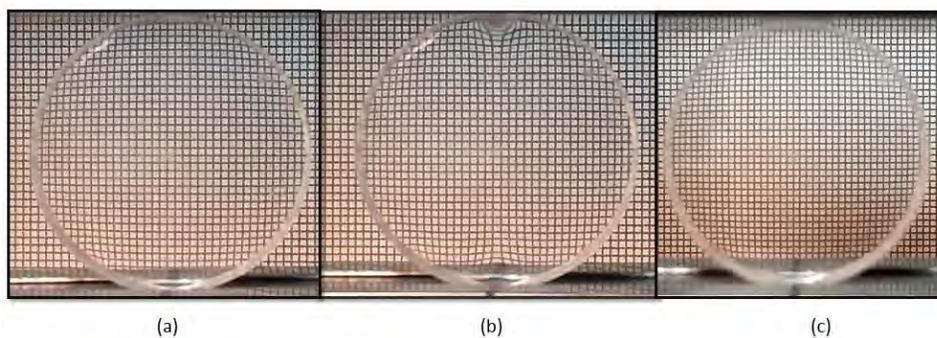


Figura 3.6 Observación de la deformación en una probeta de PMMA, (a) sin carga, (b) a 300 lbf, (c) sin deformación plástica

La distribución de esfuerzos en cualquier material depende siempre de la forma de la probeta y la dirección de la fuerza que se esté aplicando, en este caso las probetas utilizadas poseen una forma circular y como se observa en la figura 3.6 la concentración de esfuerzos se presenta en las zonas que se encuentran en contacto con la aplicación de la carga (zona inferior y superior). En la figura 3.7 se puede observar otra prueba para observar dichas zonas en la cual se utilizó acrílico curado en frío para fabricar la probeta que al ser sometido a una fuerza genera un cambio en el índice de refracción proporcional al esfuerzo y puede ser observado si se utiliza luz polarizada (fotoelasticidad) como un patrón de colores que determinan los esfuerzos principales. Sin importar el material que se esté utilizando la fractura siempre iniciara en esas zonas mientras se tenga esta forma de probeta (como se mencionó en la sección 2.1.6).

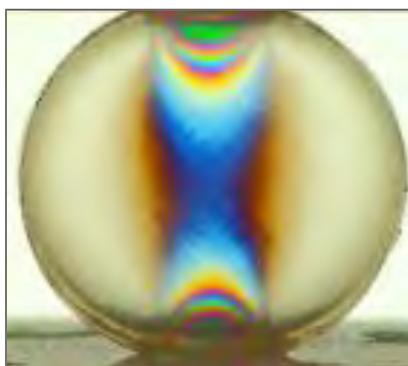
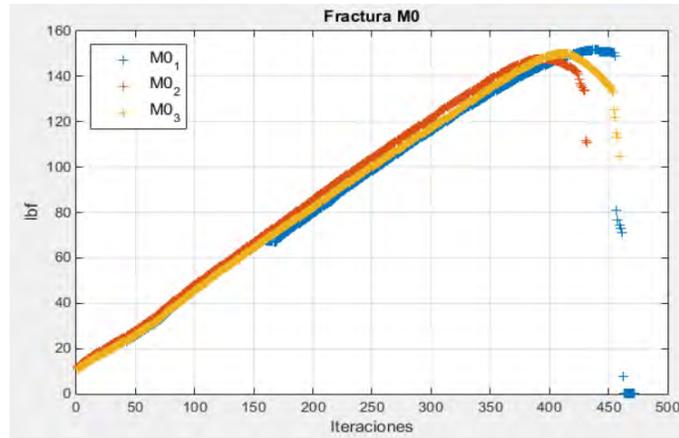


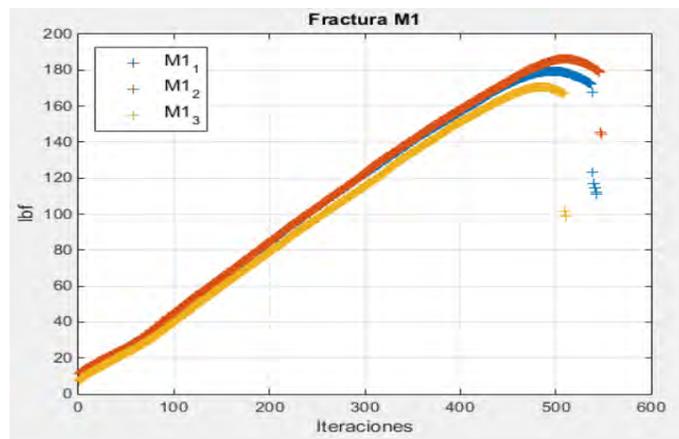
Figura 3.7 Fotografía tomada con una cámara convencional para la observación de la concentración de esfuerzos utilizando fotoelasticidad en una probeta circular de acrílico curado en frío.

3.1.2. Repetibilidad de aplicación de carga en la máquina de compresión

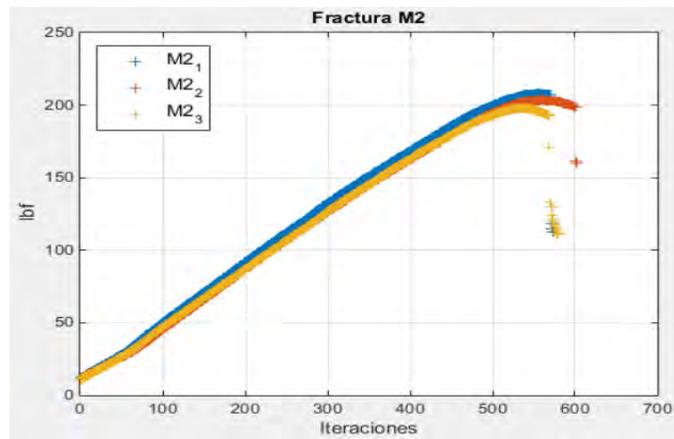
La capacidad de obtener un mismo resultado para diferentes mediciones es la clave en la caracterización y se le conoce como repetibilidad, si no se cuenta con ella no es posible aseverar el comportamiento de un material. En esta sección del trabajo se obtuvo la fuerza máxima de compresión soportada por las tres probetas (M0, M1 y M2) antes de fracturar. A partir de los datos obtenidos se determinó un valor de precarga. En la figura 3.8 se presentan las gráficas de la fuerza registrada en 3 ensayos de 3 probetas por cada tipo de muestra (tres muestras M0, tres M1 y tres M2). Se observó que la fuerza máxima variaba en la mayoría de los casos, sin embargo, se encontraba siempre entre un rango de 16 libras por lo tanto no es significativo mientras se mantenga dentro de ese rango, esto significa entonces que tanto la fabricación de las muestras como la aplicación de la carga con la máquina de compresión se considera repetible.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.8 Comprobación de la repetibilidad en la carga para las 3 muestras de cada tipo de probeta (M0, M1, M2).

La figura 3.9 muestra una comparación del valor promedio de la carga aplicada a las tres muestras de cada probeta. Aquí es posible observar como la proporción de la matriz y el refuerzo modifican las propiedades mecánicas del compuesto, esto se ve reflejado en la fuerza máxima que soportan y en la forma de fracturar.

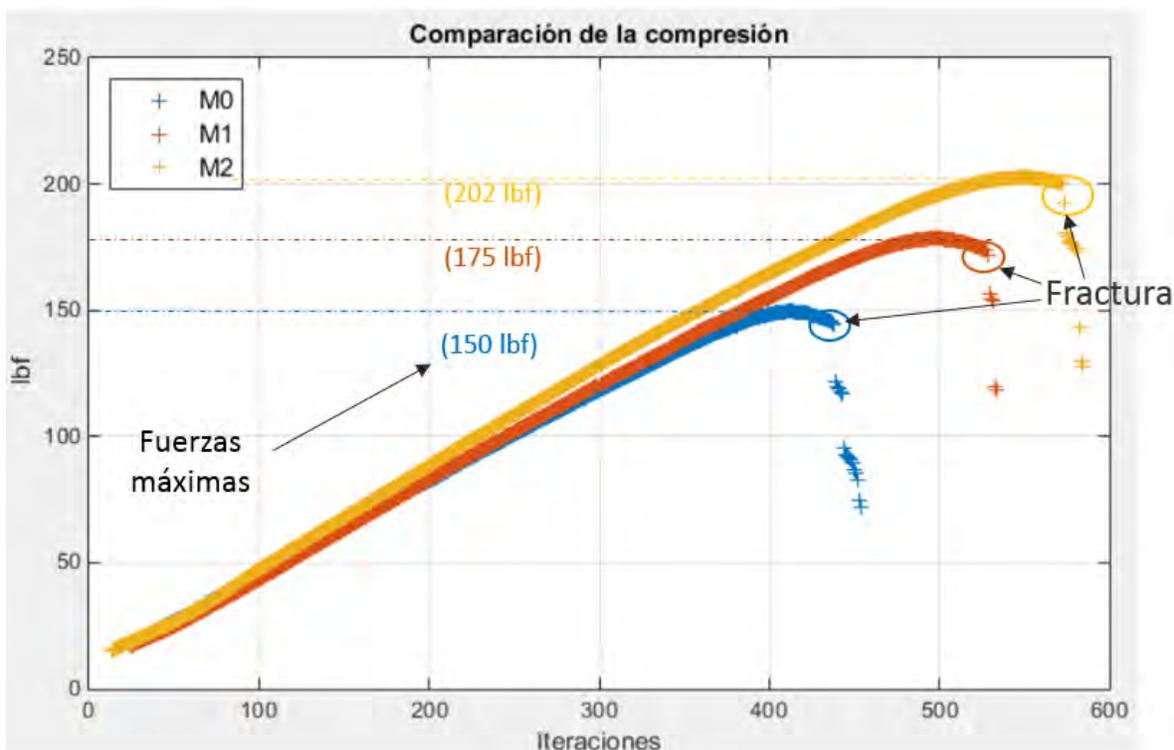


Figura 3.9 Comparación del promedio de la fuerza registrada durante la compresión de las 3 probetas.

De acuerdo a las gráficas de la figura 3.8 se estableció una carga inicial para evitar que la probeta se moviera al momento de comprimirla además de que ayudaba a acercarse a el rango de fuerza en donde fracturaría. Esta precarga se seleccionó 30 libras menor al límite inferior del rango de carga máxima, en la tabla 3.4 se muestran los valores de carga máxima registrados antes de que el material comenzara a ceder, el valor de carga inicial y la relación de peso de los materiales.

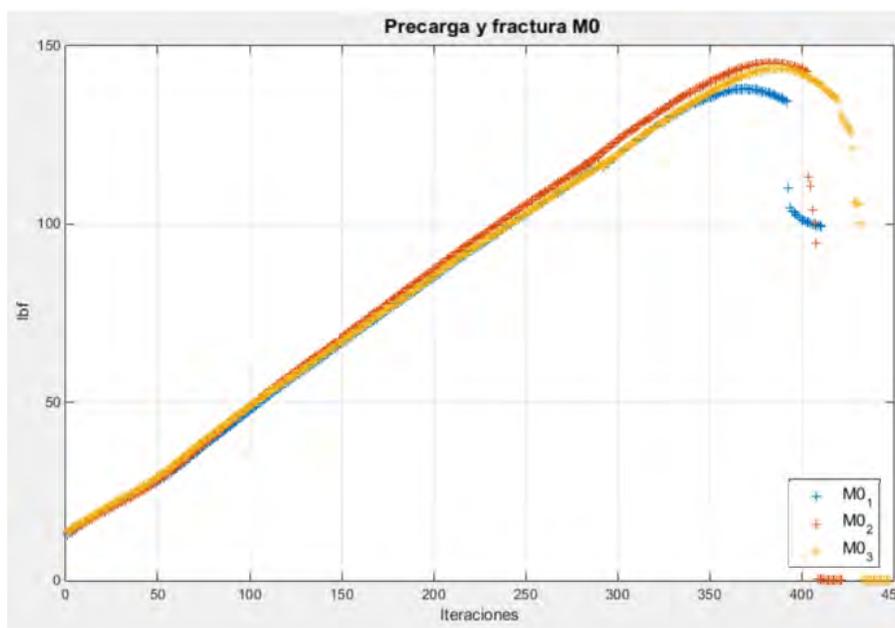
Nombre	Relación (gr)	Carga inicial (precarga)	Carga máxima
M0	0.8Th- 0.4Cu	120 lb	148-160 lb
M1	1.0Th- 0.2Cu	140 lb	169-185 lb
M2	1.1Th- 0.1Cu	165 lb	195-208 lb

Tabla 3.4 Valores establecidos de precarga y valores medidos de carga máxima para las tres muestras

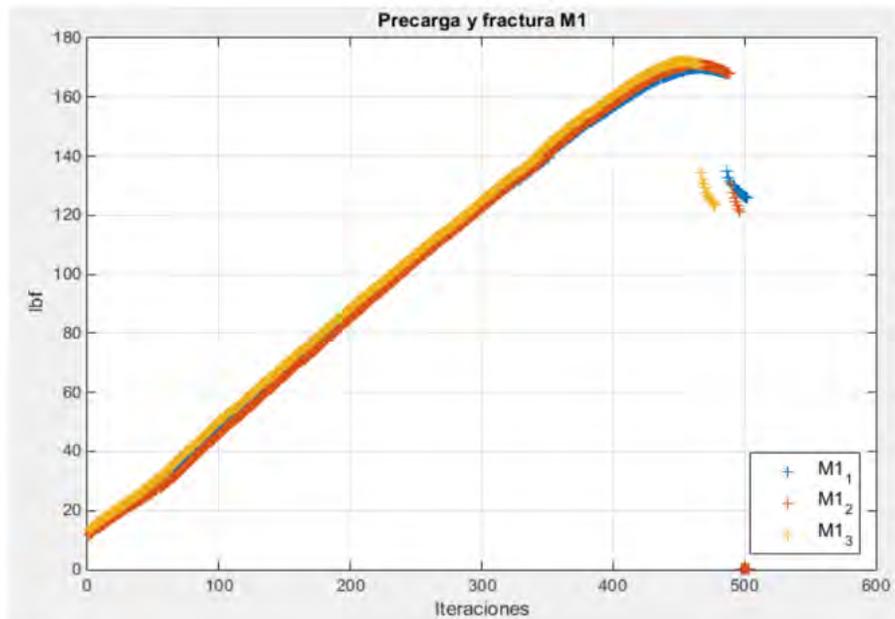
3.1.3. Pruebas preliminares de carga en Compuestos

Antes de grabar con el arreglo de DHI se realizaron pruebas mecánicas para verificar que la precarga seleccionada fuera la adecuada, es decir que no presente un cambio en la fuerza máxima soportada por cada tipo de probeta. Para estas pruebas primero se comprimió la muestra hasta la precarga y después se continuó con la fractura del material, esto se realizó aplicando siempre una pendiente constante en la fuerza hasta llegar a la falla del material.

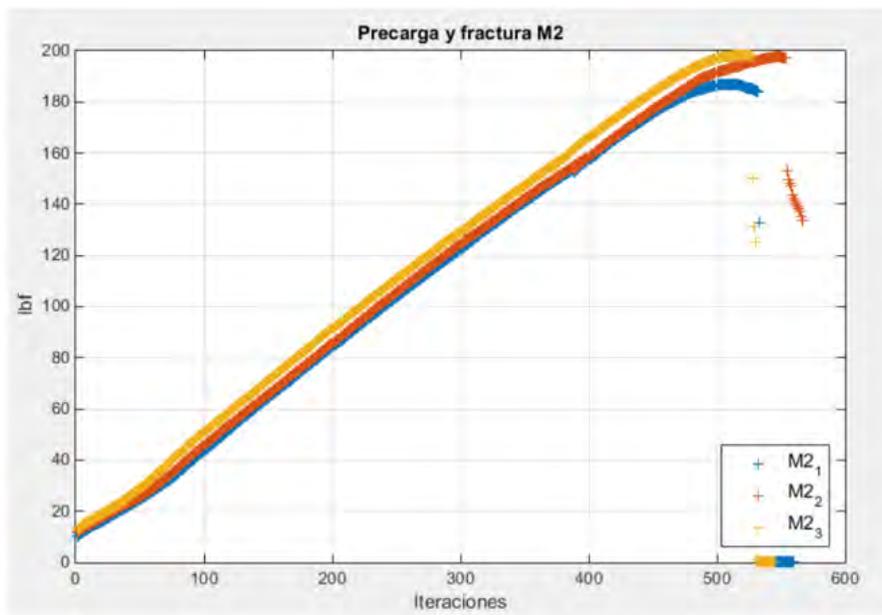
El comportamiento que se obtuvo de las 3 probetas con 3 muestras cada una, se observa en la figura 3.10. Aquí se tiene tanto la precarga como la fractura para cada caso.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10 Pruebas preliminares de aplicación de carga (a) M0 con precarga de 120lbf, (b) M1 con precarga de 140lbf y (c) M2 con precarga de 165 lbf.

3.2. Arreglo de DHI

En esta sección, se presenta el interferómetro DHI utilizado para medir la deformación fuera de plano que sufren las muestras mientras se comprimen hasta fracturarse. Como se explicó en el capítulo II el PMMA es un material frágil lo que significa que la propagación de una grieta sucede muy rápido, por esta razón se utilizó una cámara rápida como sensor y fue necesario realizar varias pruebas para seleccionar los parámetros de grabación de la cámara (cuadros por segundo y tiempo de exposición) además de realizar una sincronización entre la máquina de compresión y la cámara.

3.2.1. Interferómetro fuera del plano de alta velocidad

El arreglo óptico se muestra en la figura 3.11, este es un arreglo fuera de plano sensible a desplazamientos en el eje z . La fuente de iluminación utilizada fue un láser Verdi-V10, Nd:YV04 (Neodymium-Doped Yttrium Orthovanadate) con una longitud de onda en 532nm y una potencia ajustable máxima de 10 Watts. Como sensor se utilizó la cámara rápida marca PCO Dimax HD+ a 12 bits.

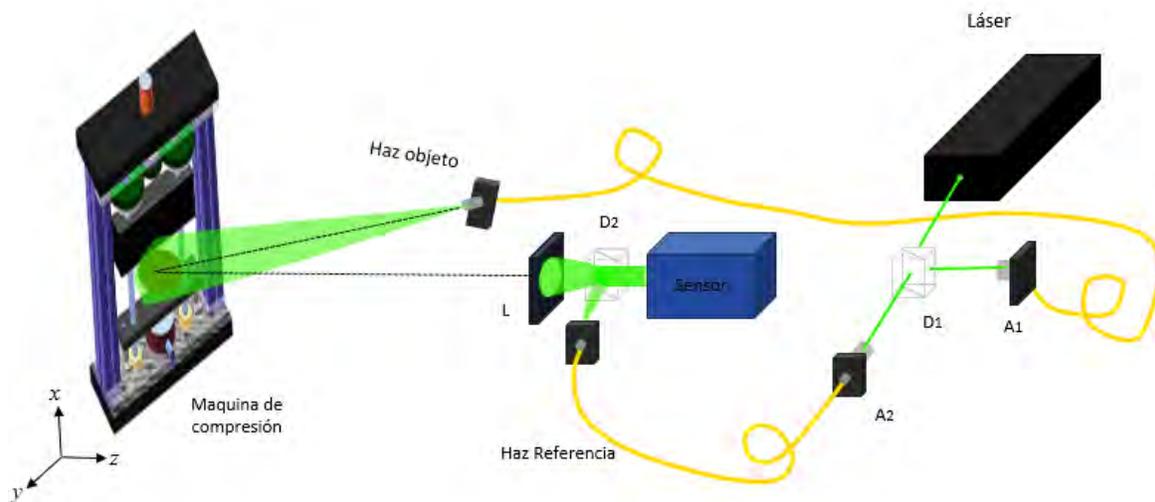


Figura 3.11 Arreglo DHI fuera de plano.

