



# **Prototipo de una máquina de ensayo en compresión para el estudio mecánico de probetas por medio de interferometría holográfica digital.**



*Como requisito para obtener el grado de:*

*Maestría en Optomecatrónica*

*Asesor:*

*Dr. Manuel Humberto De la Torre Ibarra*

*Estudiante:*

*Ing. Jorge Mario Uribe Martínez*

*Enero de 2017*

*León, Guanajuato, México*

## Resumen

El estudio mecánico de un material permite determinar parámetros como su límite elástico, resistencia a la ruptura, relación deformación / esfuerzo, entre otros, los cuales sirven para entender y/o predecir su comportamiento cuando está sometido a una fuerza externa o dentro de un sistema compuesto. Un ejemplo de herramientas para esta caracterización sería una máquina de ensayos, que puede aplicar distintos tipos de pruebas como son: compresión, tensión y torsión de forma controlada. Estas pruebas generan una gran cantidad de información por lo que existe el interés de poder diseñar, construir y calibrar una máquina *ad-hoc* para pruebas ópticas no destructivas que sea capaz de aplicar una fuerza de compresión controlada.

En el diseño de la máquina se consideraron tres ejes de desarrollo fundamentales: mecánico, electrónico y software (control). En el primero de ellos se tomó en cuenta la fuerza requerida (300 lb-f), el tamaño y peso de la máquina. El desarrollo electrónico tiene como parte central un microcontrolador que se encarga de recibir instrucciones y enviar datos de la fuerza aplicada a la computadora. En el último eje se implementó un algoritmo encargado de controlar la máquina (detener, subir, bajar entre otras acciones), visualizar la fuerza aplicada en la probeta y controlar la velocidad del motor.

Para validar el funcionamiento de la máquina y verificar la repetitividad de la fuerza aplicada, se cuantificó la deformación en probetas de aluminio 6061 que contaban con galgas extensiométricas adheridas. Esto se realizó para medir con una técnica estandarizada de pruebas mecánicas como son las galgas. Además se utilizó la técnica de interferometría holográfica digital para caracterizar los transitorios de alta velocidad que sufre la máquina por el movimiento del motor y correlacionar esta información óptica con la mecánica (galgas).

## **Dedicatoria.**

A esa gran persona que siempre está a mi lado en los momentos buenos y malos de mi vida, a quien sin pensar, deja todo de lado para estar junto a mí, y a la cual doy mi vida, para mi amiga y esposa Leidy Johana Quintero.

## **Agradecimientos.**

Agradezco a Dios y a mi familia. A mi padre Jesus Derlhy Uribe por sus enseñanzas y su energía cósmica. A mi madre Rosa Enelia Martínez por su esfuerzo y dedicación para mí y mis hermanos: Juan Diego, Julián Andrés e Isabel Cristina, los cuales siempre están ahí para ayudarme, los quiero mucho. A la familia Martínez Echeverry (mi segundo hogar), su apoyo siempre fue incondicional.

A todo el pueblo mexicano y al CONACYT por haberme apoyado en mis estudios acá en México.

A mi director de tesis, el Doctor Manuel Humberto De la Torre Ibarra por toda la enseñanza, apoyo y paciencia que tuvo hacia a mi durante el desarrollo de esta tesis.

Al Doctor Francisco Javier Casillas Rodríguez, de la Universidad de Guadalajara campus Lagos de Moreno, por su ayuda en el desarrollo de este trabajo.

A todo el grupo de metrología óptica del centro de investigaciones en óptica, el cual está dirigido por el Doctor Fernando Mendoza.

A mis compañeros del grupo de investigación, Daniel, Fernanda, Oswaldo, Dayali, Rodrigo, Ernesto, Araceli y en especial a Cesar Giovanni Tavera por su disposición para ayudarme. A mis compañeros de generación Leidy Johana Quintero, Carlos Zamarripa, José Luis Reynoso y Francisco Javier Vargas.

A todo el personal del Centro de Investigaciones en Óptica, al personal del taller mecánico, Luis, Marcos y José de Jesús, por sus asesorías sobre maquinado de piezas, por último, quiero agradecer especialmente a la señorita Ángeles Sánchez Rodríguez, quien siempre me dio ánimo para seguir adelante, y nunca dejó que mi esposa y yo sintiéramos la ausencia de nuestros hogares. Señorita Ángeles mil gracias.

# Tabla de contenido

CAPITULO I.....	1
1 Introducción.....	1
CAPITULO II .....	5
2 Conceptos básicos.....	5
2.1 Ensayo de materiales.....	5
2.1.1 Ensayos mecánicos.....	6
2.1.2 Ensayos no destructivos.....	8
2.1.3 Máquina universal de pruebas mecánicas.....	12
2.2 Deformación y esfuerzo unitarios.....	14
2.3 Galgas extensiométricas.....	19
2.3.1 Fundamento: efecto piezo-resistivo.....	20
2.3.2 Tipos y tamaños de las galgas extensiométricas.....	22
2.3.3 Circuitos de medida para las galgas extensiométricas.....	24
2.4 Interferometría.....	26
2.4.1 Holografía.....	26
2.4.2 Interferometría Holográfica Digital.....	29
CAPITULO III.....	37
3 Desarrollo experimental.....	37
3.1 Diseño mecánico.....	37
3.1.1 Marco estructural.....	38
3.1.2 Sistemas de engranes y transferencia de fuerza.....	38
3.1.3 Análisis de la fuerza de compresión (fuerza axial) y selección del motor DC.....	40
3.2 Diseño Electrónico.....	44
3.2.1 Acondicionamiento de la señal en la celda de carga.....	45
3.2.2 El microcontrolador.....	53
3.2.3 Controlador de potencia para el motor DC.....	55

3.2.4	Fuente de voltajes.....	57
3.2.5	Circuitos impresos (Printer Circuit Board, PCB). .....	60
3.3	Algoritmos de control.....	63
3.3.1	Algoritmo para el microcontrolador. ....	64
3.3.2	Algoritmo para la interfaz gráfica.....	66
3.4	Protección de los circuitos impresos. ....	68
CAPITULO IV .....		69
4	Pruebas y Resultados.....	69
4.1	Pruebas de funcionamiento del prototipo de máquina de ensayo en compresión. ....	69
4.1.1	Calibración de la celda de carga. ....	69
4.1.2	Comportamiento en lazo abierto del prototipo. ....	72
4.1.3	Primeras pruebas de la medición del desplazamiento relativo con DHI. ....	73
4.2	Pruebas de repetitividad.....	77
4.2.1	Con galga extensiométrica.....	77
4.2.2	Probetas.....	78
4.2.3	Metodología de la Prueba. ....	79
4.3	Medición del desplazamiento relativo utilizando DHI. ....	87
4.3.1	Mediciones con DHI de baja velocidad.....	88
4.3.2	Mediciones con DHI de alta velocidad.....	92
CAPITULO V .....		97
5	Discusión y conclusiones.....	97
CAPITULO VI.....		99