En el arreglo DHI el haz proveniente del láser es dividido en dos por medio de un cubo divisor no polarizado ($D1$) 70:30, cada haz resultante se dirige a una lente esférica ($A1$ y $A2$) que concentra la luz en una fibra óptica mono modo (PI-460A-FC) para realizar un filtraje espacial al solo dejar pasar un modo de propagación de la luz. La salida de la fibra con el 70% de la intensidad del láser actúa como haz objeto y es utilizado para iluminar la superficie

de la muestra. La luz esparcida por la muestra pasa por una lente con pupila (L) de 100mm de distancia focal y finalmente pasa a través de un cubo combinador (D2), mientras que la fibra que posee el 30% de la intensidad del láser actúa como haz de referencia y es llevada directamente a D2 donde se combinan ambos haces de luz y llegan al sensor CMOS de la cámara donde se graba el holograma de imagen. La relación de intensidades entre los haces se seleccionó de tal forma que ambos llegaran aproximadamente con la misma intensidad al sensor.

3.2.2. Sincronización cámara rápida – máquina de compresión

Se utilizó una cámara rápida ya que la matriz de las muestras es un termoplástico totalmente frágil lo que quiere decir que la fractura surge de manera rápida. La cámara utilizada fue una PCO Dimax HD+ que se controló mediante comunicación Ethernet utilizando una PC de escritorio diferente a la que controla a la máquina de compresión. Esta cámara permite modificar parámetros desde su software como cuadros por segundo, tiempo de exposición, modo de grabación (lineal o de anillo) y ajustar el tamaño del sensor. Esto último con el fin de incrementar la velocidad y el espacio de memoria interna. El tamaño original del sensor en HD+ es de 1940×1440 pixeles y permite grabar a una velocidad máxima de 1603fps con esta resolución. Al ser un evento que sucede en un par de segundos y que no se sabe exactamente el momento preciso en el que ocurrirá, se utiliza el modo de grabación en anillo, esto significa que la cámara grabará hasta que se detenga y va sobrescribiendo las imágenes anteriores, por lo tanto, se grabó directamente desde el software de la cámara (CamWare).

La detención de la cámara se realizó presionando el botón de “stop” en el programa al detectar de manera auditiva en “crack” y observar en la lectura de la celda de carga una caída en la fuerza correspondiente a la fractura del material. El tamaño del sensor se modificó a 1440×1440 ya que la forma de la muestra posee las mismas dimensiones tanto en x como en y por lo que no es necesario utilizar el sensor completo, lo que ayudó a aumentar el número de imágenes que se podían almacenar, es decir, se consiguió grabar más microsegundos del evento. Para seleccionar la velocidad de la cámara fue necesario realizar varias pruebas a diferentes velocidades y probar que no existiera de-correlación entre las imágenes al momento de obtener la fase con DHI, pero permitiendo grabar toda la fractura.

Después de varias pruebas se optó por grabar a 1300fps con un tiempo de exposición de 708.7 μ s. Con estos parámetros se logró registrar 2.343 segundos equivalentes a 3046 imágenes. Al controlar la cámara con otra PC fue necesario establecer una manera de relacionar el valor de la fuerza aplicada con el número de holograma de imagen grabado. Para esto, se guardó el valor de la carga y el tiempo en el que se aplicó dentro de un documento de texto. Aquí fue posible observar el momento en el que sucedió la fractura por la amplia diferencia en las libras detectadas, un ejemplo de este tipo de archivo se puede observar en la figura 3.12

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
168.573684	10.000000	24.000000	10.924000	
168.294898	10.000000	24.000000	11.151000	
168.074803	10.000000	24.000000	11.380000	
167.854709	10.000000	24.000000	11.630000	
130.761426	10.000000	24.000000	11.873000	
127.650755	10.000000	24.000000	12.106000	
125.904671	10.000000	24.000000	12.335000	
124.496066	10.000000	24.000000	12.567000	
123.322228	10.000000	24.000000	12.800000	

↑
↑
↑
↑

Libras
Horas
Minutos
segundos

Figura 3.12 Documento de texto de una prueba de fractura para relacionar la fuerza leída con el holograma de imagen

Aquí se puede observar que en el segundo 11.63 aún no había una fractura, pero justo en la siguiente iteración (11.873 s) la fuerza decreció 37 libras, lo que indica que hubo una liberación de compresión debido a la fractura del material. Ahora bien, para saber el número de holograma de imagen correspondiente a estos valores bastó con procesar las imágenes para obtener su fase envuelta mediante el método de la transformada de Fourier. Como se ha mencionado ésta realiza una diferencia entre dos hologramas, si utilizamos hologramas de imagen consecutivos se esperarían observar una fase sin decorrelación, pero cuando el material fractura libera tanta energía que se pierde esta correlación. En otras palabras, en un instante de tiempo aún se ve la fase y a la siguiente imagen se pierde por completo, por lo que se puede asumir que justo ahí sucedió la fractura del material.

En la figura 3.13 se observan tres mapas de fase envuelta no consecutivos de la compresión de una muestra, aquí podemos observar como de una imagen a otra la deformación es tal que la correlación se pierde (figura 3.13b) y después de unos cuantos micro segundos se recupera la fase (figura 3.13c) observando la fractura del material.

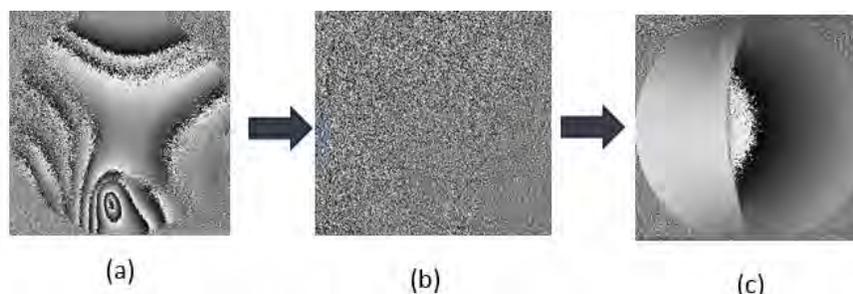


Figura 3.13 Mapas de fase (a) Holograma 766 previo a la fractura, (b) Holograma 771 fractura de la muestra y (c) Holograma 1112 después de la fractura.

Si hacemos una relación de los valores guardados en el archivo de texto de la figura 3.12 y el número de holograma de la fractura en la figura 3.13b, podemos afirmar que para esta muestra justo en el holograma 771 se registró una fuerza de 131 lbf indicando la fractura total de la muestra.

3.3. Pruebas iniciales de carga con DHI

Una vez conocidos estos parámetros de grabación y sincronización, se procedió a realizar las muestras para probar el arreglo interferométrico en conjunto con la máquina de compresión y obtener los resultados. Para esto se fabricaron 9 muestras por cada tipo de probeta M0, M1 y M2. A éstas se les aplicó una capa fina de revelador y se colocaron en la máquina de compresión, aquí se llevaron a la precarga seleccionada y a partir de ella se comenzó a grabar el evento comprimiendo cada probeta hasta la fractura.

3.3.1. Prueba de repetibilidad para 27 muestras

Se realizaron 27 muestras, 9 para cada tipo de probeta de las cuales sólo una tuvo un comportamiento igual al observado en las pruebas de la sección 3.1.3, las demás sufrieron una variación en el ciclo de termo formado debido a un desperfecto en la temperatura de la máquina montadora (ver anexo B). Esto ocasionó que la grieta generada por la carga aplicada se propagara más rápido, lo que impidió observar el comportamiento de la muestra después de fallar y la propagación del crack. A pesar de que estos resultados no fueron satisfactorios, pero repetibles entre ellos, reforzaron la validación de tener una fabricación de muestras repetible.

Las 27 nuevas muestras se realizaron en un mismo día para mantener las mismas condiciones de temperatura en el ambiente. Una vez curadas las muestras se les colocó cinta masking en una de las caras (figura 3.14a) y se les aplicó revelador en la cara opuesta (figura 3.14b), la cual se limpió previamente con alcohol. Posteriormente se situaron en la máquina de compresión siempre en la misma posición al contar con unas marcas en la cruceta inferior de la maquina (figura 3.14c). La cinta sirvió para sujetar las muestras al momento de colocarlas y evitar que se removiera el revelador aplicado. Para sujetarlas se desplazó la cruceta superior hacia abajo hasta llegar a las ~ 7 lb-f y utilizando un regleta se verificó que se encontraran perpendiculares a la maquina (figura 3.14d).

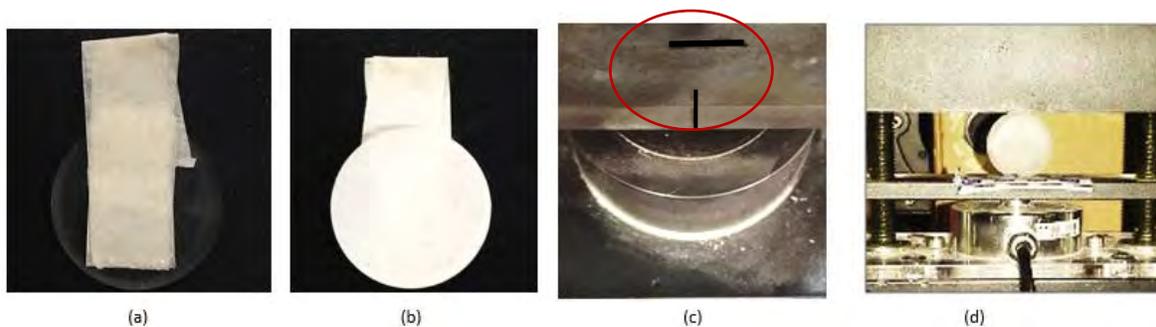
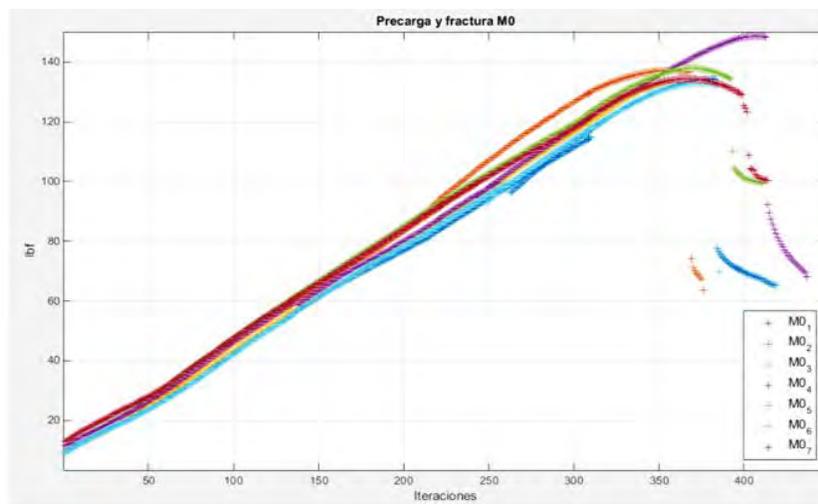
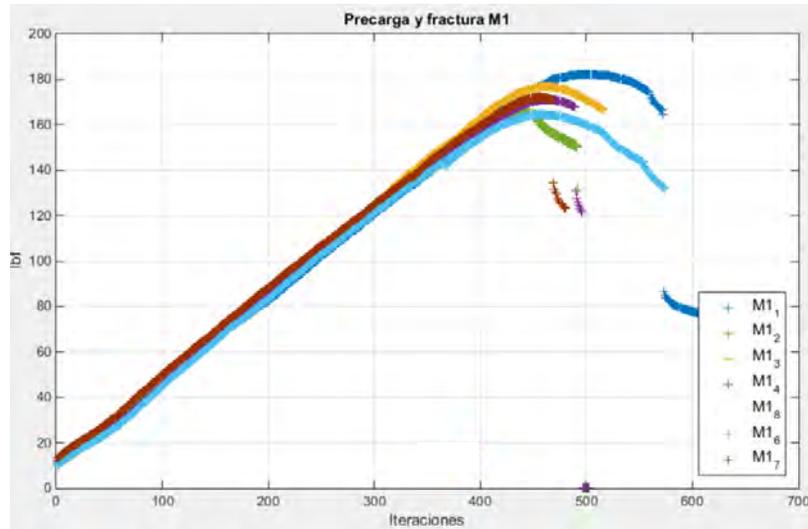


Figura 3.14 Colocación de la muestra. (a) cinta masking, (b) revelador, (c) marcas en la cruceta y (d) probeta perpendicular.

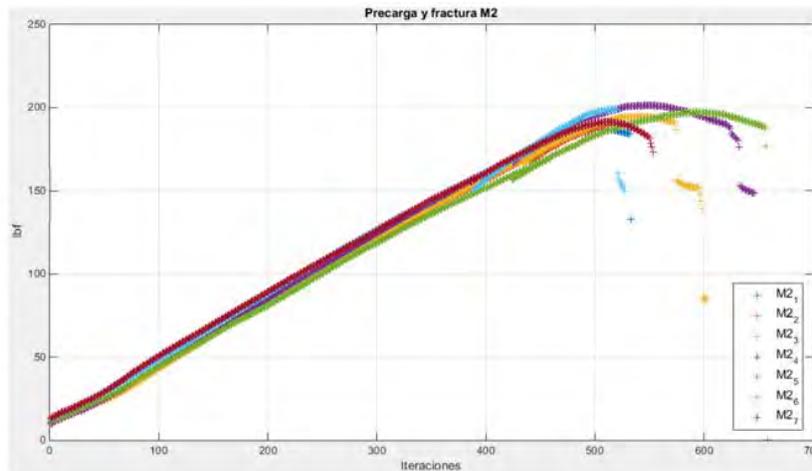
Una vez sujetas y alineadas las probetas se llevaron a la precarga definida y se abrió el “shutter” del láser, a partir de ahí se comenzó a grabar el evento comprimiendo el material hasta su fractura. Las gráficas de la carga aplicada se muestran en la figura 3.15 para cada set de probetas, en ellas se puede observar la repetibilidad que se obtuvo en la fuerza máxima manteniéndose dentro del rango fijado y en la aplicación de la carga para un ejemplo de siete muestras (por simplicidad) por cada tipo de probeta.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.15 Repetibilidad en la carga aplicada para una muestra de 7 probetas de las 9 analizadas de (a) M0, (b) M1 y (c) M2.

Durante las pruebas en ocho de los nueve ensayos de cada probeta inmediatamente después de generarse la fractura, parte de probeta caía en pedazos impidiendo observar su comportamiento total debido a la velocidad con la que la grieta se propagó. Este cambio ocurrió por una variación en la temperatura de la máquina de termo formado debido a una falla en las resistencias de calentamiento que posteriormente se corrigió para dejar un nuevo set de muestras y obtener los resultados finales de este trabajo. Sin embargo, este set de 27 muestras al procesar los hologramas de imagen comprobó que el sistema óptico se encontraba sincronizado con el sistema mecánico de compresión ya que se logró grabar el inicio de la grieta y la fractura del material.

En la figura 3.16 se muestran varios mapas de fase envuelta para distintos instantes de una muestra por cada probeta.

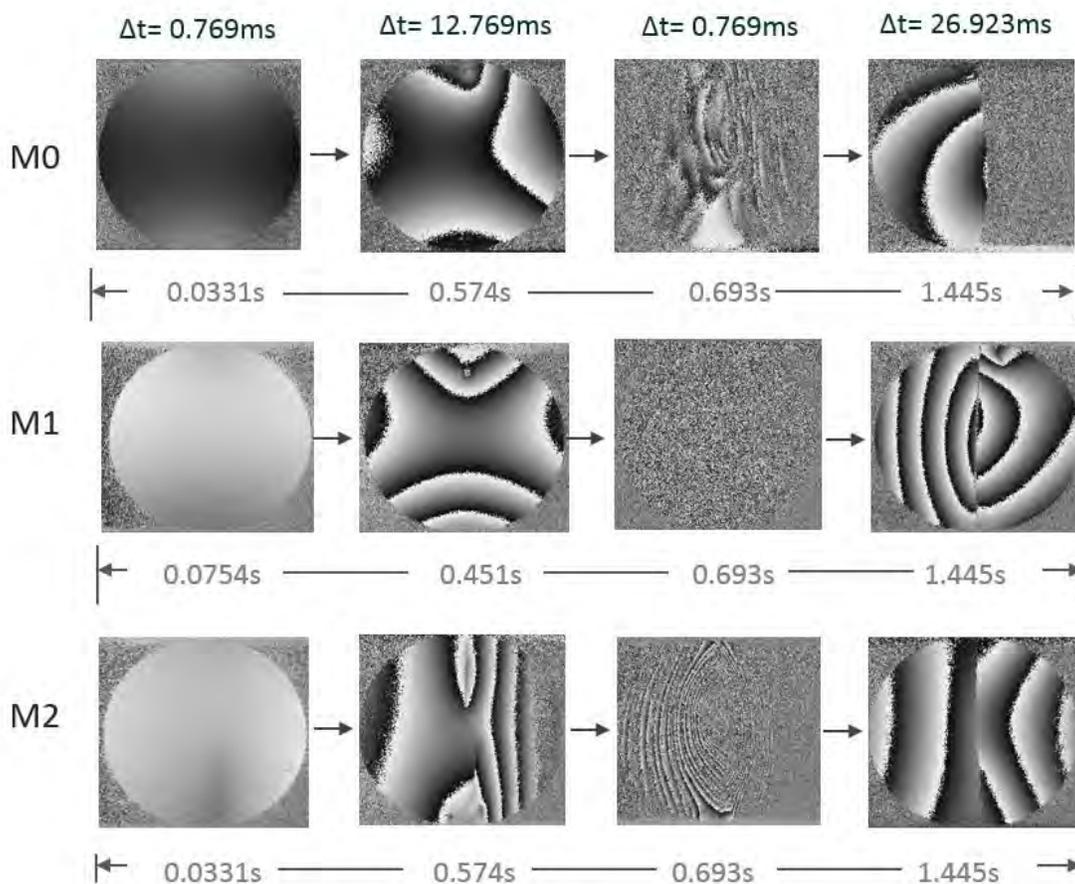


Figura 3.16 Mapas de fase envueltos para comprobar la sincronización entre la máquina de compresión y la cámara rápida para (a) M0, (b) M1, (c) M2.

El valor Δt de cada columna indica la diferencia temporal entre el holograma de referencia y el holograma deformado para cada caso. Se tomaron los mismos valores de Δt para las 3 muestras al calcular la fase envuelta. Cabe señalar que esta misma operación se realizó para las 24 muestras restantes lo que permitió para corroborar que la aplicación de la carga sobre las probetas era repetible independientemente de la velocidad con la que se propagara la grieta (como se demostró en la figura 3.15). La fuerza máxima detectada siempre se encontró dentro de un rango de fuerza menor a las 23 libras y la pendiente de la precarga siempre fue constante. En conclusión, las muestras se comportaron de una manera repetible entre ellas. Todo lo descrito con anterioridad tuvo como fin un análisis exhaustivo previo a la obtención de los resultados finales que requieren contar con una repetibilidad en: la aplicación de la carga, la sincronización del sistema mecánico con la cámara rápida y el método de fabricación de las muestras.

Capítulo IV

4. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados finales del comportamiento de la fractura del conjunto de muestras que representan a las tres probetas: M0, M1 y M2. En esta ocasión y una vez comprobada la repetibilidad de la fabricación, se realizaron cinco muestras por probeta, por lo tanto, se obtuvieron 15 series de hologramas de imagen de los cuales se obtuvo su fase envuelta para realizar una primera comparación y se desarrollaron para obtener su desplazamiento absoluto (en el anexo C se muestra un promedio de como se ve la fase envuelta de todo el evento con un submuestreo de 11 para la muestra M0).

La fabricación del conjunto de probetas se realizó con los parámetros especificados en el capítulo anterior. Todas las muestras fueron elaboradas en el mismo día para mantener las mismas condiciones. El ensayo de compresión se realizó en un mismo día intercalando los tipos de muestras, es decir: M0, M1, M2, M0, M1, M2, M0, M1, etc. Esto con el objetivo de asegurar que las condiciones ambientales sean lo más próximas entre distintos tipos de probeta. También, durante la grabación del ensayo de compresión se mantuvieron las mismas condiciones dentro del laboratorio.

A continuación, se muestra una comparación entre los tres tipos de muestras para instantes iguales durante la compresión como:

- Formación de la grieta
- Propagación de la grieta
- Al momento de la fractura (transitorio)
- Estabilización después de la fractura

Por último, se muestra la medición del desplazamiento en w como mapa en 2D y pseudo 3D para cada tipo de probeta.

4.1. Formación de la grieta

Cuando un material es sometido a una fuerza, este pasa por dos zonas, la primera es la zona elástica en la cual el material puede deformarse, pero al retirar la carga recupera su estado inicial. La segunda es la zona plástica donde la deformación permanece en el material aun cuando se retira la carga. Una vez que el material se encuentra en la zona plástica, cualquier daño es irreversible, por lo tanto, al observar el inicio de una grieta en el material, este fallará por la propagación de la misma. En muchas ocasiones es posible observar la grieta como un punto o peca que puede aparecer tanto en la parte superior del material como en la inferior para este tipo de compresión y geometría de la probeta.

La ventaja de contar con esta información de forma interferométrica (campo completo y estados de deformación relativa) es la posibilidad de predecir la falla. Cuando el material está a punto de fracturar se debe a la propagación de una grieta o bien a una alta concentración de esfuerzos (posibles de calcular a partir de la fase óptica). En este caso se observará como un cambio en el patrón del mapa de fase, un ejemplo de esto se muestra en la figura 4.1 para una muestra de M1.

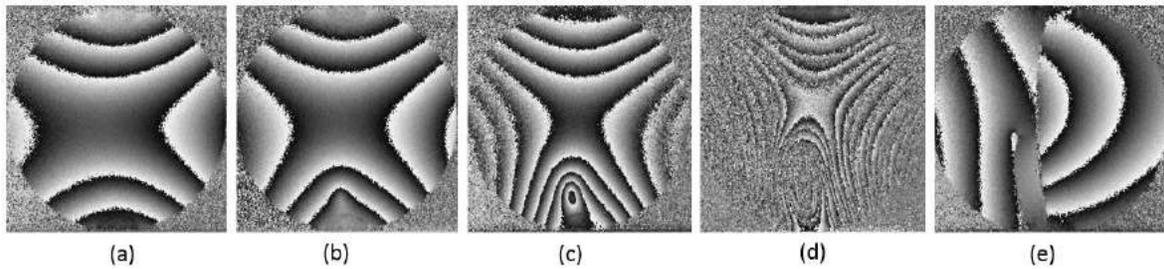


Figura 4. 1 Serie de mapas de fase envuelta de una muestra M1 para (a) compresión, (b) inicio de grieta, (c) grieta, (d) propagación de grieta y (e) probeta fracturada.

En esta figura se observa como la fase sufre un cambio a medida que la grieta se forma y propaga. La fractura resultante produce planos de fase distintos después de estabilizarse (~ 0.7 ms). En la figura 4.2 se presentan los mapas de fase envuelta para la compresión en la zona plástica sin (lado izquierdo) y con presencia de la grieta (lado derecho) para una muestra de cada probeta. Es posible observar que de acuerdo al tipo de probeta el patrón de franjas, aunque es similar tiene marcadas diferencias entre sí. De la figura 4.2 también es posible observar que la columna izquierda muestra una simetría en las franjas respecto al eje horizontal, lo que significa que el material aún se encuentra solo en compresión, pero, al modificarse dicho patrón (columna derecha) además de generar un cambio irreversible en la muestra, indica que el material está próximo a fallar.

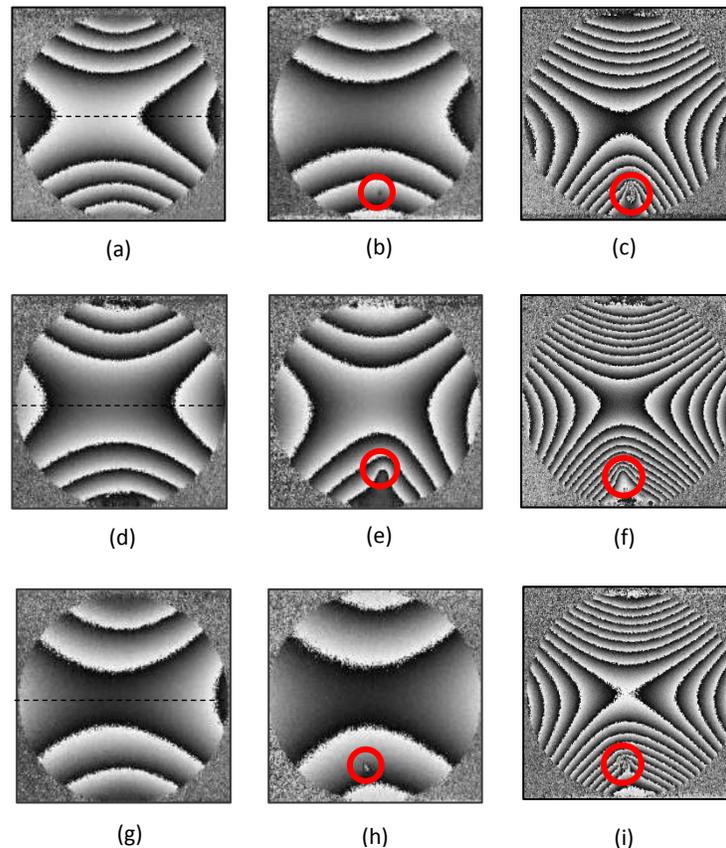


Figura 4. 2 Mapas de fase envuelta en región plástica sin (izquierda) y con grieta (derecha) para muestras de (a) M0, (b) M1 y (c) M2.

4.2. Propagación de la grieta

Una fractura tiene su origen en pequeños defectos o concentraciones de esfuerzo/fuerza en donde cada incremento en la deformación produce un avance en la grieta o una mayor concentración hasta que el material no soporta la carga aplicada y se fractura. Al querer estudiar la falla del material es necesario analizar la formación y propagación de la grieta. La diferencia en la velocidad con la que se propaga la grieta en las probetas depende de la relación que guardan los materiales del compuesto (cobre y PMMA) ya que esto modifica el módulo de Young de la misma.

En la figura 4.3 se puede observar la propagación promedio de la grieta observada para las muestras M0. Esta evolución inicia como un punto en la parte central inferior del material (figura 4.3a y 4.3b), pero al pasar 28.46ms (37 imágenes) la grieta comienza a propagarse (figura 4.3c). Después de 12.3ms su tamaño alcanza a ser de la mitad de la muestra (figura 4.3d) para llegar a aumentar antes de la fractura como se muestra en la figura 4.3e. En esta última imagen es posible observar las vibraciones del material al comenzar a liberar carga y regiones de-correlacionadas.

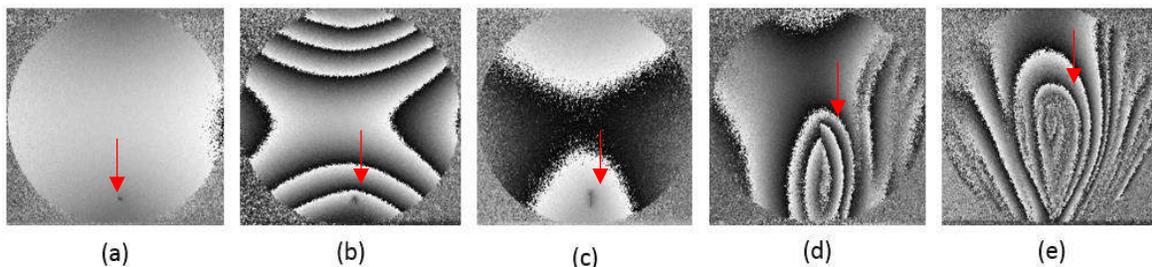


Figura 4. 3 Instantes en la propagación de la grieta en M0.

De forma similar las figuras 4.4 y 4.5 muestran los mismos instantes para M1 y M2.

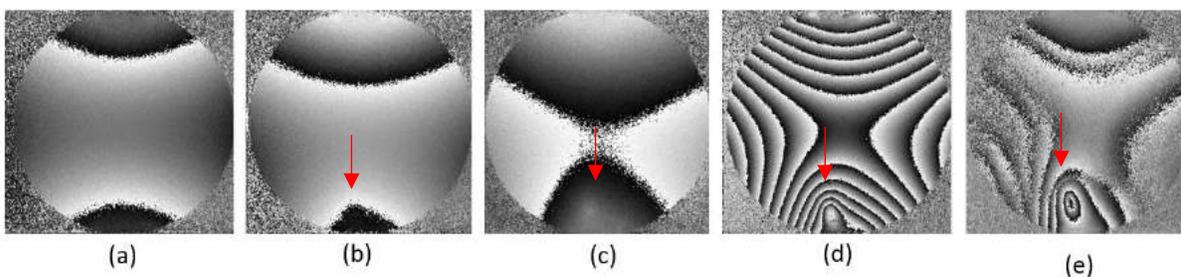


Figura 4. 4 Instantes en la propagación de la grieta en M1.

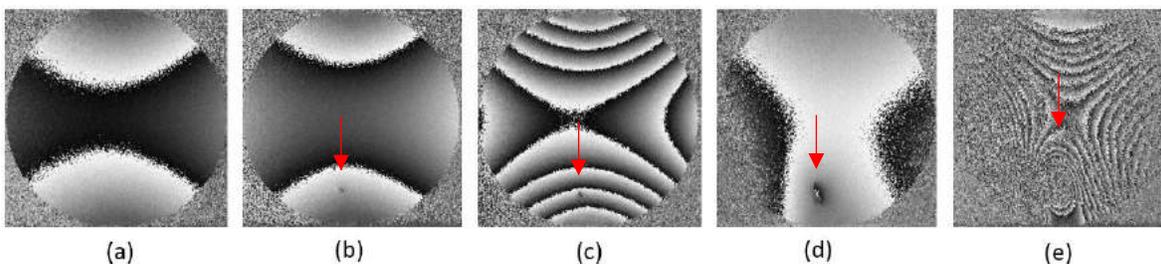


Figura 4. 5 Instantes en la propagación de la grieta en M2.

A pesar de que en las muestras M0 y M2 fue posible observar la aparición de la grieta, su propagación no es igual, ya que mientras en M0 la grieta puede alcanzar la longitud de la mitad de la muestra, en M2 solo crece un poco y fractura inmediatamente. Sin embargo, como se mostró en el capítulo anterior, M2 soporta más fuerza que M0, por lo tanto, para cada muestra se tiene un comportamiento diferente antes de fracturar. En M1 el cambio en la simetría también se debe a la presencia de la grieta, pero generada en la cara opuesta, por lo que tarda más en verse reflejado en la superficie que se está midiendo y es por ello que el tiempo que se tiene de su propagación hasta la fractura total es tan corto.

4.3. Transitorio

Un evento transitorio dura relativamente poco tiempo ya que es la transición o cambio de un estado a otro, en este caso es el periodo que tarda en estabilizarse la muestra después de fracturar. El tiempo de estabilización se fija cuando es posible observar fase cercana a cero posterior a la liberación de tensión por la fractura. Todas las muestras sin importar el tipo de probeta oscilaron de la misma manera durante un periodo de tiempo (modo de resonancia). Esta oscilación se presenta como el número de imágenes que deben pasar hasta obtener una fase sin decorrelación después de n fases de-correlacionadas y que repitan dicho ciclo. En la figura 4.6 se puede observar como cada 6 imágenes se recupera la fase en las imágenes resaltadas con un cuadro azul.

Que el comportamiento presentado sea igual en los tres tipos de probetas da la posibilidad de decir que esta oscilación no proviene directamente de la muestra, si no de la limitación del objeto al estar en la prensa aun comprimiendo.

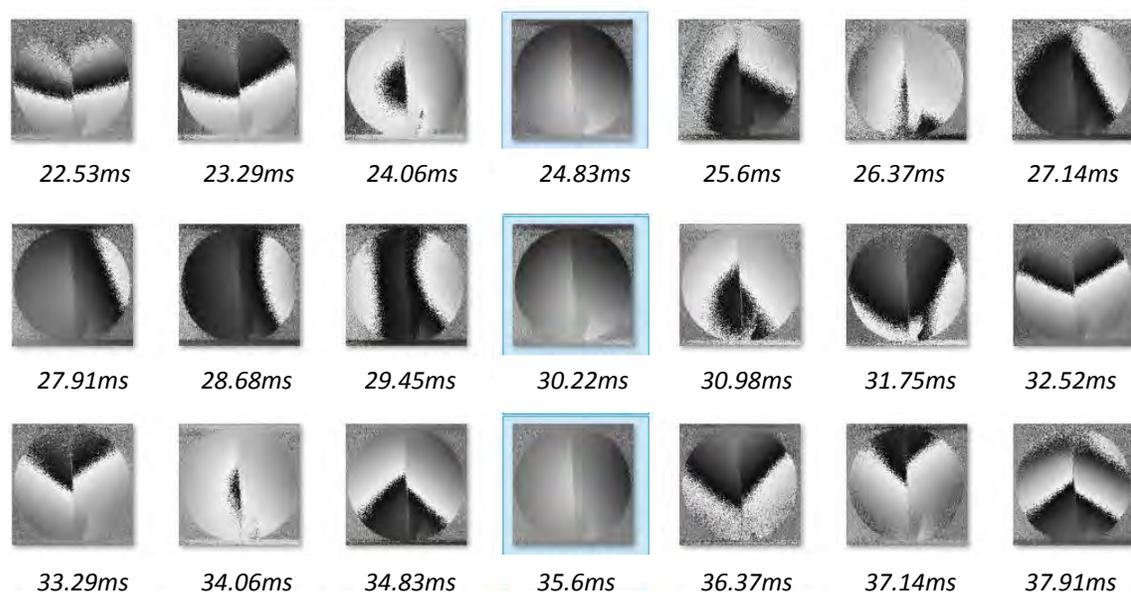


Figura 4. 6 Mapas de fase durante la vibración de una muestra M0 (las imágenes resaltadas en azul representan la estabilización de la muestra).

4.4. Estabilización después de la fractura

Una vez que la muestra se estabiliza es posible referenciar las imágenes deformadas en un intervalo mayor para ver la deformación temporal obtenida después de la fractura, esto también es una parte importante ya que nos permite observar las partes en las que se dividió la probeta. Todas las muestras fracturaron completamente por la mitad sobre el eje y , lo que

género que se tuviese el material dividido en dos partes comportándose ambas de manera diferente. Así mismo se generaron ramificaciones en cada una de estas dos partes esto se muestra en los mapas de fase de la figura 4.7 en donde el holograma de referencia para la columna izquierda es uno antes que el deformado, mientras que en la columna derecha la diferencia entre hologramas es de 18 para M0 y de 29 para M1 y M2 y se seleccionó con el fin de observar un número similar de franjas y poder observar de manera similar las ramificaciones.

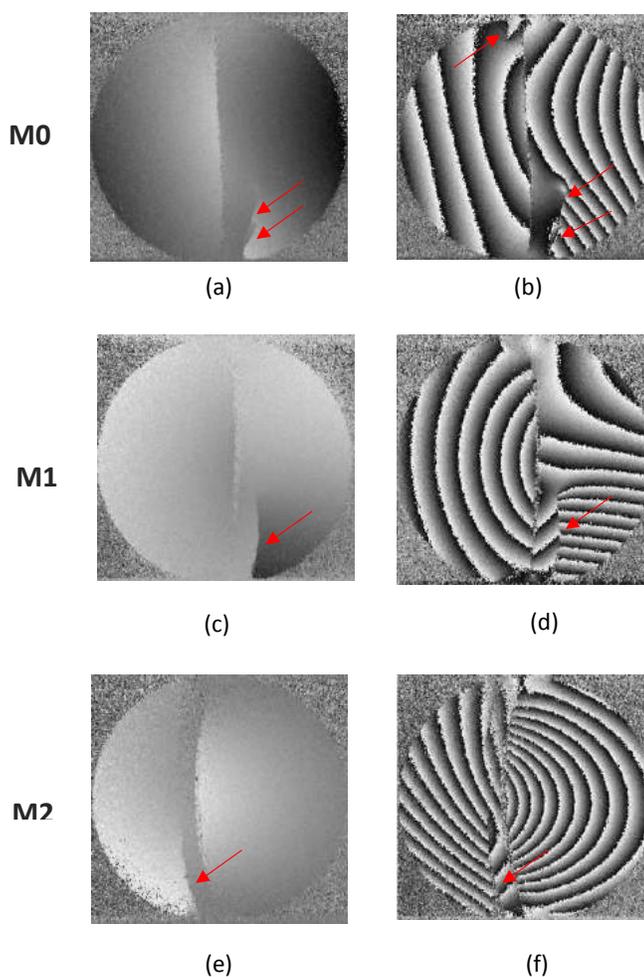


Figura 4. 7 Mapas de fase envueltos en estabilización para las probetas M0, M1 y M2.

4.5. Medición del desplazamiento

El tiempo que se grabó el evento fue de 2.343 segundos y abarca desde la deformación plástica poco antes de que aparezca la grieta hasta la fractura total y su estabilización después de ella aun en compresión, En la figura 4.8 se puede observar la región en la que se grabaron las series de hologramas de imagen y se calcularon los mapas de fase envuelta para las 15 muestras. Por cuestión de espacio los mapas de desplazamiento se presentan para una sola

probeta por cada tipo de muestra. Esto debido a que se aseguró la repetibilidad y se puede considerar como representativo el mostrar uno solo.