# Lista de figuras

<i>Figura 1: Una probeta cilíndrica sometida (a) a un ensayo de tensión y (b) la comparación entre el estado inicial (abajo) y final (arriba).</i>	7
<i>Figura 2: Una probeta de concreto (a) sometida a un ensayo de compresión, (b) probeta después de la prueba.</i>	7
<i>Figura 3: Probeta de metal sometida a un ensayo de flexión.</i>	8
<i>Figura 4: Método para realizar un ensayo por rayos X. (a) Probeta sometida a una fuente de radiación X. (b) película sensible revelada y detección de la imperfección.</i>	9
<i>Figura 5: Ensayo por ultrasonido.</i>	10
<i>Figura 6: Ensayo Electromagnético (Prueba de corrientes de Eddy). (a) Acercamiento del campo magnético a la superficie, (b) medida de la impedancia cuando no hay un defecto y (c) cambio de la impedancia debido a un defecto.</i>	11
<i>Figura 7. Interferometría por patrones de moteado (ESPI).</i>	11
<i>Figura 8: Estructura básica de una máquina universal.</i>	12
<i>Figura 9: Diagrama esfuerzo (<math>\sigma</math>)-deformación (<math>\varepsilon</math>) unitarios.</i>	13
<i>Figura 10. Fuerza aplicada axialmente.</i>	15
<i>Figura 11. Estiramiento debido a una fuerza aplicada axialmente.</i>	16
<i>Figura 12. Deformación de una placa rectangular.</i>	17
<i>Figura 13: Galgas extensiométricas(a) para medición en un solo eje y (b) para la medición en 3 direcciones.</i>	19
<i>Figura 14. Tres diferentes configuraciones de puente de Wheatstone.</i>	24
<i>Figura 15: Indicador y registrador de esfuerzo modelo P3.</i>	25
<i>Figura 16. Medición de la deformación de una placa de aluminio utilizando el indicador y registrador de esfuerzos modelo P3: (a) Tablero indicador de esfuerzo y (b) ajuste del offset y conexiones.</i>	25
<i>Figura 17: Arreglo óptico para (a) realizar y (b) reconstruir un holograma. Las siglas corresponden a: E espejo, D divisor de haz, LD lente difusor.</i>	27
<i>Figura 18: Interferómetro fuera de plano. Las siglas corresponden a: (L) lente, (FO) fibra óptica, (P) pupila, D divisor de haz.</i>	31
<i>Figura 19: Desplazamiento de los lóbulos debido a la portadora, a) ubicación de los lóbulos para una posición inicial y b) desplazamiento de los lóbulos.</i>	32
<i>Figura 20. (a) Transformada de Fourier para una función <math>f(x)</math> y (b) transformada de Fourier aplicando la propiedad de desplazamiento en la frecuencia.</i>	34
<i>Figura 21: Procesamiento digital de los hologramas para obtener las franjas de interferencia y la fase óptica envuelta.</i>	35
<i>Figura 22: Diseño del marco estructural para el prototipo.</i>	38
<i>Figura 23: Engranajes de (a) 60 dientes, (b) 36 dientes de alta resistencia, y (c) modificación de los engranes para la impresión 3D.</i>	39
<i>Figura 24: vista en (a) perspectiva y (b) lateral del soporte de los engranes de 60 dientes, vista en (c) perspectiva y (d) lateral del soporte para el engrane de 30 dientes.</i>	40
<i>Figura 25: Relación de fuerzas entre dos engranes.</i>	41
<i>Figura 26: Fuerza axial producida por el torque T2.</i>	42
<i>Figura 27. Diseño completo del prototipo.</i>	44
<i>Figura 28: Diagrama de bloques para el diseño electrónico del prototipo.</i>	45
<i>Figura 29: Diagrama básico para digitalizar una señal análoga.</i>	45
<i>Figura 30: Celda de carga.</i>	46
<i>Figura 31: Diseño del circuito de amplificación.</i>	48
<i>Figura 32: (a) Diagrama del circuito de un filtro pasa baja de segundo orden, arquitectura MFB y (b) respuestas en frecuencia de un filtro pasa baja para diferentes valores de Q.</i>	49

Figura 33: Diseño del circuito filtro pasa bajas.....	51
Figura 34: Módulo de evaluación LaunchPad MSP430. ....	54
Figura 35: Diagrama de bloques del funcionamiento del microcontrolador en el prototipo. ....	55
Figura 36: Diagrama esquemático del diseño del controlador de potencia. ....	56
Figura 37: Diagrama básico del funcionamiento de una fuente de voltaje.....	58
Figura 38: Diagrama esquemático del diseño de la fuente de voltajes. (a) Fuente de voltaje para acondicionamiento de señal, (b) fuente de voltaje motor DC. ....	59
Figura 39: Histogramas de una señal muestreada para diferentes casos. (a) PCB con problema en el plano de conexión a tierra, (b) PCB con un buen plano de conexión a tierra, pero con ruido, (c) PCB con un buen plano de conexión a tierra y menor cantidad de ruido.....	60
Figura 40: Diseño de la PCB para el acondicionamiento de la celda de carga. (a) capa superior, (b) capa inferior y (c) capa de nombres.....	62
Figura 41: Diseño de la PCB para el controlador de potencia del motor DC. (a) Capa inferior y (b) capa de nombres.....	62
Figura 42: Diseño de la PCB para la fuente de voltaje. (a) capa superior, (b) capa inferior y (c) capa de nombres.....	63
Figura 43: Diagrama de flujo del algoritmo que ejecuta el microcontrolador MS430-f5529.....	65
Figura 44: Diagrama de flujo del algoritmo que ejecuta el botón run en la interfaz gráfica. ....	67
Figura 45: Diseño de las cajas para resguardar los circuitos impresos. (a) Caja para el microcontrolador, acondicionamiento de la señal y controlador de potencia del motor, y (b) caja para la fuente de voltaje.....	68
Figura 46: Comportamiento de la celda de carga sin corrección de offset, en donde las tres pruebas dan los mismos valores. ....	70
Figura 47: Corrección del error de offset e identificación del error de ganancia.....	71
Figura 48: Datos de la celda de carga calibrados, con corrección del error de offset y el factor de ganancia. ....	71
Figura 49: Comportamiento de la fuerza con respecto a cambios en el ciclo útil del PWM.....	72
Figura 50: Franjas de interferencia para la deformación de la probeta de aluminio para la primera prueba con DHI. ....	73
Figura 51: Re-diseño del soporte para la probeta y nueva postura de la celda de carga.....	74
Figura 52: Franjas de interferencia para la deformación de la probeta de aluminio, 2 <sup>da</sup> medición con DHI....	75
Figura 53: Prototipo final de la máquina de ensayo en compresión. (a) Marco estructural con la parte mecánica, (b) circuitos para el acondicionamiento de la señal, el microcontrolador y el controlador de potencia y (c) fuente de voltajes.....	76
Figura 54: Galga extensiométrica CEA-06-062UW-120.....	77
Figura 55: Probetas con las galgas adheridas: (a) probeta del tamaño 1, (b) probeta del tamaño 1 con tres galgas adheridas y (c) probeta del tamaño 2. ....	79
Figura 56: Medición de la deformación para la probeta 3 utilizando el método A. ....	81
Figura 57: Probeta 4 con tres galgas extensiométricas, dos enfrente (galga 1 (G1) y galga 2 (G2)), y una por detrás (galga 3 (G3)). ....	81
Figura 58: Medición de la deformación para la probeta 4 en la galga 1 (G1) utilizando el método A.....	82
Figura 59: Medición de la deformación para la probeta 4 en la galga 2 (G2) utilizando el método A.....	83
Figura 60: (a) Configuración de la máquina para el método A iluminada con un láser. (b) Laminas agregadas a la plataforma inferior para el método B.....	84
Figura 61: Medición de la deformación para la probeta 5 utilizando el método B. ....	85
Figura 62: Medición de la deformación para la probeta 6 utilizando el método A. ....	86
Figura 63. Probetas 5 y 6. ....	86
Figura 64: Medición de la deformación unitaria para la probeta 4 utilizando las galgas extensiométricas G1 y G2. ....	89
Figura 65: Fuerza aplicada a la probeta 4 y los mapas de fase obtenidos entre los incrementos de la fuerza. Medida del desplazamiento relativo en la probeta 7.....	90