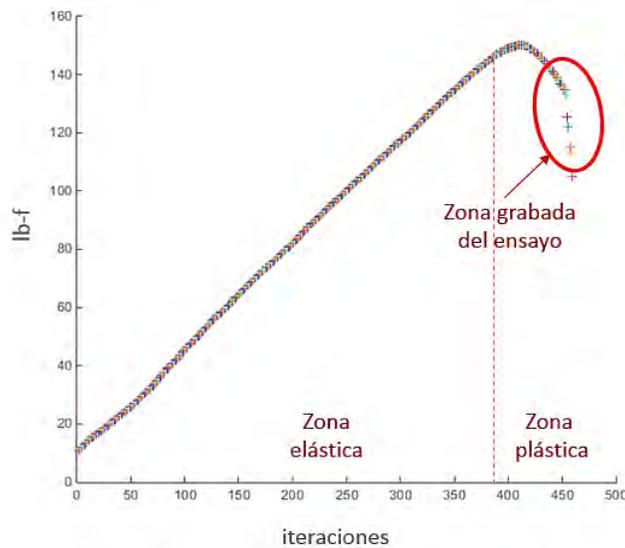


Figura 4. 8 Curva característica del ensayo de compresión indicando la región que se grabó para cada muestra.

4.5.1. Desplazamiento en probetas tipo M0

En la figura 4.9 se muestra una gráfica (tiempo - fuerza) en donde se indican las regiones de donde se toman los mapas de fase envueltos que se presentarán como mapas de desplazamiento. De esta figura, el primer mapa de fase utilizado está en el segundo ~ 0.42 mientras que el utilizado para mostrar la fractura se tomó en el ~ 1.65 .

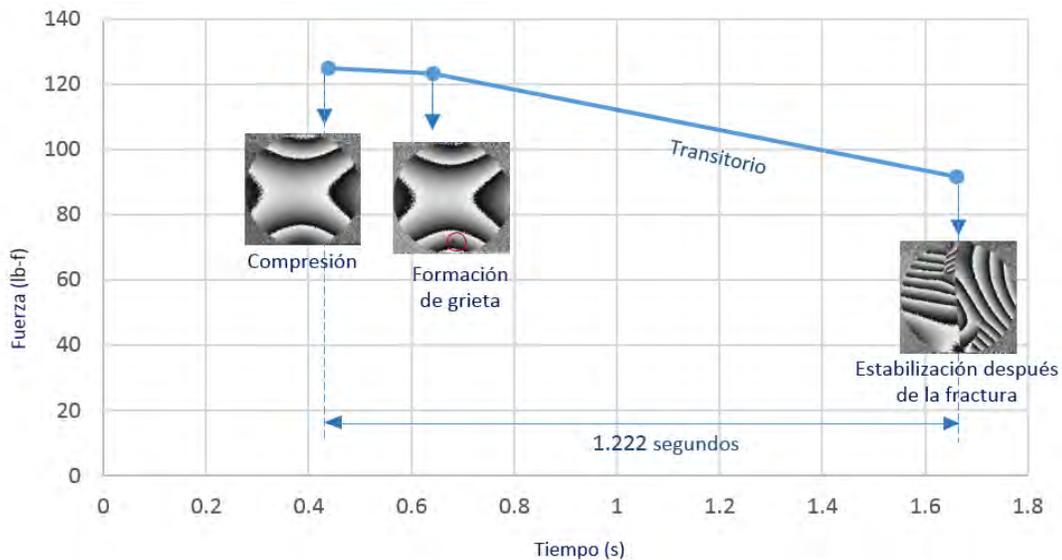
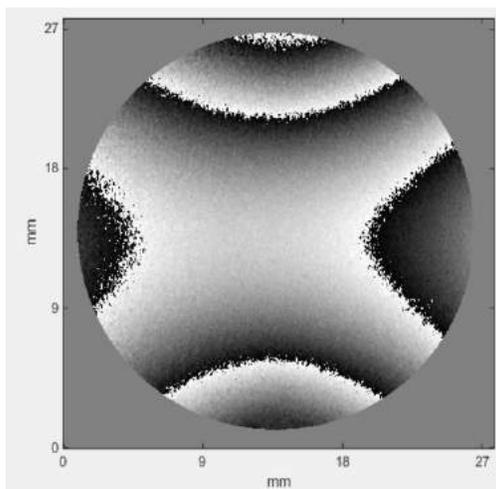
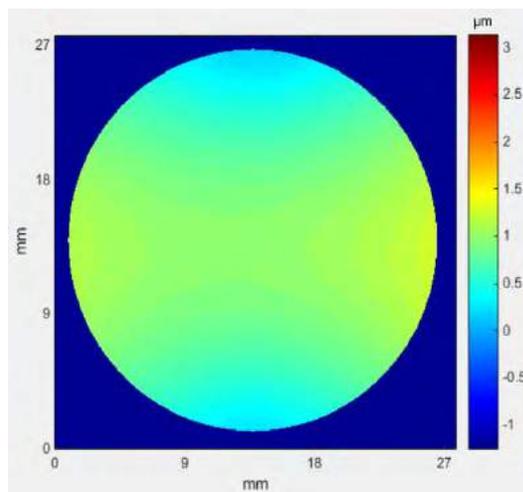


Figura 4. 9 Mapas de fase envuelta seleccionados de la probeta M0.

Los tres instantes seleccionados de la figura 4.9 se presentan en las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 respectivamente. Los Δt de 15.38 ms en los tres casos son iguales para fines de comparación.

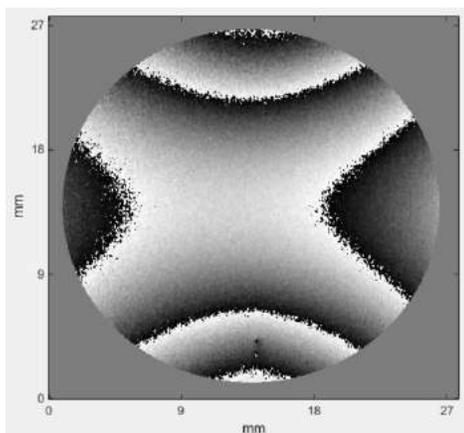


(a)

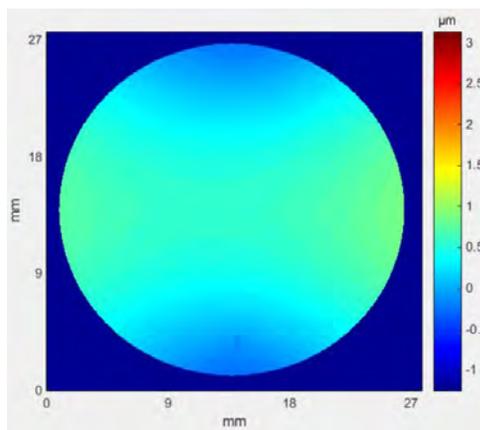


(b)

Figura 4. 10 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica antes de la grieta en M0.



(a)



(b)

Figura 4. 11 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica con presencia de la grieta en M0.

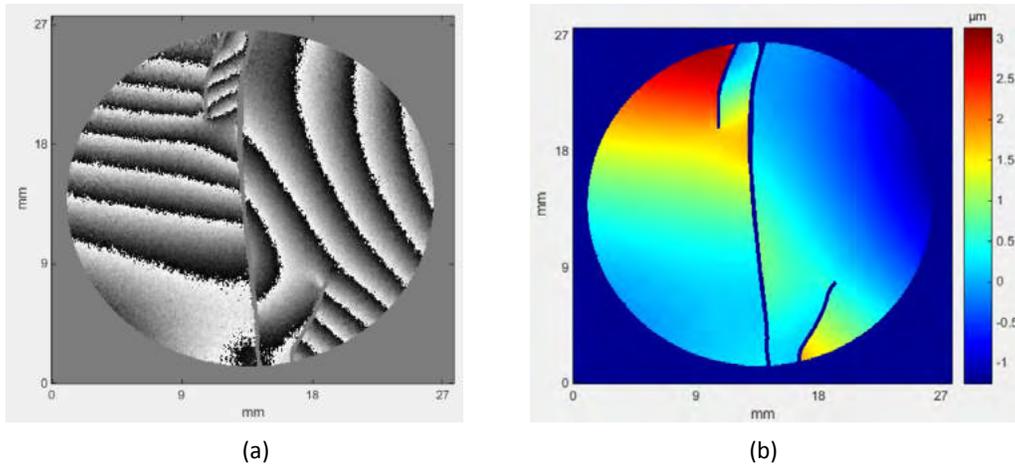


Figura 4. 12 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento después de la estabilización ante la fractura en M0.

La figura 4.10a se puede observar la simetría relativa del patrón de franjas de la fase que indica que aún no se cuenta con la presencia de alguna grieta. La figura 4.10b muestra el mapa de desplazamiento obtenido a partir de la fase de 4.10a con un desplazamiento de $1.305\mu\text{m}$ a partir de la ecuación 7. En la figura 4.11a y 4.11b se puede observar la grieta generada en la zona central inferior de la muestra. El comportamiento que tuvo la muestra después de la fractura se puede observar en la figura 4.12a y 4.12b. Aquí se puede observar como al fracturarse por la mitad se comporta como 2 objetos completamente distintos.

Para las muestras de la probeta M0 las 4 muestras restantes tuvieron un comportamiento similar al presentado y su promedio de fuerza máxima fue de 155lb-f. A pesar de que fue la probeta que soporto una menor fuerza debido a la alta presencia del refuerzo que impidió al PMMA reacomodarse antes de generarse una grieta, fue la que tuvo la propagación de la fractura más lenta debido a que el compuesto comienza a tener mayor comportamiento dúctil lo que significa que posee una propagación lenta de la grieta, esta característica tuvo gran influencia en el comportamiento mecánico final de la probeta en este tipo de ensayo. Que se propague a una velocidad menor permitirá predecir la falla del material ya que se tendrá más tiempo para detectarla además de una longitud mayor.

4.5.2. Desplazamiento en probetas tipo M1

De forma similar a M0 en la figura 4.13 se presentan los mapas de fase envueltos seleccionados para obtener los mapas de desplazamiento sobre una gráfica de tiempo contra fuerza para M1.

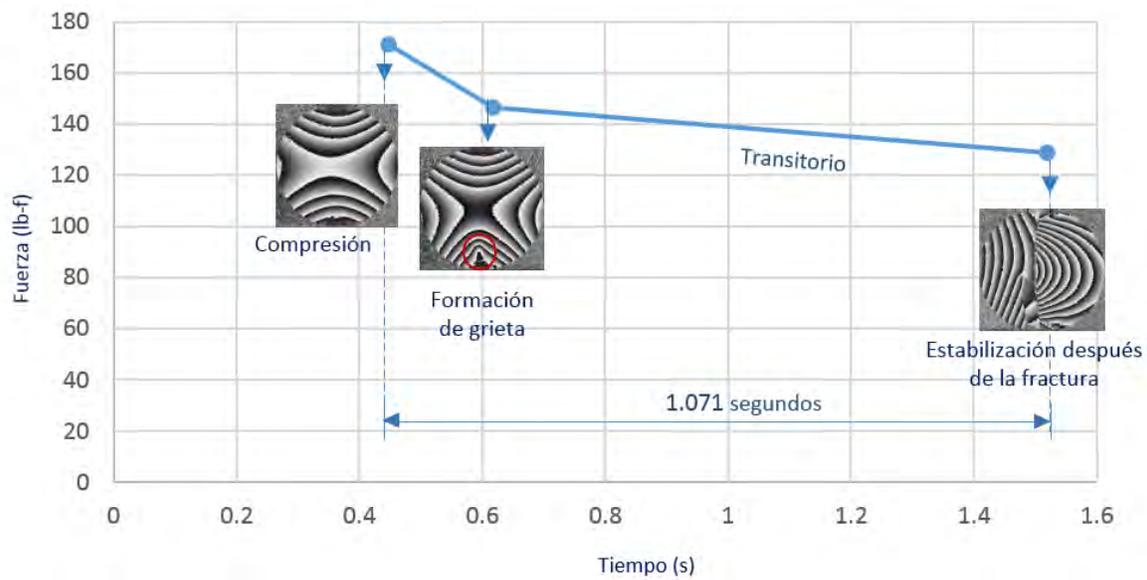


Figura 4. 13 Mapas de fase envuelta seleccionados de la probeta M1.

Las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 muestran los instantes seleccionados en la figura 4.13 como mapas de fase envuelta y mapas de desplazamiento.

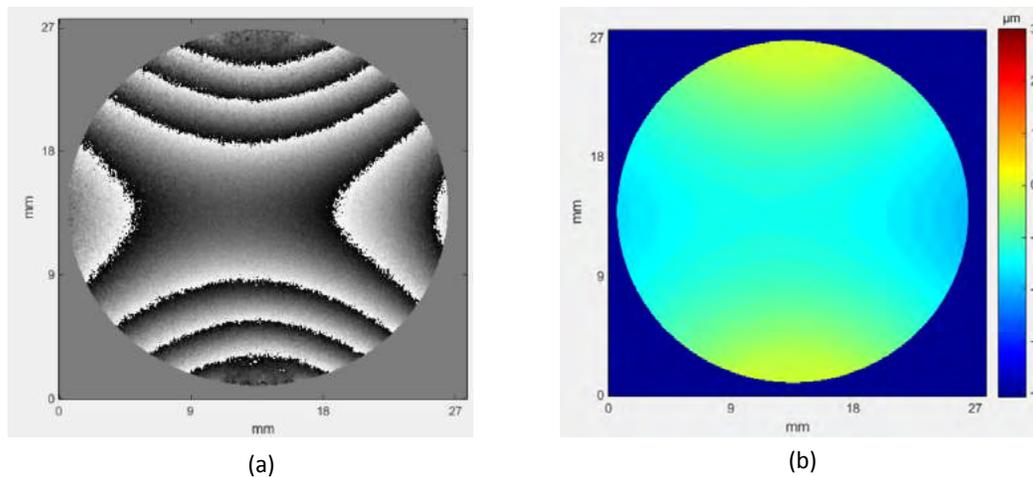


Figura 4. 14 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica antes de la grieta en M1.

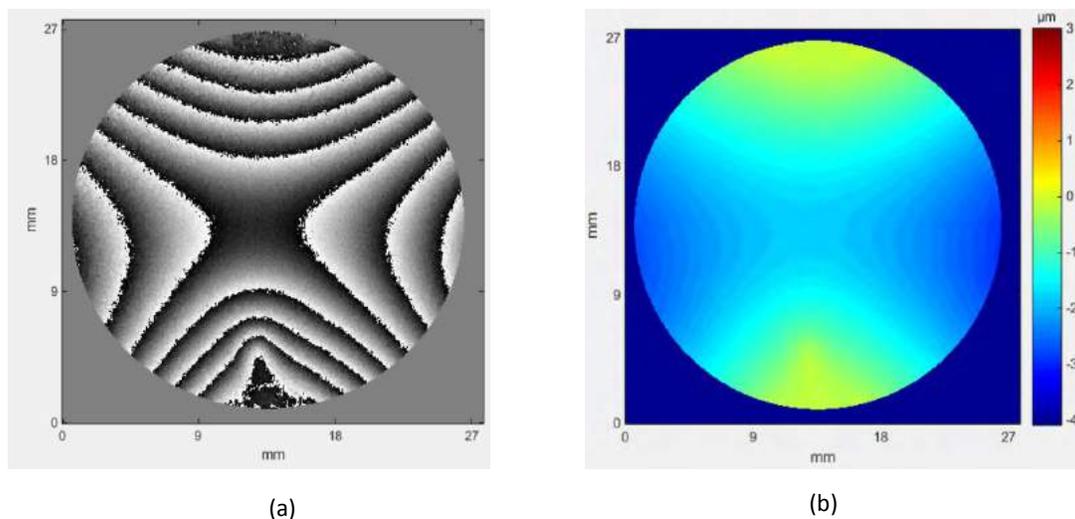


Figura 4. 15 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica con presencia de la grieta en M1.

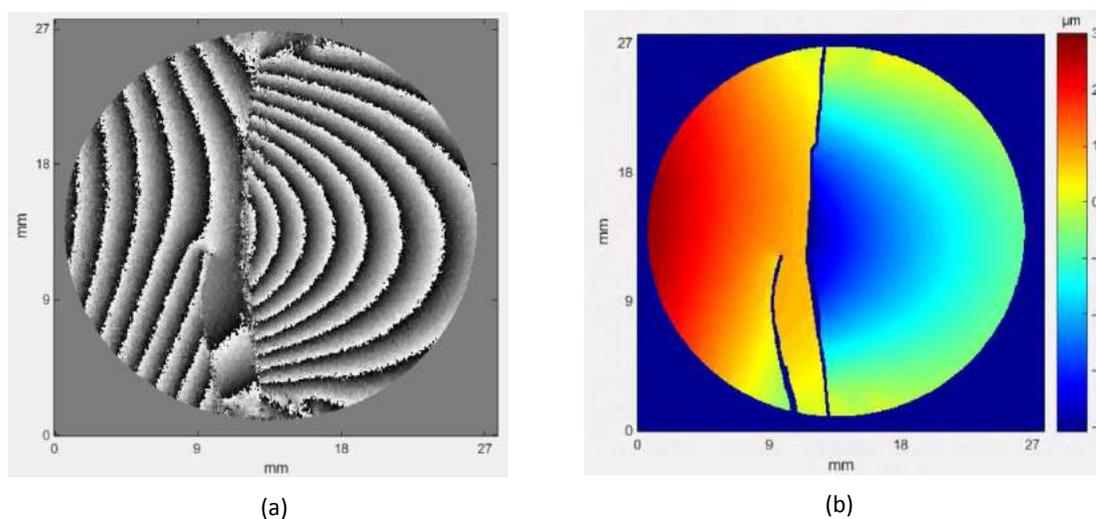


Figura 4. 16 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento después de la estabilización ante la fractura en M1.

La figura 4.14 muestra al igual que la figura 4.10 un patrón de franjas simétricas indicativo de una ausencia en la formación de la grieta. En la figura 4.15a y 4.15b se puede observar el cambio en la simetría de la fase en la zona central inferior, pero con un perfil distinto al observado en M0. Esto es también evidente en la figura 4.16 con un patrón de fractura diferente después de estabilizarse las partes resultantes de la probeta. Todas las muestras utilizadas de la probeta M1 tuvieron un comportamiento similar al mostrado, el promedio de su fuerza máxima soportada fue de 175lb-f, aunque para esta probeta nunca fue posible observar la generación de una grieta como en M0 y M2 debido a que la grieta no se formó en la superficie que se está midiendo, sin embargo, observamos el efecto de ella.

4.5.3. Desplazamiento en probetas tipo M2

En la figura 4.17 se muestran los mapas de fase envueltos seleccionados para M2 y sus intervalos temporales. Los mapas de desplazamiento para cada caso se muestran en las figuras 4.18, 4.19 y 4.20.