*Figura 66: Comparación entre dos mediciones del desplazamiento relativo para la probeta 7, cuando fue sometida a incrementos de 10 lb-f desde 50 lb-f hasta 100 lb-f. .... 91*

*Figura 67: Mapas de fase obtenidos con el segundo arreglo óptico, utilizando la probeta 8 y una cámara rápida. Los mapas de fase en marco azul serían los observados con otra cámara. .... 93*

*Figura 68: Mapa de fase envuelta que experimenta la probeta 8 (sin agujero) a una fuerza desde 70 lb-f a 140 lb-f. .... 95*

*Figura 69: Mapa de fase envuelta que experimenta la probeta 9 (hole-drilling) a una fuerza desde 70 lb-f a 140 lb-f. .... 96*

# Lista de Tablas

<i>Tabla 1: Comparación para dos tipos de galga extensiométrica, dependiendo el material de fabricación. ....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2: Requerimientos para el prototipo de la máquina de ensayo en compresión. ....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3: Parámetros que modifican el valor del torque <math>T_1</math>.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 4: Características del amplificador INA 128.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 5: Ruido producido por algunos componentes del diseño electrónico para el acondicionamiento de la celda de carga. ....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 6: Características básicas de un conversor analógico/digital, a partir de los requerimientos de diseño. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 7: Características del microcontrolador MSP430-f5529. ....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8: Consumo de voltaje y corriente de los principales componentes eléctricos y circuitos impresos (PCB). ....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 9: Registro del peso de los bloques de hierro.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 10: Características de las probetas utilizadas para la prueba de repetibilidad.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 11: Nuevas probetas para las mediciones en DHL.....</i>	<i>88</i>

# CAPITULO I

## 1 Introducción.

En varios procesos de manufactura que pueden ir desde la fabricación de un juguete hasta una prótesis ortopédica, es necesario utilizar materiales adecuados para que dicho producto tenga una correcta construcción y funcionamiento. Por ejemplo, en el diseño de una prótesis, es posible emplear hierro para hacerla resistente a los golpes, sin embargo esta no sería útil para una persona discapacitada debido al peso que implica este material. Es por ello, que es importante estudiar y analizar las características mecánicas de los materiales para establecer los posibles usos que tendrá. Así, los materiales deben tener ciertas propiedades mecánicas (elasticidad, dureza, etc.), químicas (corrosión, reactividad, etc.) y térmicas (expansión térmica, conductividad térmica, etc.), para satisfacer los requerimientos de las aplicaciones en donde serán utilizados.

Tradicionalmente, estas propiedades se miden a partir de pruebas experimentales que deforman y/o dañan el material provocando que cambie su estructura interna e incluso pueda llegar a la fractura. Estas pruebas se conocen como ensayos destructivos. Por otro lado, existen experimentos en donde el material no sufre modificaciones o daños y estas pruebas se conocen como ensayos no destructivos. Los ensayos destructivos utilizan sustancias químicas, impactos, fuego, etc. que ocasionan que el material ya no pueda ser utilizado después de la prueba ya que sus propiedades físicas e inclusive químicas cambiaron. Ejemplo de algunos de estos ensayos son: fatiga, ductilidad, dureza, entre otros.

En los ensayos no destructivos se utilizan variables físicas que no modifican o dañan la muestra. Algunos de estos ensayos son: rayos X, inducción de corriente y métodos ópticos. Dentro de los métodos ópticos existe un grupo de técnicas llamadas pruebas ópticas no destructivas. Ejemplo de estas técnicas son: Interferometría electrónica de patrones de moteado (ESPI por sus siglas en inglés), proyección de franjas, holografía interferométrica digital (DHI por sus siglas en inglés) entre otros.

El objetivo de este trabajo de tesis fue diseñar y llevar a un prototipo una máquina de ensayo por compresión de escala menor en peso y tamaño a las máquinas comerciales y que pueda aplicar una fuerza controlada a una probeta en pruebas ópticas no destructivas. El desarrollo del prototipo inició con el diseño de las partes mecánicas como, los engranes, el marco estructural y el sistema de transmisión. También se llevó a cabo el diseño de los circuitos electrónicos para instrumentar y controlar la máquina. Después de analizar los diseños, se fabricaron las partes mecánicas utilizando diferentes técnicas de maquinado e impresión 3D. Los circuitos impresos se hicieron utilizando un concepto modular para escalar las propiedades de la máquina a futuro. Los circuitos impresos se realizaron a doble cara y se utilizaron, en la mayoría, componentes de montajes superficiales para obtener circuitos impresos pequeños.

Se desarrollaron una serie de algoritmos que permiten la transferencia de la información por conexión USB, controlar la fuerza y las funciones necesarias para manipular la máquina desde el software Matlab. Fue necesario realizar la calibración de la celda de carga, la caracterización de la fuerza aplicada y la sincronización entre la máquina y la computadora, para establecer los alcances del prototipo en: resolución, velocidad de la fuerza aplicada y rango de medida. Se realizó un estudio de la deformación de una probeta de aluminio utilizando dos métodos para validar el funcionamiento del ensayo. En el primer método se adhirieron galgas extensiométricas a las probetas y se midió la deformación con un lector comercial cuando la probeta estaba sometida a una fuerza variable con rangos de carga estática.

El segundo método utilizó DHI para medir en campo completo y en tiempo real la deformación de la probeta con y sin galga en alta velocidad para caracterizar transitorios de carga. De los resultados obtenidos en ambas pruebas de caracterización y validación se concluye que el prototipo de máquina de ensayo sirve para realizar pruebas de compresión controlada, con carga calibrada y aplicando una fuerza repetible.

Así pues, este informe describe todo el procedimiento para el diseño y fabricación del prototipo con la siguiente estructura: en el capítulo 2 se describen todos los conceptos básicos sobre las pruebas mecánicas, medición de la deformación por ensayos invasivos y no invasivos, galgas extensiométricas e interferometría holográfica digital. En el capítulo 3 se describe todo el diseño mecánico, electrónico y de software para el prototipo.

El capítulo 4 inicia con el ajuste de la parte mecánica, electrónica y de software para dejar en funcionamiento la máquina, y el capítulo continúa con la medición de la deformación usando las galgas extensiométricas y termina con la medición del desplazamiento utilizando DHI. En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y discusiones sobre las mediciones realizadas, el diseño y fabricación del prototipo y finalmente se presentan los trabajos futuros para mejorar el diseño del sistema y describir su rango de aplicaciones.



# CAPITULO II

## 2 Conceptos básicos.

### 2.1 Ensayo de materiales.

Para determinar características de los materiales, se realizan experimentos conocidos como ensayos de materiales. Estos involucran pruebas de laboratorio que sirven para determinar: rigidez, resistencia al desgaste, conductividad térmica o eléctrica, acidez, resistencia a la corrosión, densidad, transmisión del sonido, ductilidad, resistencia al impacto, entre otras. Los ensayos de materiales se pueden clasificar de diferentes formas, pero las más comunes son: por la naturaleza del ensayo y por la utilidad de la pieza después del ensayo.

El primer caso está constituido por: ensayos químicos, ensayos físicos, ensayos eléctrico-magnéticos, ensayos mecánicos entre otros [1]. Cada uno de estos tipos de ensayos proporciona información distinta de algunas variables del material. Por ejemplo, los ensayos químicos proporcionan el comportamiento del material ante la presencia de líquidos o gases corrosivos y determinan propiedades como acidez o alcalinidad y resistencia a la corrosión. Los ensayos físicos miden propiedades como la forma, densidad, porosidad, contenido de humedad y densidad. Los ensayos electromagnéticos suministran información de la conductividad y permeabilidad magnética. Por último, los ensayos mecánicos evalúan el comportamiento de los materiales cuando están sometidos a fuerzas externas, y las propiedades mecánicas que se miden son: la resistencia, la rigidez, la elasticidad, entre otras.