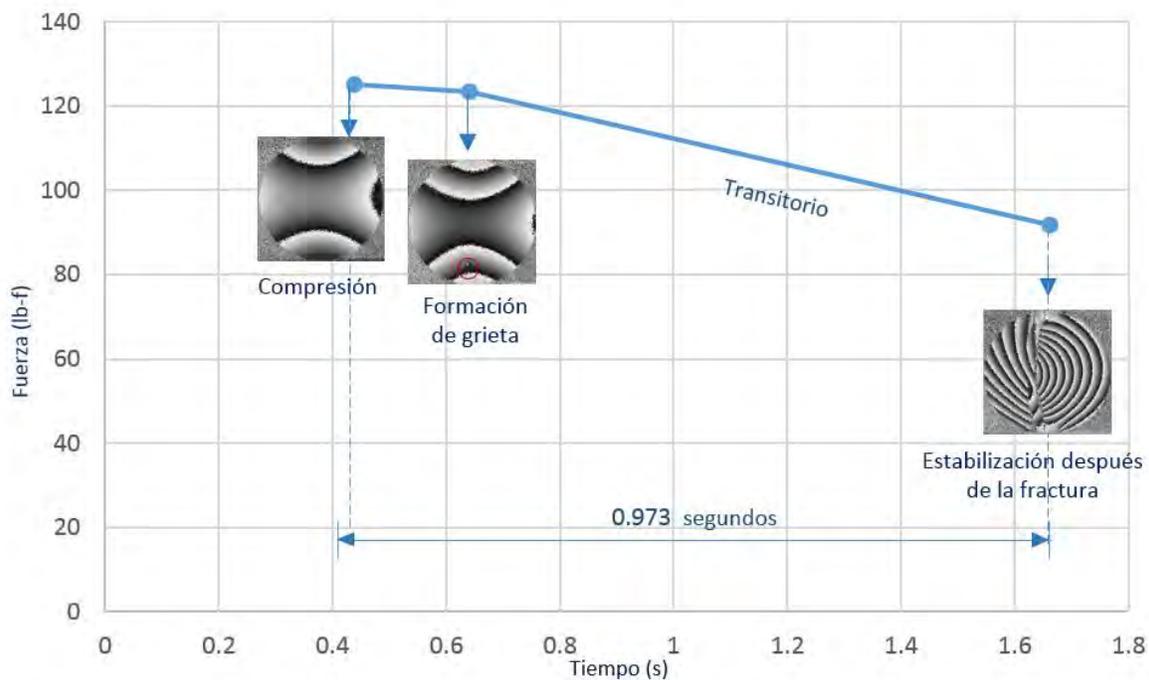


Figura 4. 17 Mapas de fase envuelta seleccionados de la probeta M2.

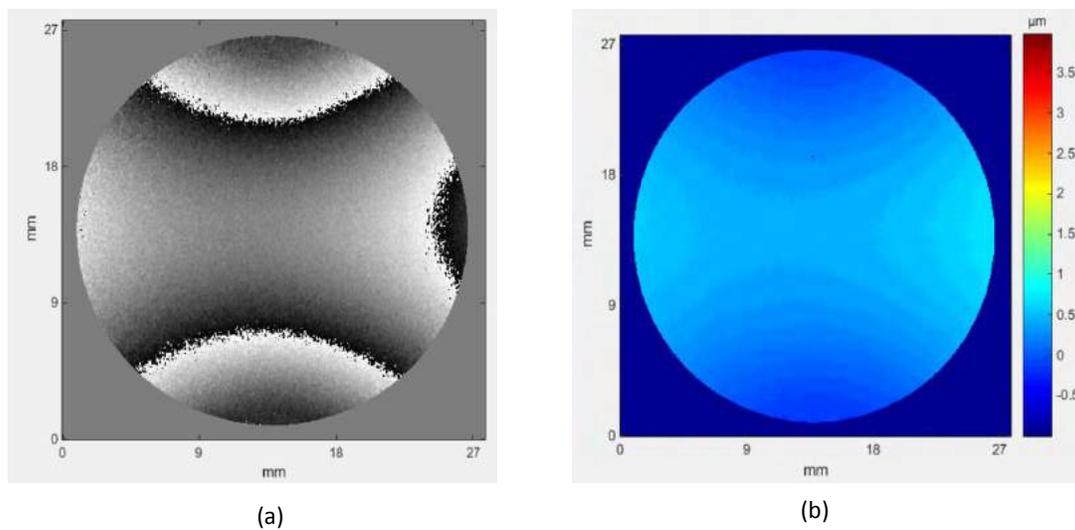


Figura 4. 18 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica antes de la grieta en M2.

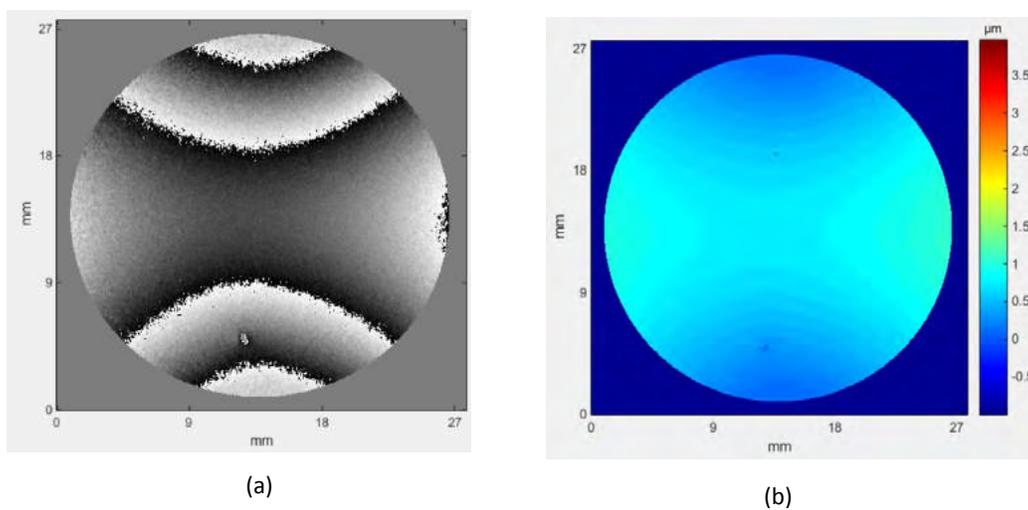


Figura 4. 19 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento en la región plástica con presencia de la grieta en M2.

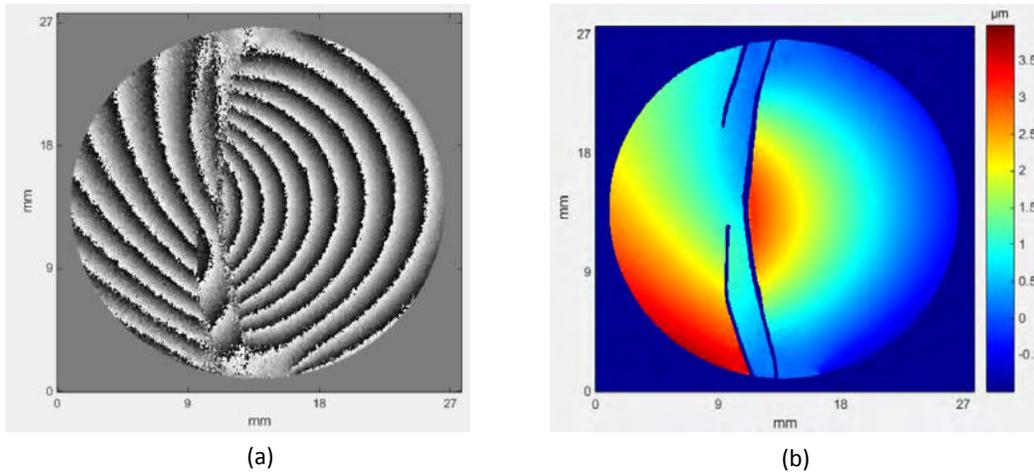


Figura 4. 20 (a) fase envuelta y (b) mapa de desplazamiento después de la estabilización ante la fractura en M2.

La figura 4.18 es similar a las observadas para las muestras M0 y M1 (figura 4.10 y 4.14) indicando la ausencia de una grieta al observar un patrón de franjas simétrico, pero en cuanto aparece la grieta (figura 4.19) se hace evidente un patrón distinto. Esto ocurrió también en la fractura teniendo un patrón más pronunciado como se ve en la figura 4.20. Las 4 muestras restantes de M2 presentaron un comportamiento similar al que se mostró y su promedio de fuerza máxima fue de 200-f. A pesar de que fue la probeta que soporto mayor fuerza fue la que tuvo la propagación de la grieta más rápida debido a que la mayor parte del material es PMMA y este es un material frágil.

4.5.3.1. Comparación de los mapas de desplazamiento

En esta sección se presenta una comparación de los mapas de desplazamiento obtenidos para cada tipo de probeta cuando aparece la grieta y en la fractura. En esta ocasión se muestra la información como mapas pseudo 3D para observar las diferencias entre los patrones complejos que se obtienen por la fractura. En la figura 4.21, 4.22 y 4.23 se muestran los mapas de la generación de la grieta y la fractura en dos instantes respectivamente. En la figura 4.21 se puede observar de una manera más clara que la probeta M1 tuvo la mayor deformación absoluta y en el caso de M0 y M3 se puede observar una mayor magnitud de la grieta de la parte inferior central. El perfil de desplazamiento es igual en las probetas, pero en M1 su deformación es en sentido contrario al resto.

En la figura 4.22 y 4.23 podemos observar la deformación de las tres probetas después de que fracturaron con un Δt entre holograma de referencia y deformado de 0.769ms (figura 4.22) y de 12.31ms (figura 4.23). Lo anterior hace notar el cambio en magnitud de la fractura en unos pocos milisegundos. Se puede observar como cada probeta fracturo de una manera diferente y como sus magnitudes cambian de positivo a negativo.

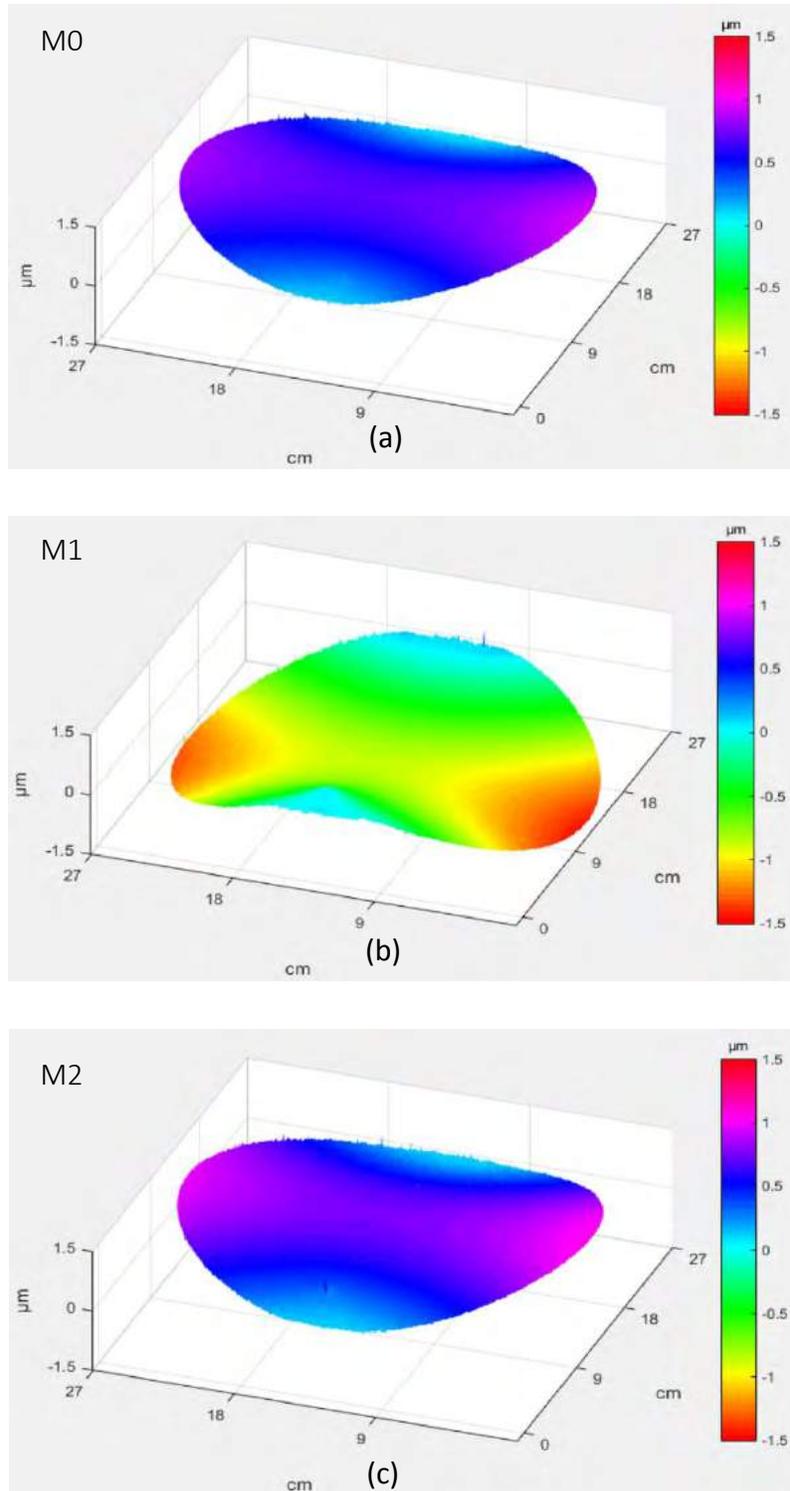


Figura 4. 21 Comparación pseudo 3D de los mapas de desplazamiento en la generación de la grieta para (a) M0, (b) M1 y (c) M2 con un Δt de 12.31ms.

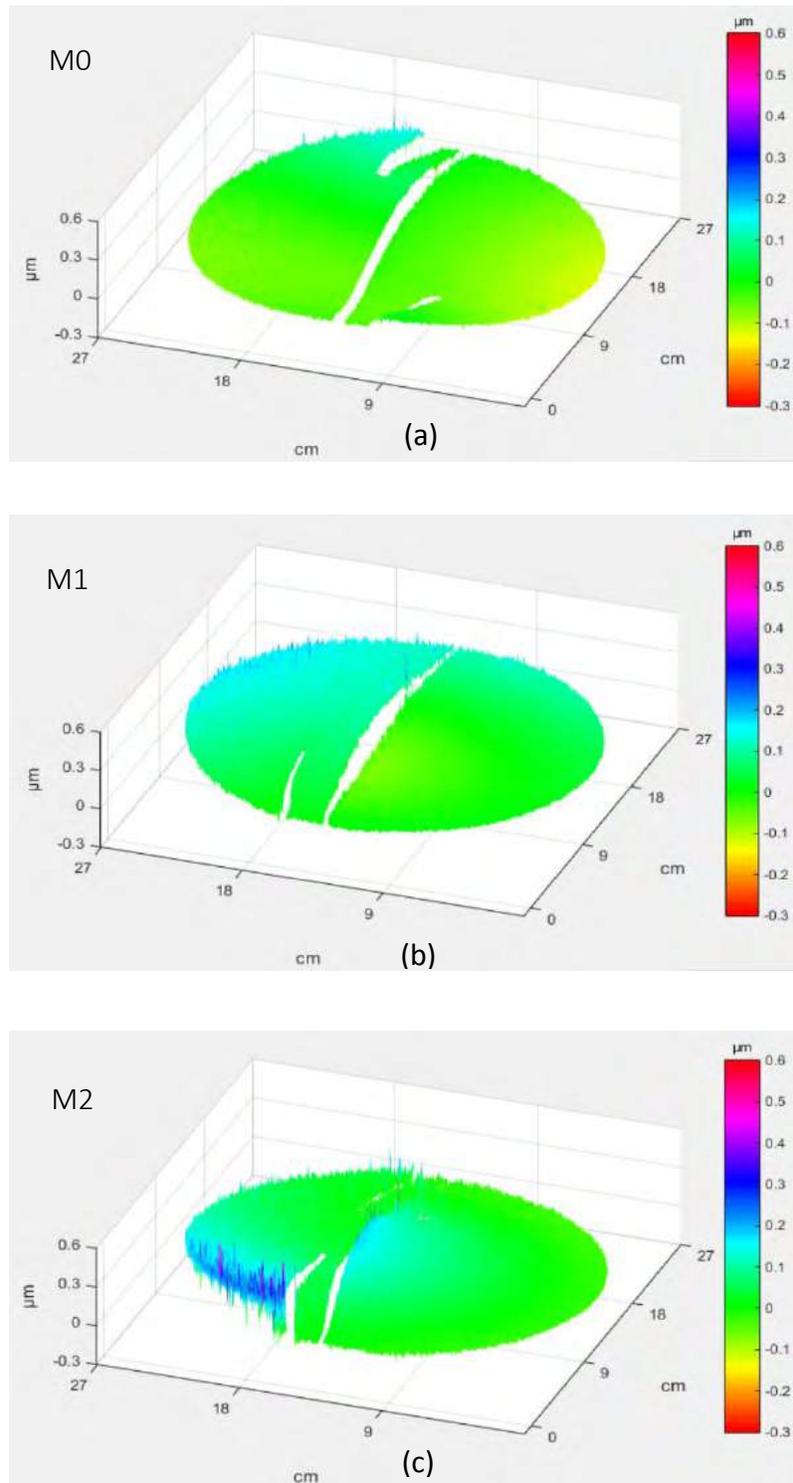


Figura 4. 22 Comparación pseudo 3D de los mapas de desplazamiento al generarse la fractura en (a) M0, (b) M1 y (c) M2 con un Δt de 0.769 ms.