En el caso del ensayo de materiales por la utilidad de la pieza se emplean ensayos destructivos y no destructivos. En los ensayos destructivos las piezas de prueba se someten a fuerzas que ocasionan la ruptura de esta. En comparación, en las pruebas no destructivas no es necesario dañar la muestra para evaluarla. Un ejemplo de un ensayo mecánico y destructivo es el ensayo de tensión. El objetivo de este ensayo es medir la resistencia de un material ante la acción de una fuerza de tensión que puede ser estática o dinámica. Esta prueba se considera destructiva porque el material debe pasar por la deformación hasta

llegar a la ruptura para obtener sus propiedades mecánicas como: el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último.

Por otro lado, un ejemplo de un ensayo mecánico no destructivo es el método de ultrasonido. Esta técnica se basa en la propagación de ondas de sonido por el interior de la probeta con el objetivo de detectar discontinuidades superficiales o internas. Con el objetivo de comparar los resultados de los ensayos es necesario que las dimensiones de las probetas estén normalizadas, así como el procedimiento de los ensayos esté estandarizado. Una de las principales organizaciones que estandarizan los ensayos mecánicos destructivos y no destructivos es la American society for testing and materials (ASTM). Esta sociedad se encarga de publicar especificaciones y normas de los materiales bajo prueba y la metodología del ensayo. Otras organizaciones son: American Standards and Association (ASA), National Institute of Standards and Technology (NIST) y American Society for Nondestructive Testing (ASNT). En México, la secretaria de economía, por medio de la Dirección General de Normalización (DGN), es la entidad pública encargada de emitir y regular las normas en todo el territorio mexicano.

### **2.1.1 Ensayos mecánicos.**

Los ensayos mecánicos permiten establecer propiedades mecánicas como: límite elástico, la tensión de ruptura, dureza, etc. Los ensayos mecánicos más importantes son:

- **Ensayos de tensión.**

Es uno de los ensayos más utilizados y consiste en someter una probeta a una fuerza creciente de tracción, ocasionando que la probeta se alargue hasta que se deforme y por último se rompa. Es un ensayo que se utiliza en metales, plásticos y otros. En la figura 1-a se observa la implementación del ensayo de tensión y en la parte superior de la figura 1-b se observa la probeta antes y después del ensayo.

La norma que estandariza este ensayo para piezas metálicas es la ASTM E8 / E8M [2].



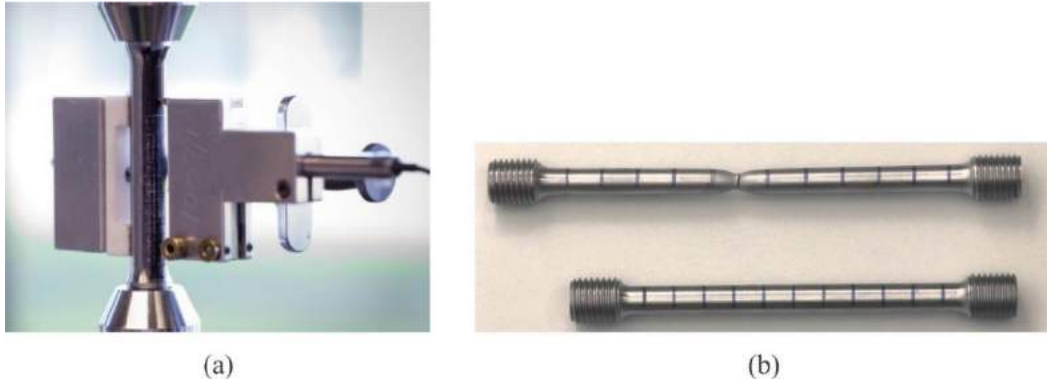


Figura 1: Una probeta cilíndrica sometida (a) a un ensayo de tensión y (b) la comparación entre el estado inicial (abajo) y final (arriba).

- **Ensayos de compresión**

El ensayo de compresión es una prueba en donde una fuerza es capaz de comprimir o aplastar una probeta hasta que ocurra la ruptura de la misma. Es un ensayo muy utilizado en bloques cilíndricos hechos con mezclas de materiales para la construcción de carreteras, como cemento o asfalto, bajo la norma ASTM C39 / C39M [3]. En la figura 2-a se observa una probeta de concreto sometida a esta prueba y la figura 2-b se observa el resultado de llevar la probeta hasta la ruptura. Para materiales de metal la norma es ASTM E9 – 09 [4].

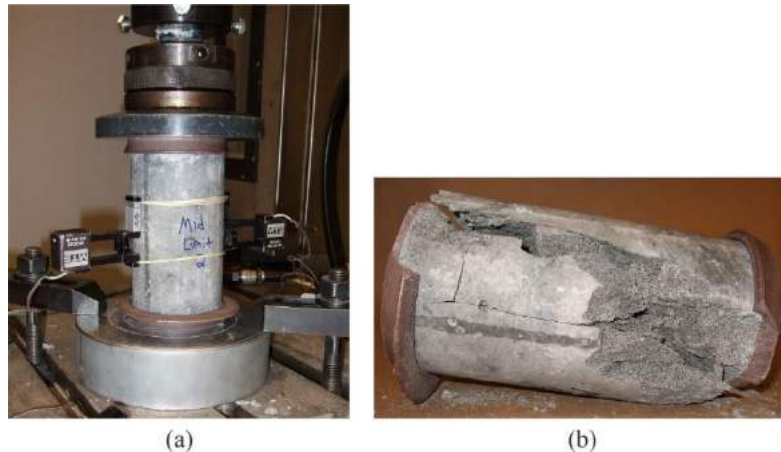


Figura 2: Una probeta de concreto (a) sometida a un ensayo de compresión, (b) probeta después de la prueba.

- **Ensayo de flexión.**

En el ensayo de flexión una fuerza es aplicada perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta, provocando una deformación curva que puede ser permanente. Esta prueba permite observar el comportamiento de la fuerza cortante y el momento flexionante. La norma que regula la prueba es la ASTM E290 [5].



*Figura 3: Probeta de metal sometida a un ensayo de flexión.*

- Otros ensayos que existen son: ensayos de rotura o fractura, ensayos de dureza Rockwell, Vickers o Brinell y ensayo de Cizalladura.

### **2.1.2 Ensayos no destructivos.**

Los ensayos no destructivos evalúan las propiedades de los materiales sin causar daño a la probeta. Algunos de los diferentes ensayos no destructivos son: [6].

- **Rayos X.**

Esta técnica utiliza ondas electromagnéticas de longitud de onda corta (alta energía), para penetrar el material de prueba y detectar imperfecciones internas en este. Esta técnica es una de las más utilizadas en los ensayos no destructivos porque puede medir imperfecciones en el interior y exterior, y puede ser empleada en muchos materiales, sin

embargo también es muy perjudicial para el cuerpo humano a causa de las radiaciones [7]. La norma ASTM E94 – 04 [8] es una guía básica para el ensayo por rayos X. En la figura 4-a se muestra una probeta iluminada por una fuente de rayos X y debajo de esta hay una película fotosensible que registra la cantidad de rayos que pueden atravesar la probeta. Y en la figura 4-b se observa la película fotosensible revelada y en donde la imperfección dentro de la probeta quedó registrada en esta.

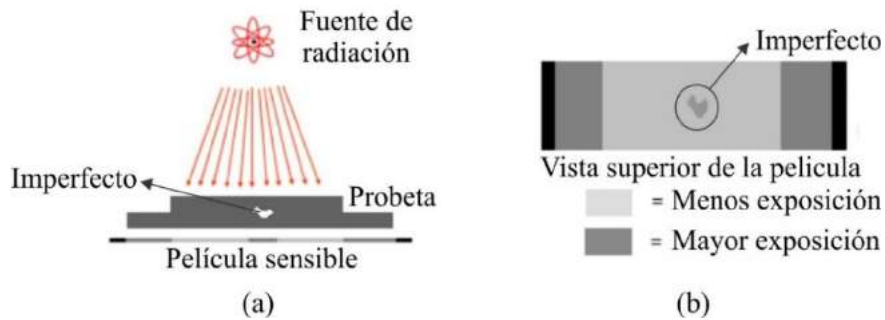


Figura 4: Método para realizar un ensayo por rayos X. (a) Probeta sometida a una fuente de radiación X. (b) película sensible revelada y detección de la imperfección.

- **Ultrasonido.**

En este ensayo se utiliza una onda de sonido con una frecuencia entre 0.1 y 15 Mhz, que viaja al interior de la probeta [9]. Cuando la onda llega a la parte inferior de la probeta se refleja y regresa de nuevo al instrumento con un tiempo 1. Ahora si la onda encuentra una imperfección, el tiempo 2 de regreso al instrumento es menor, y por lo tanto se puede caracterizar e identificar la profundidad del daño. En la figura 5 se observa el funcionamiento de este tipo de ensayo, una norma básica para éste es la ASTM E569 / E569M.

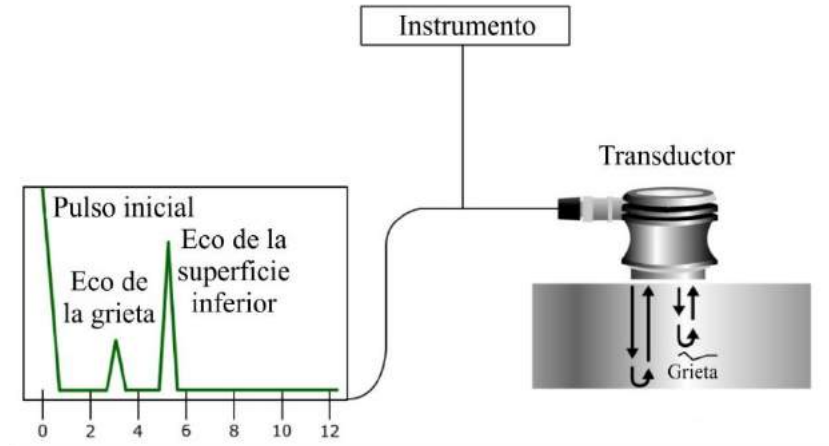


Figura 5: Ensayo por ultrasonido.

- **Electromagnéticos**

En los ensayos electromagnéticos se inducen corrientes eléctricas y campos magnéticos a las probetas para observar su respuesta electromagnética [10]. Un ejemplo de este ensayo consiste en acercar un campo magnético a la superficie de un material conductor, al mismo tiempo este genera una corriente inducida (corriente de Eddy) en la superficie de la probeta (figura 6-a) y las corrientes generan otro campo magnético que pueden cambiar el valor de la impedancia de la bobina. Si la probeta no tiene algún defecto, la impedancia de la bobina tiene un valor fijo (figura 6-b), pero cuando la probeta tiene un defecto, la circulación de la corriente inducida cambia y a su vez lo hace la impedancia de la bobina (figura 6-c). En la norma ASTM E243 – 13 se establece el método para examinar tubos de cobre utilizando un ensayo electromagnético.

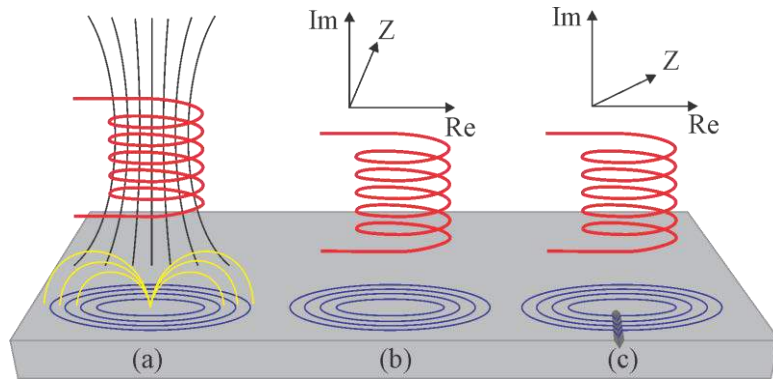


Figura 6: Ensayo Electromagnético (Prueba de corrientes de Eddy). (a) Acercamiento del campo magnético a la superficie, (b) medida de la impedancia cuando no hay un defecto y (c) cambio de la impedancia debido a un defecto.

- **Ensayos ópticos**

Los ensayos no destructivos por técnicas ópticas utilizan ondas electromagnéticas como la luz visible, infrarroja, etc., para analizar y caracterizar los materiales [11]. Dentro de esta categoría existen diferentes técnicas como: ESPI, (ver figura 7) [12], termografía infrarroja, shearografía, therahertz [13], DHI [14], entre otros. Algunas de las ventajas de utilizar técnicas ópticas son:

- Medición sin contacto y de forma remota
- Medición de campo completo (toda el área observada)
- Mediciones en tiempo real

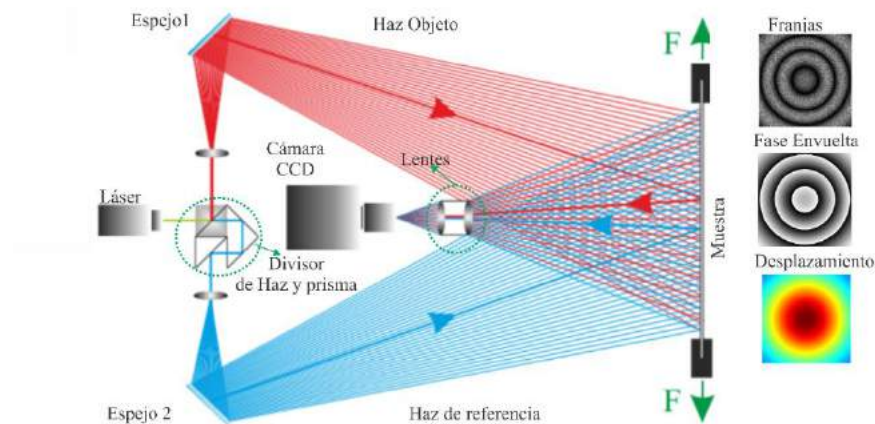


Figura 7. Interferometría por patrones de moteado (ESPI).

### 2.1.3 Máquina universal de pruebas mecánicas.

Un equipo fundamental para realizar la medición de las propiedades mecánicas es la máquina universal. Esta máquina está compuesta por una cruceta que se desplaza verticalmente hacia arriba o abajo, aplicando una fuerza controlada de tracción o compresión sobre la probeta a evaluar. Dependiendo del rango de la fuerza aplicada a las probetas, las maquinas universales se clasifican en hidráulicas y electromecánicas. Las maquinas electromecánicas pueden aplicar hasta una fuerza de 600 kN ( $1.35 \times 10^5$  lbf), mientras que las maquinas hidráulicas permiten aplicar fuerzas de hasta 4500 kN ( $1 \times 10^6$  lbf) [15].

En la figura 8 se observa 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 (DC, paso a paso o servomotor).