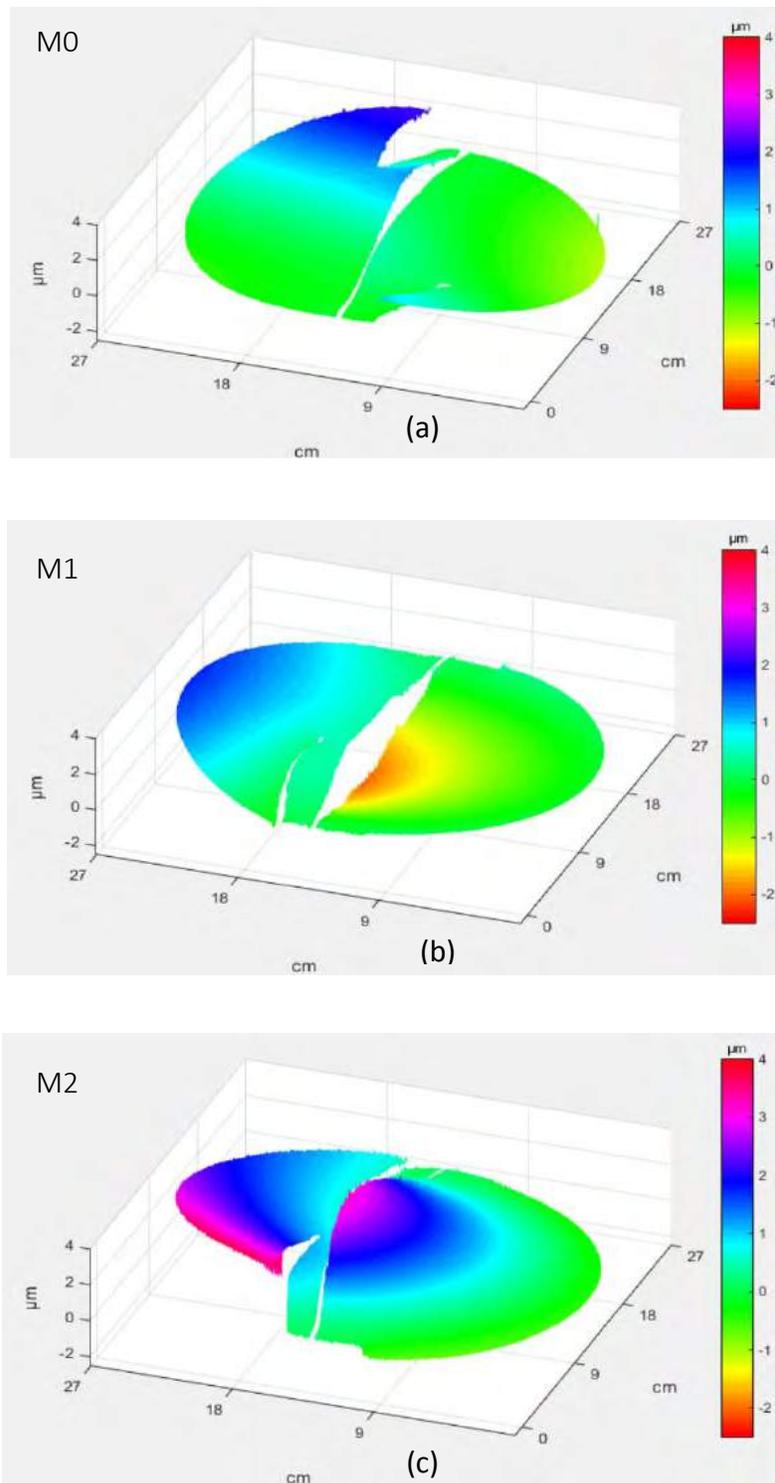


Figura 4. 23 Comparación pseudo 3D de los mapas de desplazamiento al generarse la fractura en (a) M0, (b) M1 y (c) M2 con un Δt de 12.31ms.

Capítulo V

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En el presente trabajo experimental se presentó un análisis de comportamiento mecánico para la formación y fractura de probetas de PMMA reforzadas con micro partículas de cobre (compuesto). Esto por medio de la técnica óptica no invasiva como es DHI en alta velocidad durante un ensayo con una máquina de compresión controlada y diseñada específicamente para usarla en este tipo de pruebas ópticas no destructivas.

El análisis realizado fue exhaustivo a fin de garantizar la repetibilidad de los ensayos y la recolección de datos fue extensa. Durante el desarrollo de las pruebas preliminares se tuvieron varios desafíos en la fabricación de las muestras y su estandarización para este ensayo, sin embargo, cada uno de ellos sirvió para reforzar y mejorar la representatividad de los resultados. En este documento debido al enorme volumen de datos recabados solo se mostró una parte de ellos a modo de representatividad y para evitar saturación.

De los resultados obtenidos se puede decir que:

- Fue posible obtener información del comportamiento mecánico temporal de un material compuesto (“bulk”), para detectar tanto la generación de grietas, así como su propagación y posterior fase de estabilización a la fractura.
- En los materiales compuestos la densidad del refuerzo de la matriz modifica las propiedades mecánicas del material bajo compresión, pero estos cambios son del orden de micras que solo son detectables con técnicas ópticas previo a la fractura.
- El análisis de los resultados ópticos no destructivos permite predecir el comportamiento mecánico en compresión que va a tener el material compuesto si esta carga aumenta o disminuye (conociendo la composición de material). Lo que permite estimar su composición/densidad relativa a un conjunto de probetas bajo las condiciones descritas.
- Para el caso de PMMA reforzado con micro partículas de cobre se observó una diferencia a medida que se aumentaba la densidad del refuerzo. Para el caso con menos partículas el *composite* se comporta como frágil ya que hay más presencia del PMMA lo que le permite que al ser comprimido se reacomode (propiedad del polímero) permitiendo que soporte una mayor carga, pero en el momento en que se genera una micro fractura (grieta), esta se propaga rápido ocasionando que el material tenga una fractura total. Por otro lado, al aumentar la densidad de partículas en el *composite* el material comienza a ser más dúctil por lo tanto la velocidad de propagación de la grieta disminuye, esto permitiría prevenir la falla del material al poder observar la micro fractura si esta no es inducida, aunque la carga máxima que soporta baja ya que el PMMA no tiene oportunidad de reacomodarse debido a la alta densidad de partículas en él.
- La forma seleccionada para las probetas, indica la zona en la que se genera la distribución de esfuerzos que es precisamente donde se inicia la grieta (disminuyendo el número de variables del experimento).
- Es posible emplear DHI en el área de caracterización de materiales compuestos para el estudio de propiedades micro mecánicas en *bulk* bajo las condiciones experimentales aquí descritas.

- En la actualidad los materiales nuevos, materiales compuestos avanzados son caracterizados de acuerdo a su composición (estructura molecular) y respuesta mediante pruebas mecánicas (principalmente destructivas). Actualmente en la caracterización de materiales dentro de la industria es muy utilizado el método de Hole Drilling para la medición de deformaciones debido a cargas externas o por esfuerzos residuales, pero tiene la desventaja que requiere el uso de galgas extensiométricas adheridas al material y por ello pueden influir en su respuesta mecánica además de que está limitado a estudiar secciones del material, a diferencia de este estudio que es de campo completo y no influye en el material

Se presentó un análisis de fractura en probetas de polímeros compuestos cuando se estandarizan sus parámetros geométricos. Esto permite hacer una proyección de la carga máxima que puede soportar una probeta antes de fallar. Esto último es de relevancia si se considera que el desarrollo de materiales compuestos avanzados es dinámico y el someterlos a pruebas microscópicas o de caracterización tradicional consume mucho tiempo y en ocasiones no es posible. En estos casos, este estudio es una propuesta para estimar de forma simple la densidad de un banco de muestras estandarizado y caracterizado, considerando la información de la carga de compresión con el patrón de franjas en la formación de la grieta. Esto se demostró en el capítulo 4 y puede ser aplicado a más probetas con distintos tipos de refuerzos en ellas.

Como trabajo a futuro es posible:

- Realizar un análisis más profundo de transitorio del material, a partir de las oscilaciones detectadas al estabilizarse la probeta con el fin de obtener el factor de amortiguamiento bajo las condiciones presentadas, para eso habría que realizar un mayor número de experimentos y posiblemente modificar alguna característica de la cámara rápida.
- Modificar el diseño de la máquina de compresión para poder realizar otro tipo de pruebas (tensión) y cambiar la celda de carga para incrementar el rango de fuerza que puede leer y con ello aumentar los materiales o espesores que se pueden estudiar
- Utilizar el *proof principle* de este estudio para estimar la densidad de materiales de un banco de muestras estandarizado y caracterizado
- Realizar un prototipo automatizado para monitorear en tiempo real el desplazamiento de algún material sometido a compresión o tensión con el objetivo de predecir cuándo fallará o a qué valor de carga puede ocurrir. Para esto se requerirá empatar la información óptica con modelos matemáticos que simulen la degradación del material en función temporal de la carga. Lo anterior ayudará a mejorar la productividad de una posible línea de producción al prevenir paros imprevistos por fractura de algún componente, o falla de algún elemento, además de ayudar a programar planes de mantenimiento, lo que reduce el tiempo y el costo de la reparación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. C. A. A. Islas, “Estudio de aleación de aluminio reforzada con materiales compuestos para reducción de peso en la industria automotriz,” Tesis, (2013).
- [2] J. Sanchez-Horneros, “La industria aeronáutica y los materiales compuestos,” Hispaviación, (2015).
- [3] Vishay Precision Group, Measurement of Residual Stresses, Notas técnicas, (2010)
- [4] J. F. Shackelford, Introduction to materials science for engineers. Harlow, Essex: Pearson Education Limited, (2016).
- [5] V. John, Introduction to engineering materials. Hampshire: Palgrave Macmillan, (2003).
- [6] D. R. Askeland, P. P. Fulay, and W. J. Wright, The science and engineering of materials. Stamford, CT: Cengage Learning, (2011).
- [7] C. & W. Ralls, Introduction to materials science and engineering. Taipei: Eurasia, (1977).
- [8] A S Virk, W Hall , J Summerscales , "Modulus and strength prediction for natural fibre composites," Materials Science and Technology , 28, 7 (2012).
- [9] C. C. Wilcox, M. S. Baker, "Finite element modeling and testing of a deformable carbon fiber reinforced polymer mirror," Appl. Opt. 51 (2015).
- [10] R. Garon ; P. N. Balaguru ; Y. Cao and K. Lee "Use of fiber-reinforced composites to improve the durability of bridge elements", Proc. SPIE 3988, Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, 440 (2000);
- [11] F. N. Cogswell, Thermoplastic Aromatic Polymer Composites, Technomic Publishing Co. Inc., (1999).
- [12] A. Moral and M. Noriega, “Materiales de última generación y materiales eficientes,” Etsag, (Jun 2007).
- [13] V. Fombuena, O. Fenollar, and N. Montañes, “Caracterización de materiales poliméricos,” Universitat politécnica de Valencia, (2016).
- [14] L. S. Fifield ; Yongsoon Shin and Kevin L. Simmons "Non-destructive evaluation of polyolefin thermal aging using infrared spectroscopy", Proc. SPIE 10169, Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2017, 101690U (April 19, 2017); doi:10.1117/12.2261983;
- [15] C. Mény "Nuclear magnetic resonance investigations of the structure and magnetic properties of metallic multilayers and nanocomposites", Proc. SPIE 7995, Seventh International Conference on Thin Film Physics and Applications, 79951R (February 17, 2011); doi:10.1117/12.888443;
- [16] R. Newman "Applications of x rays in art authentication: radiography, x-ray diffraction, and x-ray fluorescence", Proc. SPIE 3315, Scientific Detection of Fakery in Art, 31 (May 25, 1998); doi:10.1117/12.308590;
- [17] C. Rabke-Clemmer ; L. Wenzler and T. Beebe, Jr. "Scanning tunneling microscopy, atomic force microscopy, and surface analysis methods for the investigation of biomolecule structure at a solid surface", Proc. SPIE 1891, Advances in DNA Sequencing Technology, 38 (June 24, 1993); doi:10.1117/12.146717
- [18] F. Madrid, “Propiedades mecánicas y ensayos de los materiales,” rep., (2013).
- [19] P. Approach et al., “Testing Machines and Strain Sensors,” (1999).

- [20] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of materials*. Stamford. CT, usa.: Cengage Learning. (2009).
- [21] M. Lu, Y. Qu, Y. Lu, L. Ye, L. Zhou, and Z. Su, “Monitoring of surface-fatigue crack propagation in a welded steel angle structure using guided waves and principal component analysis,” *Third International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, (Feb. 2012) .
- [22] M. J. Anglada and Alcalá J., *Fractura de materiales*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, (2002).
- [23] J. M. A., P. Thomson, and J. M. C., “Monitoreo de Salud Estructural,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 2, no. 2, p. 40, (Jun. 2011).
- [24] D. Li and L. N. Y. Wong, “The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 46, no. 2, pp. 269–287, (2012).
- [25] Chen CS. Characterization of deformability, strength, and fracturing of anisotropic rocks using Brazilian tests. Ph.D. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Colorado, USA, (1996)
- [26] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry*, Cambridge University Press, (1983).
- [27] A. Beléndez, “Holografía: ciencia, arte y tecnología,” *Brasileira de Ensino de Física*, vol. 31, no. 1, Apr. (2009).
- [28] K. J. Gasvik, *Optical Metrology*, vol. C, no. July 1999. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, (2002).
- [29] M. De La Torre, “Laser speckle based digital optical methods in structural mechanics: A review,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 87, pp. 32–58, (2016).
- [30] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 72, no. 1, p. 156, Jan. (1982).
- [31] J. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Mc Graw Hill, Estados Unidos, (1968).
- [32] T. Kreis, *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 261-263, (2005).
- [33] C. Jonathan, B. Franze, P. Haible, and H. J. Tiziani, “Speckle interferometry with temporal phase evaluation for measuring large-object deformation,” *App. Opt.* 37, 2608-2614 (1998).
- [34] A. J. Moore, Duncan P. Hand, Jim S. Barton, Julian D. C. Jones, “Transient deformation measurement with electronic speckle pattern interferometry and a high-speed camera,” *App. Opt.* 38, 1159-1162 (1999).
- [35] A. Davila, J. M. Huntley, G. H. Kaufmann, D. Kerr, “High-speed dynamic speckle interferometry: phase errors due to intensity, velocity, and speckle decorrelation,” *App. Opt.* 44, 3954-3962 (2005).
- [36] J. M. Uribe, “Prototipo de una máquina de ensayo en compresión para el estudio mecánico de probetas por medio de interferometría holográfica digital,” tesis, León, Guanajuato, México (2017).

ANEXO A

Manual de usuario de la máquina de compresión



Las características de la máquina son:

- Fuerza máxima aplicada de 300 lb-f que puede ser aplicada de forma lineal y con una tasa mínima 0.5 lb-f/s y máxima de 2 lb-f/s.
- Resolución en la lectura de la fuerza $\sim 0,2$ lb-f.
- Consumo de energía de la máquina 70 mW/h
- Peso de ~ 3 Kg sin el sistema eléctrico y electrónico

El control se encuentra dentro de una caja de acrílico, esta cuenta con 3 leds que indican el estado de la máquina: Up, Down y Overload. Este último se activa como un indicador de proximidad hacia la fuerza máxima.

El control principal de la maquina se realiza utilizando el *LaunchPad* MSP430 de NI con comunicación USB, por lo que es necesario contar con los drivers del microcontrolador (estos se encuentran en la carpeta DriverLaunchpad) la manera de instalarlos es conectando la tarjeta a la computadora y desde el administrador de dispositivos dar click en actualizar controlador ← y seleccionar el archivo correspondiente.

No es necesario contar con el software con el que fue programado (Code Composer Studio) pero de ser necesario para alguna modificación el ejecutable se encuentra en la carpeta CCS.

Una vez instalados los drivers en el administrador de dispositivos, aparecerán dos puertos COM (figura 1). El llamado MSP Debug Interface se utiliza para depurar el programa del LaunchPad, el UART es el puerto que se utiliza para correr el programa, para nuestro caso es el COM3.

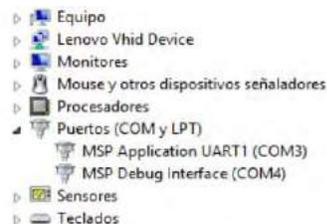


Figura anexo 1 Puertos COM del administrador de dispositivos

En MATLAB se realizaron 8 programas de los cuales 6 son funciones que se mandan llamar en 2 programas principales (Test 0 y Test 1). Antes de abrir MATLAB debe de estar conectada la tarjeta y antes de correr algún código se debe revisar que, el puerto serial del COM UART1 al que se conectó nuestra tarjeta sea el mismo que el que manda llamar MATLAB. Para ello abrimos la función *Openport.m*, y en la tercera línea revisamos que coincida con el señalado en el administrador de dispositivos, de no ser el mismo se modifica el número de COM y se guarda (figura 2).

```

OpenPort.m x Test0.m x Test2.m x MCTM_01_08_2016.m x +
function objectPort=OpenPort ()
-
- S=serial('COM3');
- assignin('base','Serial',S)
- set(S,'BaudRate',9600);
- set(S,'inputbuffersize',5);%tamaño del buffer de entrada
- fopen(S);
- objectPort=S;
- end

```

Figura anexo 2 Función Open Port

La celda de carga no siempre detecta lo mismo ya que la temperatura a la que se encuentra la maquina modifica ligeramente este valor. Para verificar que tanto afecta podemos correr el test 0 (figura 3) sin ningún objeto prensado para obtener una carga de 0, este programa solo mueve el motor “n número de veces” de acuerdo al valor del *for*, y muestra la lectura de la celda de carga en el *Command Window*.

```

2 - objectPort=OpenPort ();
3 - PWM=22000
4 - DIR='Down'
5 - for j=1:1
6 - Force=ReadForce (objectPort)
7 - MoveMotor (objectPort, PWM, DIR) ;
8 - end
9 - ClosePort (objectPort)

```

Figura anexo 3 Código del Test 0

Ejemplo, al correr el programa sin carga, el valor que se espera obtener es 0 ya que no hay nada que ejerza presión sobre la celda de carga, pero este no siempre es el caso y se puede observar en la figura 4

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> Test0

Force =

    0.3909

```

Figura anexo 4 Ejemplo del valor leído por la celda de carga

Para corregir este factor abrimos la función *ReadForce*, en la línea 29 se encuentra una ecuación con los valores de corrección (figura 5), el segundo valor es el que podemos modificar.

De acuerdo a lo obtenido anteriormente si tenemos una fuerza de 0.3909 es porque el valor de corrección es alto así que hacemos una resta tomando el valor que se encuentre en el programa, en este caso es $0.7533-0.3909= 0.3634$ y colocamos ese como el nuevo valor de corrección.

```

else if size(RX_num1,2)>4
    %LecFuerza=1+LecFuerza;
    RADCFiltrado=(RX_num1(1,5)*256)+RX_num1(1,4);
    RADCFiltrado=RADCFiltrado/9;
    ADCFiltrado=round(RADCFiltrado*2.5/4096,4);
    F=ADCFiltrado/((1+(50000/R))*pendiente);
    F=(F-11.3+0.7533)*0.9688;

```



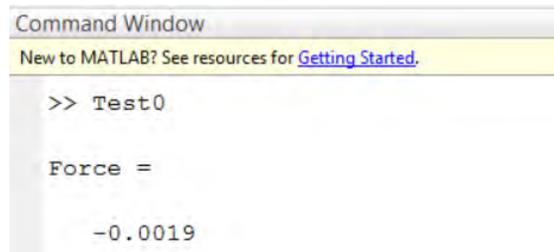
```

F=(F-11.3+0.3630)*0.9688;

```

Figura anexo 5 Sección de código de la función ReadForce

Corremos nuevamente y observamos que el valor se acerca más a 0 (figura 6), no vamos a conseguir que la celda de carga lea precisamente 0lb-F por que las condiciones a las que se encuentra la celda de carga y los componentes electrónicos utilizados no son exactamente constantes, pero se debe aproximar mucho.