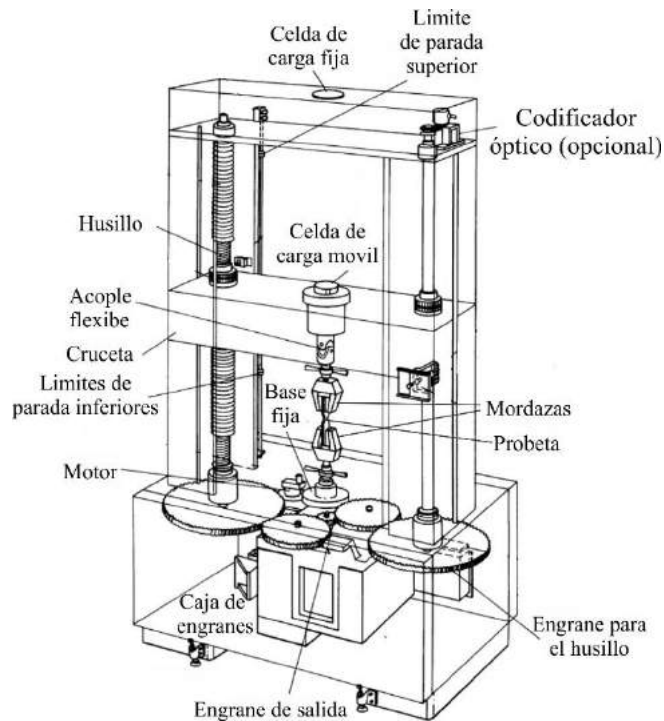


Figura 8: Estructura básica de una máquina universal.

### 2.1.3.1 Diagrama esfuerzo deformación.

Una medida importante que se obtiene con la máquina universal de ensayos cuando se realizan pruebas de compresión o tensión es el diagrama de esfuerzo-deformación unitario. Este diagrama se puede obtener por dos métodos diferentes. Cuando la máquina registra la fuerza aplicada, se calcula el esfuerzo utilizando al área transversal de la probeta y luego se calcula la deformación utilizando el modulo elástico del material y la ley de Hooke.

Si la máquina registra la deformación, utilizando un extensómetro adherido a la muestra, se calcula el esfuerzo utilizando el módulo de elasticidad del material y la ley de Hooke. De estos métodos descritos, el segundo es el más utilizado, debido a que el primero acarrea un error al resultado a causa de las deformaciones que sufre la máquina. En la figura 9 se observa la curva clásica que se obtiene cuando se realiza una prueba de tensión realizada en una máquina universal de ensayos, donde el eje de las abscisas corresponde a la deformación unitaria y el eje de las ordenadas es el esfuerzo unitario. Además se observan puntos clave para el estudio de los materiales, los cuales se describen a continuación.

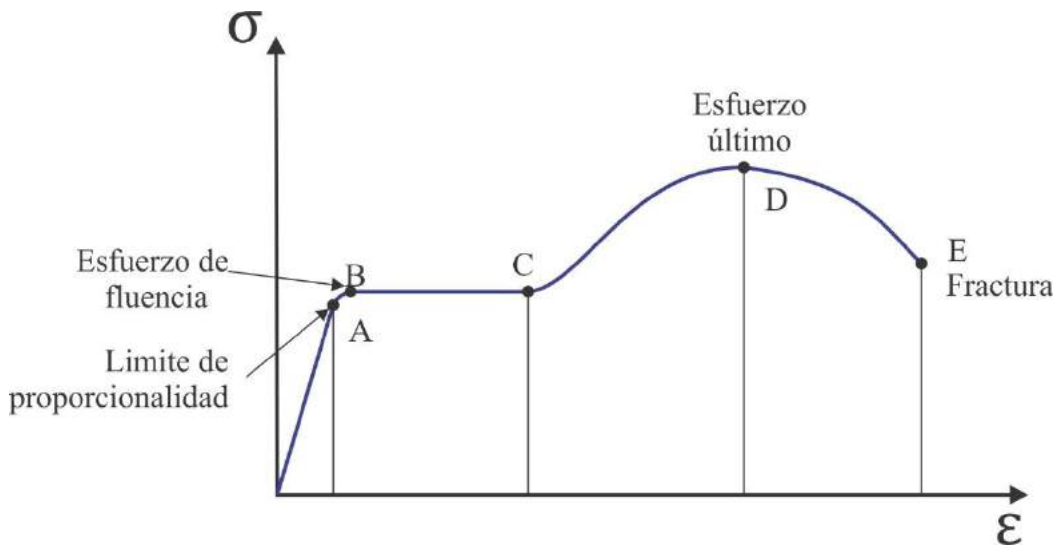


Figura 9: Diagrama esfuerzo ( $\sigma$ )-deformación ( $\varepsilon$ ) unitarios.

El límite de proporcionalidad de la probeta, (punto A) en el diagrama de esfuerzo-deformación unitario, es la zona en la cual existe una relación lineal entre el esfuerzo aplicado a la probeta y la deformación que sufre. En esta zona lineal se obtiene la relación fundamental para el estudio de materiales: la ley de Hooke, la cual establece una relación proporcional entre la deformación unitaria y el esfuerzo unitario, utilizando el “Módulo de elasticidad de Young” del material, siempre y cuando no se supere su límite elástico. Cuando la deformación del material experimenta un crecimiento constante sin un aumento en el esfuerzo (comportamiento desde el punto B al C), el material se encuentra en la región plástica o región de fluencia. El punto B se conoce como punto de fluencia. Si la probeta se somete a un esfuerzo mayor que el punto de fluencia, no recuperará su forma original aunque se deje de aplicar la fuerza. El esfuerzo último (punto D), corresponde al valor máximo de un esfuerzo al que se puede someter una probeta antes de que se produzca una ruptura (punto E).

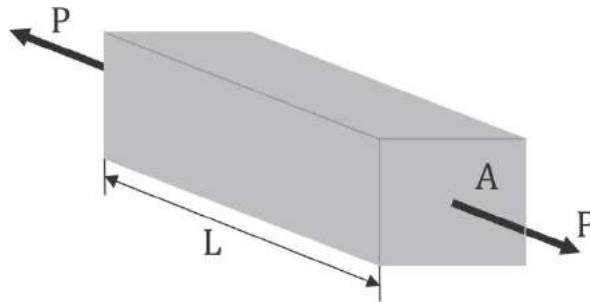
## **2.2 Deformación y esfuerzo unitarios.**

Uno de los conceptos básicos en el estudio de la mecánica de materiales es la deformación y el esfuerzo unitario. Estos dos parámetros se pueden obtener en los materiales cuando estos están sometidos a cargas o fuerzas externas. Comprender claramente estos conceptos, permite obtener una representación completa del comportamiento mecánico de las estructuras y por ende se podrá utilizar para el diseño de estructuras seguras.

- **Esfuerzo unitario.**

Para una barra sometida a una carga axial ( $P$ ) aplicada en uno de sus planos, se tiene que, el esfuerzo unitario es la relación que existe entre la fuerza aplicada y la sección transversal ( $A$ ) de la barra, como se muestra en la figura 10 [16].





*Figura 10. Fuerza aplicada axialmente.*

La ecuación (1) describe el esfuerzo unitario ( $\sigma$ ) en relación a la carga axial ( $P$ ) y la sección transversal de la barra ( $A$ ).

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

Si la barra sufre un estiramiento cuando es sometida a la fuerza, el esfuerzo resultante es de tensión, en cambio, si la barra se comprime por la fuerza, el esfuerzo resultante es de compresión. Como el esfuerzo actúa en la dirección perpendicular de la superficie donde se aplicó la fuerza, el esfuerzo se llama esfuerzo normal [17].