```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> Test0

Force =

    -0.0019

```

Figura anexo 6 Resultado al correr el programa con el valor corregido

hasta aquí no hay más configuraciones previas a utilizar uno de los dos Test.

TEST 0 MANUAL

```

objectPort =OpenPort ();
PWM=22000
DIR='Down'
    for j=1:1
        Force=ReadForce(objectPort)
        MoveMotor (objectPort, PWM, DIR);
    end
ClosePort(objectPort)

```

Este es el programa más básico. Esencialmente se puede utilizar para subir o bajar la cruceta al par máximo del motor (PWM = 22000), en este caso el par del motor será constante pero la carga aplicada no, es un control manual simple de up y down.

- El sentido de la cruceta se determina con las palabras **Down** y **Up** tal cual como están escritas.
- El valor del PWM máximo es 22000 pero es posible modificarlo en la segunda línea del código.

TEST 1 AUTOMATICO (nota: para usar este código la fuerza inicial debe ser positiva de no ser así saldrá un error, para volver la fuerza positiva se puede utilizar el test0 y presar la muestra a estudiar)

Este programa es más complejo, aquí podemos decirle a la máquina hasta que fuerza queremos comprimir. Para ello es necesario asignar dicho valor a la variable referencia, este es el único parámetro que necesitamos introducir al código.

Posiblemente al aplicar la fuerza no se tenga una pendiente constante, ya que dependerá del material que se quiera comprimir. Pero para corregirlo se simplemente un control *FUZZY* donde se utilizan los triángulos mostrados en la figura 7, esto ayuda a calcular el PWM necesario para tener una rampa con la misma pendiente de **lb-f vs Iteraciones**.

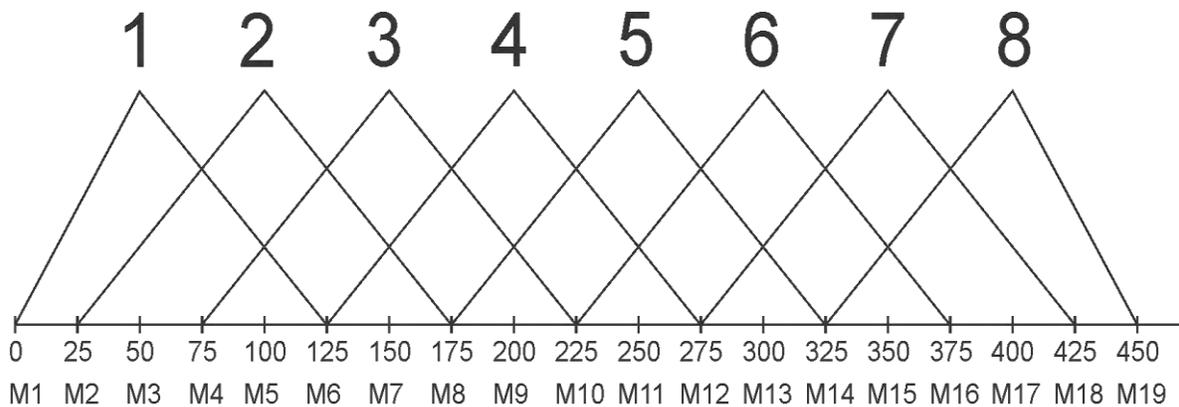


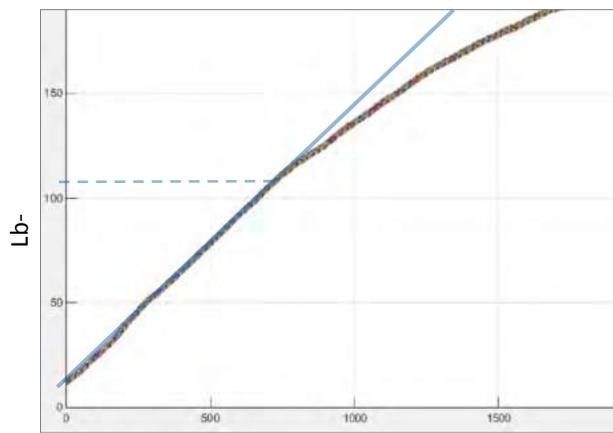
Figura anexo 7 Triángulos para un control Fuzzy

Lo referente a este control se observa en el test 2 en la segunda sección del código y es el vector llamado Reglas, cada posición del vector corresponde a un valor de PWM asignado a cada triángulo

$$\text{Reglas} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 10000 & 14000 & 16000 & 19500 & 21000 & 21800 & 22000 & 22500 \end{bmatrix}$$

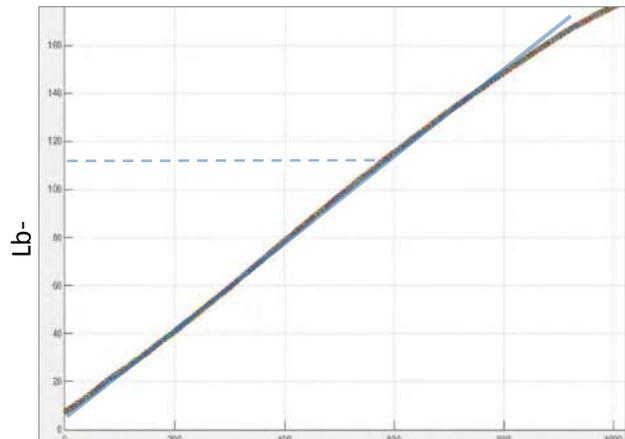
El PWM que se utilice va a depender de la lectura de la celda de carga, los valores del vector se pueden modificar con el objetivo de incrementar o reducir la pendiente, esto se hace aumentando o bajando los valores del vector.

Ejemplo. Si se tuviese la figura 8 (a) como grafica de respuesta se necesitaría elevar la pendiente a partir de las 110 libras, esto quiere decir que se necesita que se aplique más carga por lo tanto se requiere que la cruceta baje más rápido, para ello se necesita elevar el PWM (es decir aumentar el tiempo de energización del motor).



Iteraciones

(a)



Iteraciones

(b)

Figura anexo 8 Pendientes con regla 1 (a) y regla 2 (b)

Para saber cómo aumentar el PWM se utilizan los triángulos (figura 7)

Los valores que se encuentran debajo de los triángulos se refieren a las libras (la celda de carga llega a medir sin errores aproximadamente 330lb-f). Si trazamos una línea vertical a un valor de carga esta cruzara con una o más pendientes que forman un triángulo, el valor de estas pendientes modificarán el valor del PWM.

Retomando la gráfica que se quiere corregir trazamos una línea perpendicular a la fuerza de 110lb, el valor del PWM será afectado por 3 pendientes 1,2,3 (figura 9).

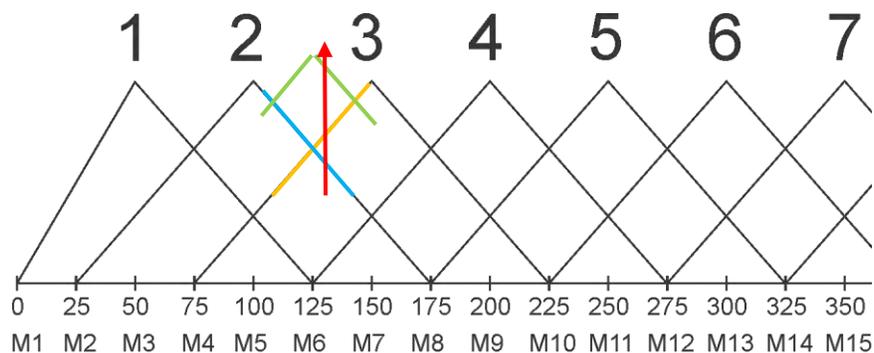


Figura anexo 9 Observación de las pendientes que afectan la posición de 110 lb

Cada rampa tiene diferente aporte al PWM, en este caso la rampa con mayor peso es la numero 2 después la 3 y por último la 1, pero ojo que si aumenta el factor de la rampa 2 vamos a elevar también la pendiente antes de las 110lb y eso no es lo que se busca, la mejor opción es elevar el factor de la pendiente 3 que es el que apenas comenzó a tener efecto.

De:

Reglas = [10000 14000 16000 19500 21000 21800 22000 22500]

a:

Reglas = [10000 14000 18000 19500 21000 21800 22000 22500]

Regresando a la figura 8 (b) se puede observar el cambio al incrementar el valor de la regla, aun la pendiente no es constante ya que a partir de las 150lb esta comienza a bajar de nuevo, para mejorarlo nuevamente posicionamos las 150lb en los triángulos, ahí la regla 4 comienza a entrar así que posiblemente sea la posición más adecuada para modificar.

Esto se realiza hasta obtener la mejor pendiente de acuerdo al material que se comprimirá. Las pendientes de cada triangulo se calculan con la función *entrada_8 niveles* donde (x) es la fuerza medida, ya con esos datos de las pendientes y de las reglas se obtiene el PWM asignado a cada iteración.