- **Deformación unitaria.**

La deformación unitaria ( $\varepsilon$ ) se define en la ecuación (2), y es la relación entre el cambio en longitud ( $\delta$ ) y la longitud inicial ( $L$ ), debido a una fuerza axial ( $P$ ) que se aplica de nuevo sobre una superficie de la barra, como se observa en la figura 11. El cambio de longitud se define como la resta entre la longitud final ( $L_f$ ) menos la longitud inicial ( $L$ ) [18].

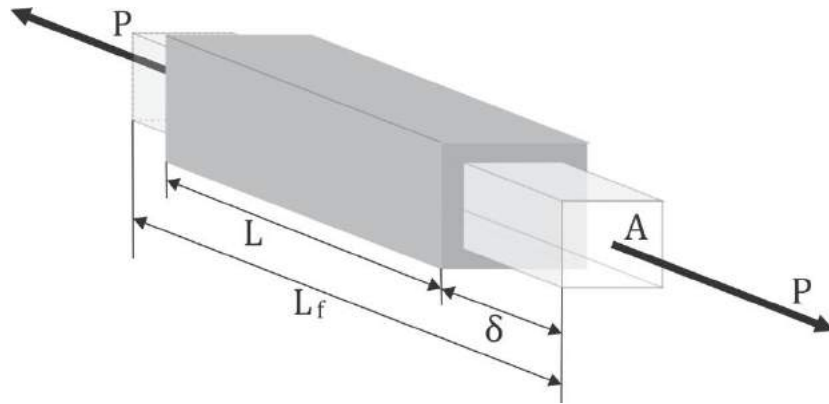


Figura 11. Estiramiento debido a una fuerza aplicada axialmente.

$$\varepsilon = \frac{L_f - L}{L} = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

- **Elasticidad lineal y ley de Hooke**

Como se explicó, al someter un material a una carga axial, se puede observar el comportamiento del esfuerzo contra la deformación mediante el diagrama de esfuerzo-deformación. Cuando se realizan pruebas repetitivas sobre un material, se observa como el diagrama de esfuerzo-deformación es el mismo para todas las pruebas. Por lo tanto, cuando el material es sometido a una fuerza y luego liberado de ella, el material recupera su forma original. Esta propiedad se denomina “elasticidad” [19]. La expresión matemática que relaciona el esfuerzo ( $\sigma$ ) y la deformación ( $\varepsilon$ ) unitaria la demostró Robert Hooke en 1678 y se describe en la ecuación (3). La letra E es el módulo de Young

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Las ecuaciones (1) y (2) exhiben la deformación y esfuerzos unitarios en una dimensión. Para el caso de la deformación en dos dimensiones, se muestra en la figura 12, en donde un elemento rectangular infinitesimal con lados dx y dy es sometido a una deformación, [20].

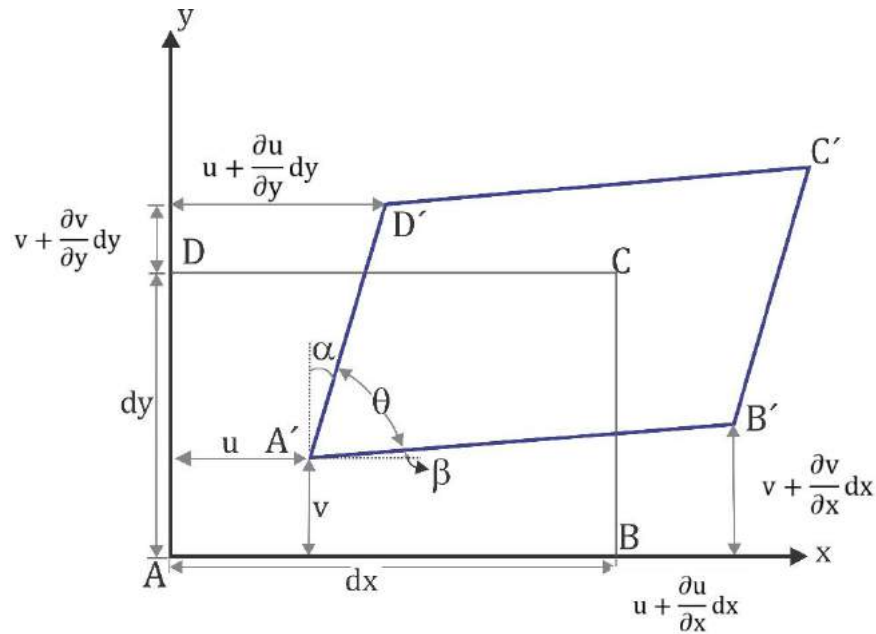


Figura 12. Deformación de una placa rectangular.

Si  $u$  y  $v$  son las componentes de desplazamiento  $x$  e  $y$  para el punto  $A$ , las componentes de desplazamiento para el punto  $B$  serán:

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad (4)$$

$$v + \frac{\partial v}{\partial x} dx \quad (5)$$

Ahora, las componentes de desplazamiento para el punto  $D$  serán:

$$u + \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (6)$$

$$v + \frac{\partial v}{\partial y} dy \quad (7)$$

Para una deformación uniaxial, la deformación unitaria en las direcciones  $x$  ( $\epsilon_x$ ) e  $y$  ( $\epsilon_y$ ) se definen como:

$$\epsilon_x = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{A'B' - dx}{dx} \quad (8)$$

$$\varepsilon_y = \frac{A'D' - AD}{AD} = \frac{A'D' - dy}{dy} \quad (9)$$

Se considera en la mayoría de problemas que estudia la ingeniería, que los desplazamientos y las deformaciones que se producen al aplicar cargas, son muy pequeños (para el caso de analizar el material en su rango elástico). De acuerdo a esto es posible considerar que las deformaciones son muy pequeñas y por lo tanto los ángulos ( $\alpha$ ) y ( $\beta$ ) también. Resultando en:

$$A'B' \approx dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad (10)$$

$$A'D' \approx dy + \frac{\partial v}{\partial y} dy \quad (11)$$

Finalmente reemplazando la ecuación (10) en la ecuación (8) se obtiene la deformación unitaria ( $\varepsilon_x$ ) y reemplazando la ecuación (11) en la ecuación (9) se obtiene la deformación unitaria ( $\varepsilon_y$ ).

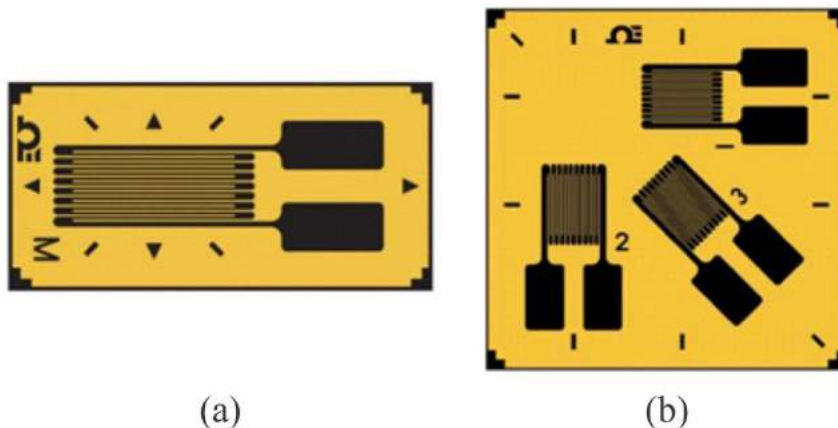
$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (12)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (13)$$

## 2.3 Galgas extensiométricas.

Las galgas extensiométricas son transductores activos que se utilizan para la medición de algunas magnitudes mecánicas, como pueden ser: deformación, presión, carga, par, etc. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezo-resistivo de metales y semiconductores, el cual es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar su resistividad cuando se someten a esfuerzos y que se deforman en la dirección de los ejes mecánicos. El tamaño y la forma de las galgas influyen en la medición, teniendo mayor resistencia a la fatiga las galgas de mayor tamaño. Las galgas solamente pueden medir en una dirección y proporcionan la medida del estado tensional de la superficie que ocupa la galga.