Retomando el resultado del test 2, una vez que se llegó a la carga deseada se arroja una gráfica (figura 10) de:

- línea azul: libras fuerza (y) contra el tiempo que tardó en llegar a dicha carga (X)
- línea roja: error factorizado

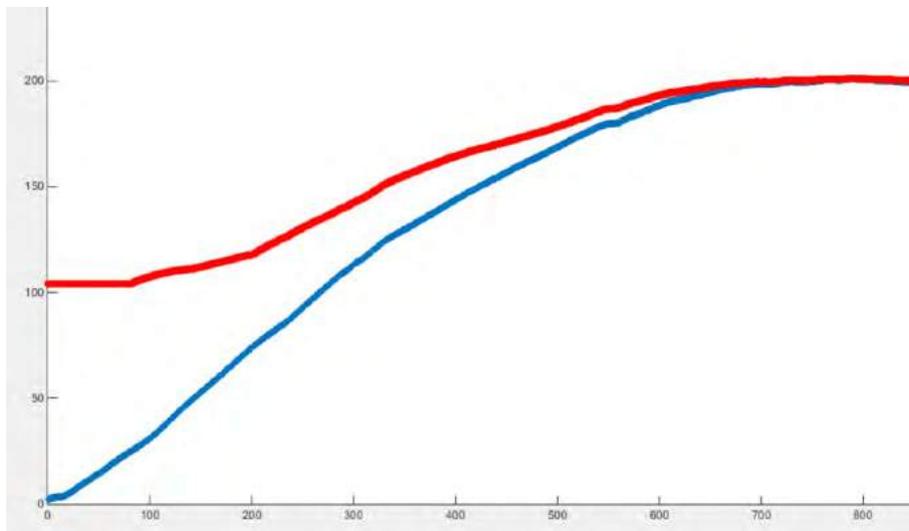


Figura anexo 10 Gráfica resultante de la compresión utilizando el Test 1

Esta grafica es posible guardarla como .fig y conservar los valores. Una vez ya se obtuvo una pendiente constante, será posible utilizar ambos Test para bajar y subir la cruceta ya sea de manera manual (test 0) o bien de manera automática (test 1) para realizar ensayos controlados y repetibles. Al terminar de utilizar la máquina de compresión es recomendable dejarla la celda de carga libre, es decir sin nada dentro de la máquina.

NOTA: Si por alguna razón el puerto COM no se cerró ya sea porque se abortó el programa u otra razón, y se quiere volver a usar alguno de los test, MATLAB arrojará un error acerca de que el puerto está en uso, y será necesario escribir la función *ClosePort(ObjetPort)* en el *command window* o bien desconectar la tarjeta y reiniciar MATLAB.

ANEXO B

Solución de falla de temperatura en la máquina de termoformado

Al realizar los ensayos de las 27 muestras y observar un cambio en el comportamiento, se decidió fabricar un nuevo banco de probetas las cuales comenzaba a salir con zonas blanquizcas como se muestran en la figura 11, de acuerdo con el manual de la montadora esto sucede con los polímeros y se debe a la falta de tiempo en el calentado, o bien a seleccionar una temperatura menor a la requerida para el termoformado.



Figura anexo 11 Probeta de compuesto con falla en la parte superior

Ya que los tiempos de termoformado no se habían modificado desde su selección, lo más probable era que la maquina no estuviese calentando como debía, y esto se podía deber a que las resistencias que utilizaban estuvieran quemadas, o bien que los termopares utilizados para censar la temperatura estuviesen averiados. Por este motivo se decidió abrir la máquina (figura 12) y revisar primero la resistencia utilizando un multímetro de las resistencias, al realizar esto comprobó que 3 de las 5 que utilizaba la maquina estaban quemadas y esta era la razón por la que las probetas en unas zonas salían blancas y por qué al comprimir las caían en pedazos después de la fractura. Esta también puede ser la razón por la cual en algunas de las probetas se modificará la fuerza máxima soportada al ser comprimidas

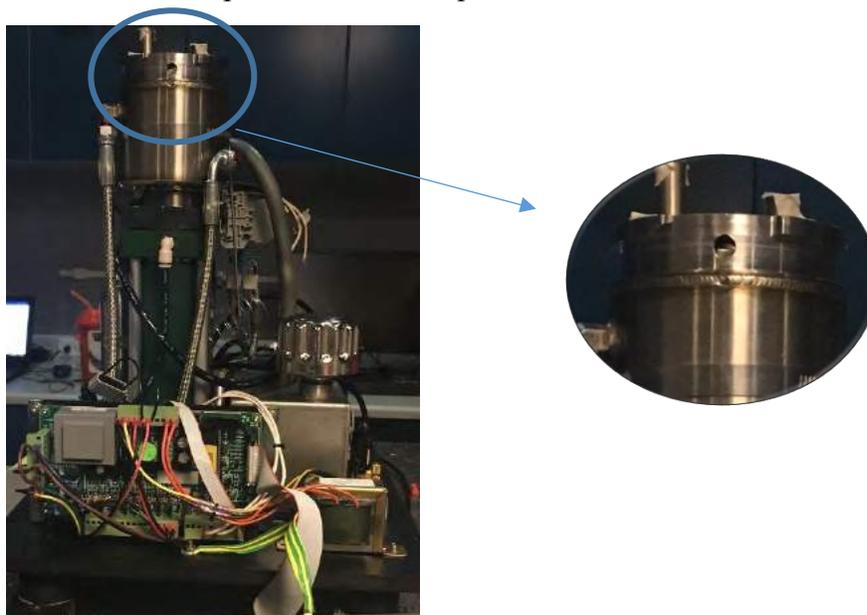


Figura anexo 12 Maquina montadora abierta. La zona marcada es la cámara donde se inserta el material y se fabrican las probetas mediante montaje por compresión en caliente

Se mandaron a fabricar 5 resistencias con la empresa Backer Alpe de acuerdo a las características marcadas en las resistencias dañadas (figura 13) y se remplazaron todas, una vez colocadas se realizaron varias probetas para verificar su funcionamiento, efectivamente las resistencias ya calentaban todo el molde sin embargo se tardaban un poco más en llegar a la temperatura indicada puesto que el valor de la resistencia era doble al de las resistencias originales, esto no afectó ya que solo fue necesario aumentar el tiempo de calentado para que la máquina trabajara en condiciones óptimas.

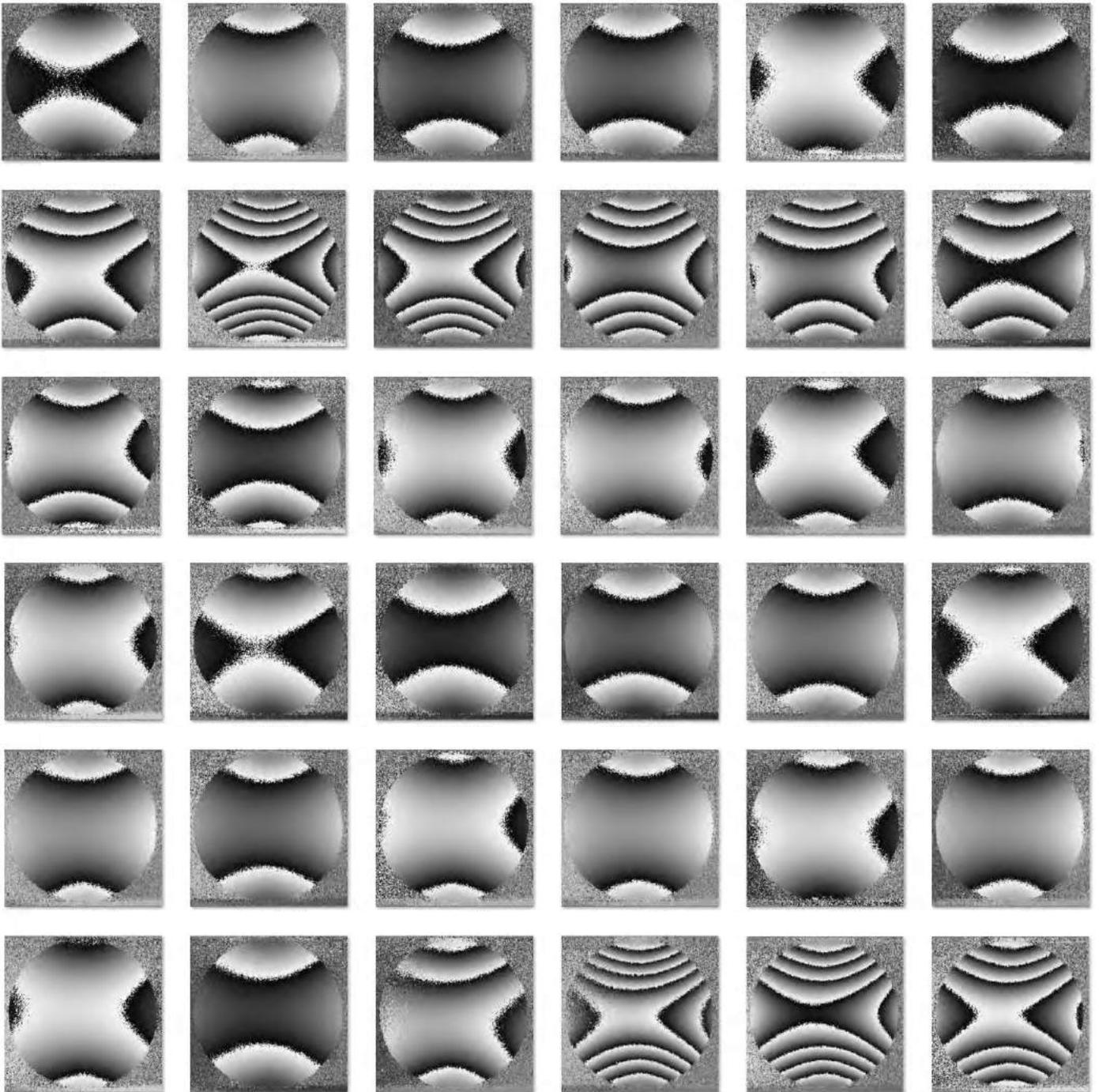


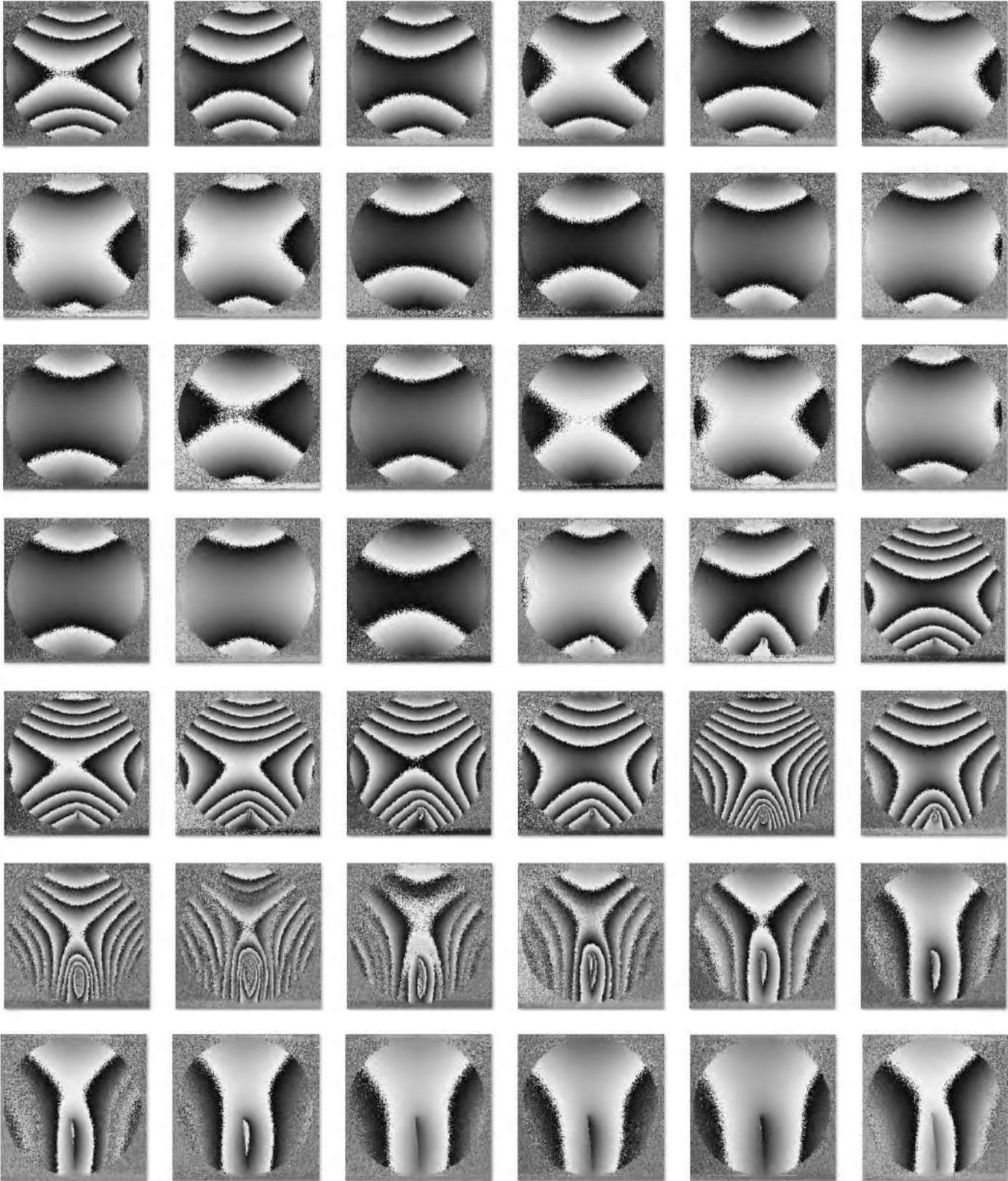
Figura anexo 13 Resistencias utilizadas para calentar el molde de termoformado

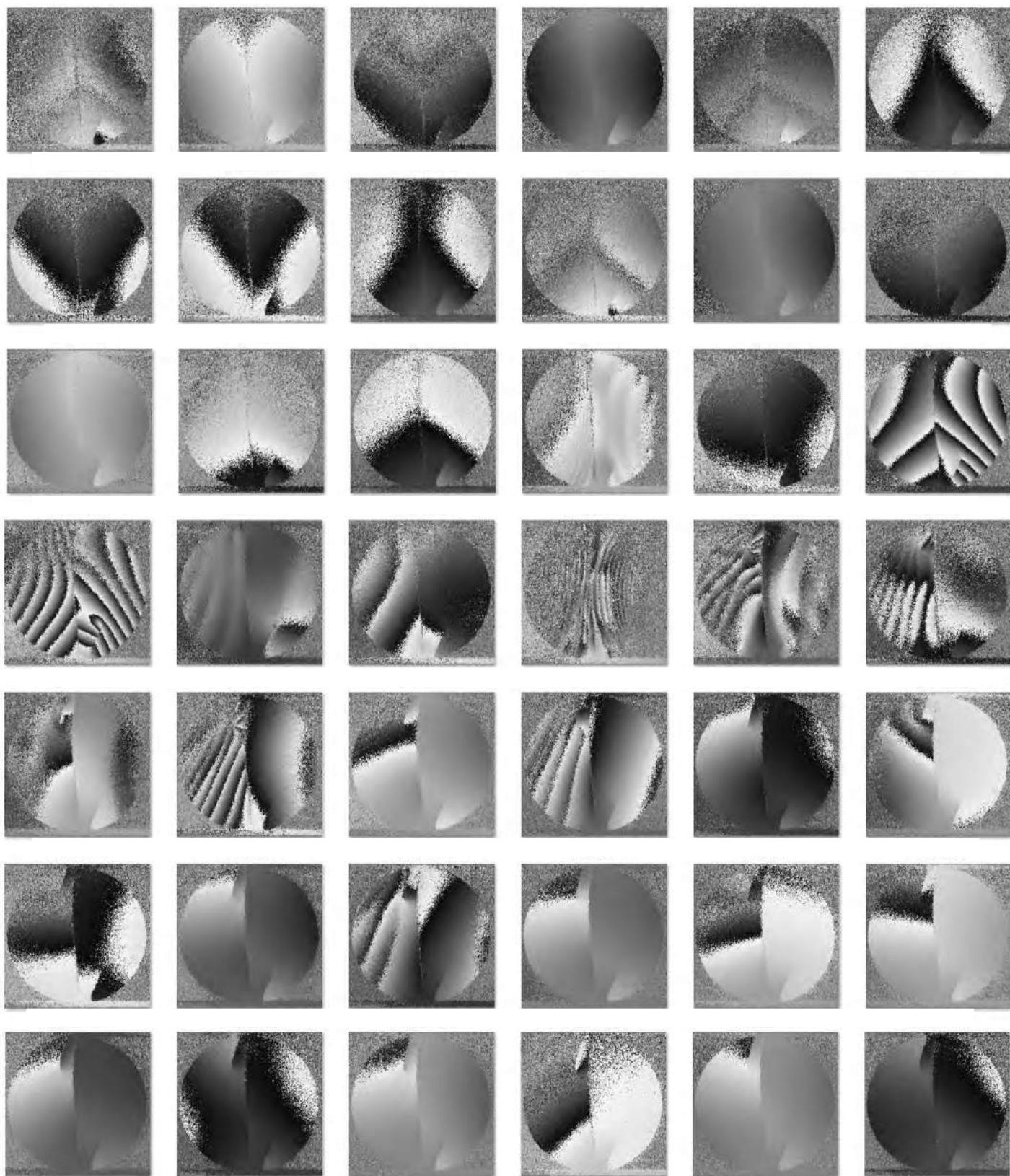
Nuevamente se realizaron varios ensayos para comprobar el funcionamiento de la máquina con los nuevos tiempos de calentado y que los datos que se habían obtenido para los 3 tipos de muestras en cuanto a su fuerza máxima y precarga no hubiesen sido alterados. Una vez comprobado esto se procedió a fabricar un nuevo banco de muestras para obtener los resultados finales sin la necesidad de volver a caracterizar la fuerza aplicada y la sincronización de la cámara-máquina de compresión.

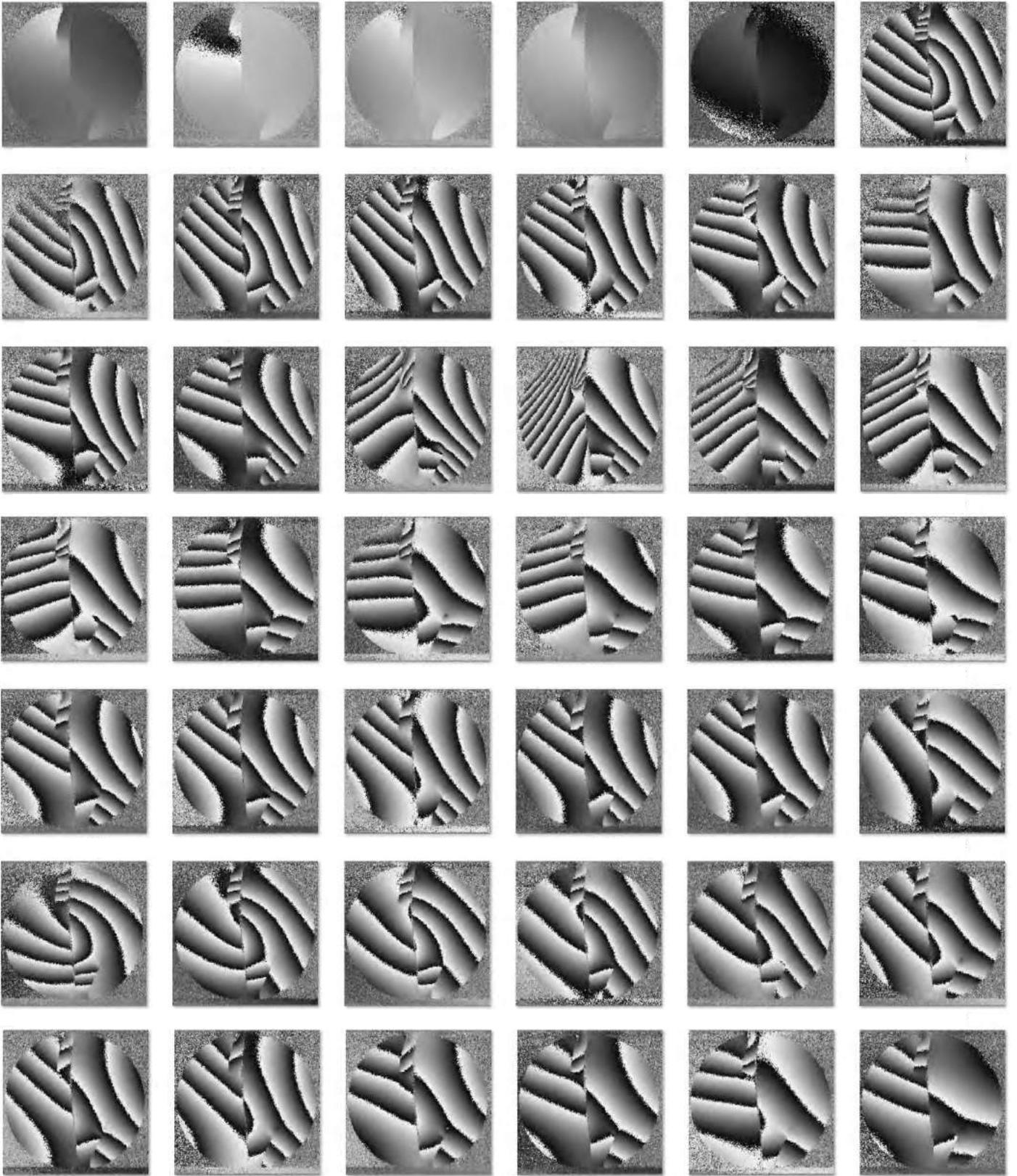
ANEXO C

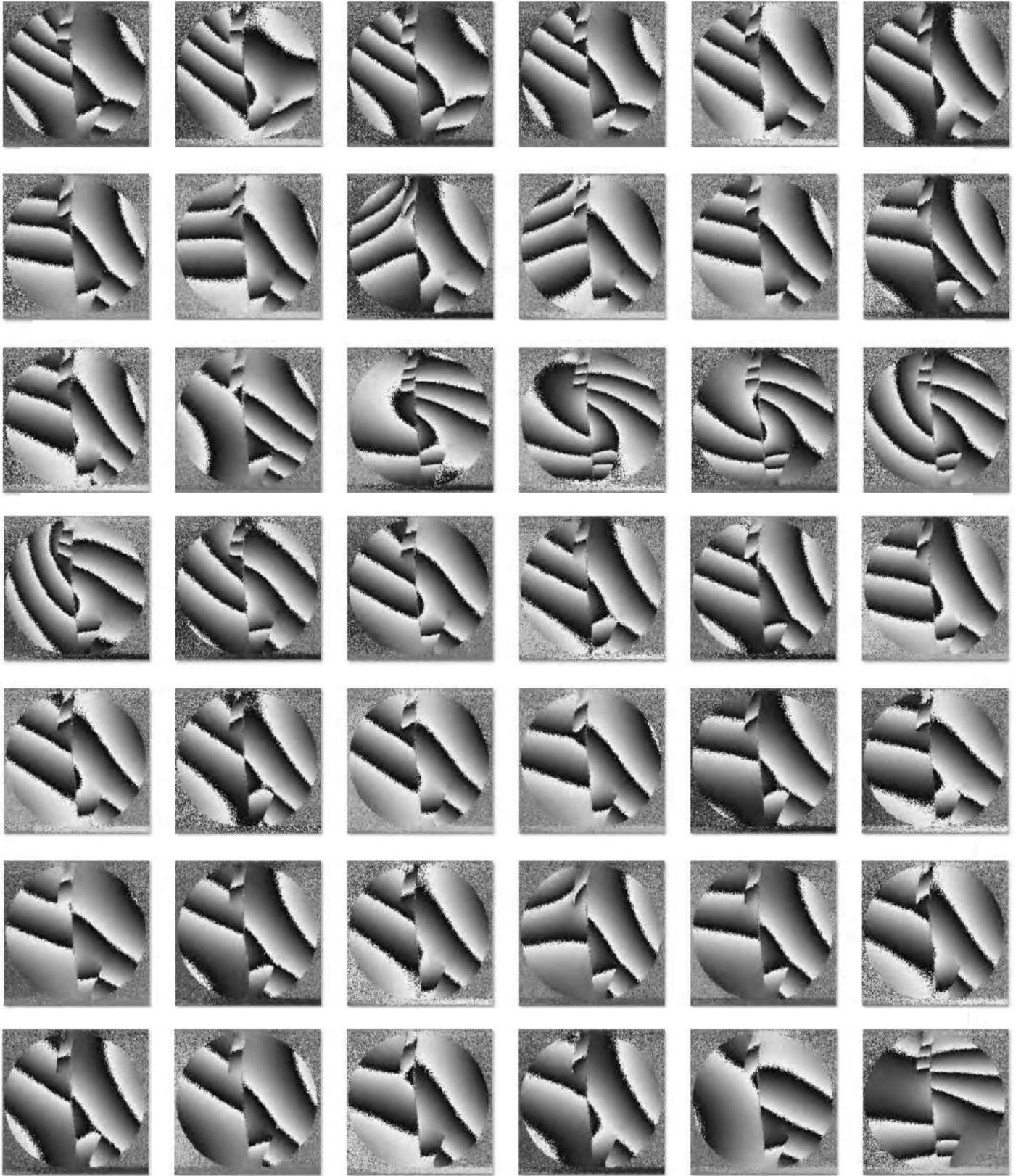
La siguiente secuencia de imágenes de fase envuelta se encuentran en un rango de 2.3 segundos con un $\Delta t = 8.459\mu s$ que equivale a 11 hologramas antes de la fractura y después de la estabilización a la fractura, y con un $\Delta t = 0.769\mu s$ que equivale a correlacionar imágenes consecutivas en el transitorio y en la propagación de la grieta.











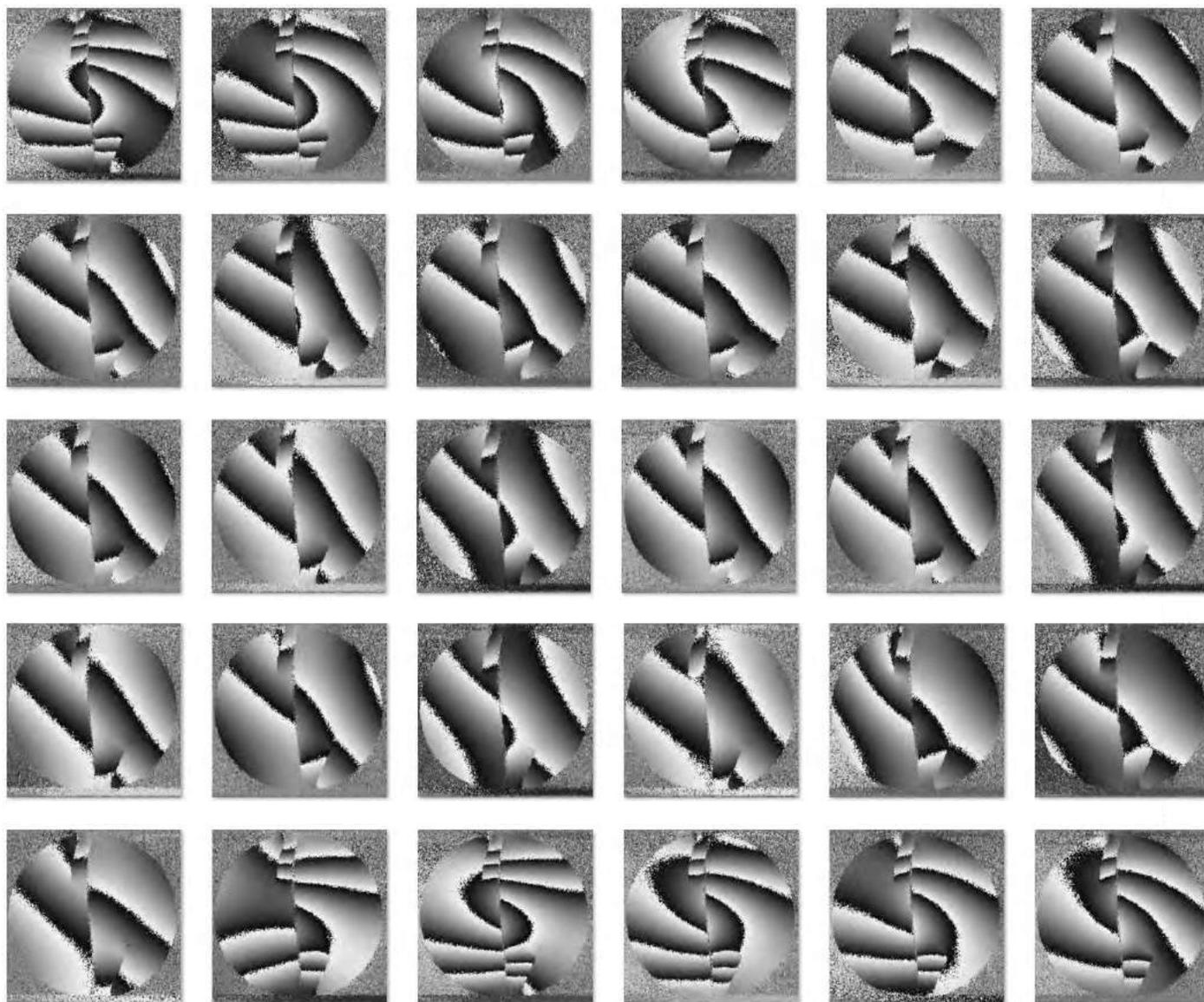


Figura anexo 14 Imagen secuencia temporal de mapas de fase envuelta durante una prueba de compresión