La transmisión del esfuerzo al que se somete un material, desde la superficie de la medida, hasta el metal debe realizarse sin pérdida de información, por lo que el sistema debe garantizar la no absorción del esfuerzo. Si se desconoce la dirección de la tensión a la cual estará sometida la galga se pueden utilizar dos galgas dispuestas en la misma zona de forma ortogonal. En la figura 13 se ilustra dos tipos de galgas extensiométricas, una para realizar medición en un solo eje y otra para medir en 3 direcciones diferentes, la cual está conformada por tres galgas con las mismas características.



*Figura 13: Galgas extensiométricas(a) para medición en un solo eje y (b) para la medición en 3 direcciones.*

El límite de deformación de las galgas, depende de las propiedades del elemento conductor, el elemento de soporte y del adhesivo utilizado, generalmente para galgas del mismo tipo la deformación máxima admisible es similar aunque sus longitudes sean diferentes. La deformación límite viene indicada en forma porcentual y suele oscilar entre el 0.15% como valor más bajo y 5% como valor más alto, pero también se fabrican galgas especiales que alcanzan hasta el 20% y el 25%.

El mayor campo de aplicación de las galgas extensiométricas se encuentra en la industria del diseño mecánico y estructural, en donde es importante determinar y controlar la deformación que sufren los materiales. Como ejemplos de aplicación, en los cuales se utilizan galgas son: en el monitoreo de puentes, en máquinas universales para realizar ensayos mecánicos y en aeronáutica para medir componentes en estado estático y dinámico. La variedad de aplicaciones de las galgas requiere de diseños especiales y técnicas adecuadas de montaje, incluyendo variaciones en el diseño del material de soporte, configuración de rejilla, técnicas de pegado y finalmente la resistencia eléctrica total de la galga.

### **2.3.1 Fundamento: efecto piezo-resistivo.**

Para un hilo metálico de longitud ( $l$ ) de sección transversal ( $A$ ) y resistividad ( $\rho$ ), la resistencia eléctrica está determinada por la ecuación (14):

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (14)$$

Si el hilo metálico es sometido a un esfuerzo longitudinal, la resistencia sufrirá un cambio debido al efecto combinado de los cambios en la longitud, el área transversal y la resistividad.

$$\begin{aligned}
dR &= \frac{l}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dl - \frac{\rho l}{A^2} dA \\
dR &= \frac{\rho l}{A} \left[ \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \right] \\
dR &= R \left[ \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \right] \\
\frac{dR}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \tag{15}
\end{aligned}$$

La variación de la resistencia debido a un cambio en la longitud del hilo en la galga (ecuación (15)), se conoce como el efecto piezo-resistivo [21]. Para obtener el valor de la resistencia cuando hay un cambio en la galga es necesario establecer las siguientes relaciones [22]:

Ley de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{dl}{l} \tag{16}$$

donde (E) es el módulo de Young, ( $\sigma$ ) es el esfuerzo y ( $\varepsilon$ ) es la deformación unitaria. El cambio de área para un hilo conductor de diámetro (D) está determinado por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \tag{17}$$

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = -2\mu \frac{dl}{l} \tag{18}$$

donde ( $\mu$ ) es el coeficiente de Poisson, el cual representa la relación de la deformación perpendicular a la axial.

El cambio de resistividad está dado por el cambio de volumen y la constante de Bridgman (C). Esta es una constante de proporcionalidad que indica la relación entre el cambio de resistividad eléctrica y el volumen de un conductor.

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} (1 - 2\mu) \tag{19}$$

Reorganizando la ecuación (15) con las ecuaciones (16), (18) y (19), se obtiene la ecuación (20)

$$\frac{dR}{R} = [1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)] \frac{dl}{l} \quad (20)$$

El factor de galga determina la sensibilidad de la resistencia a los cambios en la longitud. El término  $[1+2\mu+C(1-2\mu)]$  de la ecuación (20) se define como el factor de galga (K). El término  $(dl/l)$  representa el cambio de la longitud con respecto a la longitud inicial y se define como la deformación unitaria ( $\epsilon$ ). Reescribiendo la ecuación (20) se obtiene:

$$dR = RK\epsilon \quad (21)$$

El cambio de la resistencia ( $dR$ ) se define como el cambio final ( $R_f$ ) menos el cambio inicial ( $R$ ) del valor de la resistencia. Reemplazando en la ecuación (21) y despejando ( $R_f$ ) se obtiene el valor de la resistencia cuando se aplica una deformación a la galga extensiométrica, dado por la ecuación (22):

$$R_f = R(1 + K\epsilon) \quad (22)$$

Cuando se realizan mediciones con galgas extensiométricas es necesario tener en cuenta [23]:

- El esfuerzo que se aplica a la galga extensiométrica no debe superar el límite elástico de la misma.
- La deformación que se desea medir debe ser transmitida completamente a la galga extensiométrica, esto quiere decir que la galga debe estar bien adherida a la superficie de prueba.
- La temperatura afecta significativamente la medición de la resistencia, sin embargo hay configuraciones eléctricas que permiten disminuir este factor. En la referencia [24], se explican algunas de las configuraciones habituales para evitar cambios en las medidas a causa de la temperatura.

### **2.3.2 Tipos y tamaños de las galgas extensiométricas.**

Existen diferentes características que permiten clasificar las galgas extensiométricas, entre las cuales se encuentra el material de fabricación y el tamaño.



Las galgas más comunes están fabricadas con materiales conductores como cobre-níquel, níquel-cromo y platino-tungsteno. Las aleaciones metálicas tienen la ventaja de tener un bajo coeficiente de temperatura, porque se puede compensar parcialmente la disminución de la movilidad de los electrones al aumentar la temperatura con el aumento de su concentración. También existen galgas fabricadas con materiales semiconductores como el silicio y el germanio. En la Tabla 1 se comparan dos tipos de galgas, dependiendo el material de fabricación.

<b>Características</b>	<b>Conductores</b>	<b>Semiconductores</b>
<b>Factor de galga</b>	2	50-60
<b>Resistencia</b>	120, 350, 600, 1000 $\Omega$	Más de 500 $\Omega$
<b>Linealidad</b>	$\pm 1\%$ hasta 1000 $\mu\epsilon$	$\pm 1\%$ hasta 1000 $\mu\epsilon$
<b>Efecto de la temperatura</b>	Medio	alto

*Tabla 1: Comparación para dos tipos de galga extensiométrica, dependiendo el material de fabricación.*

La característica más importante para usar una galga de material conductor es el efecto ante cambios en la temperatura, permitiendo realizar mediciones en espacios abiertos. Las galgas de semiconductor poseen un factor de galga muy alto, lo que conlleva sistemas de acondicionamiento de la señal más sencillos. El tamaño de la galga extensiométrica puede afectar de dos formas la medición de la deformación. Las galgas extensiométricas pequeñas sirven para obtener concentraciones de esfuerzos en áreas muy pequeñas, sin embargo la capacidad de disipar calor es bajo, lo que conlleva variaciones de temperatura y a su vez cambios en la medición. En cambio, las galgas extensiométricas grandes permiten disipar mejor el calor, pero la medición de la deformación será un promedio del área superficial que cubre la galga.

### 2.3.3 Circuitos de medida para las galgas extensiométricas.

Para medir los cambios en la resistencia de una galga extensiométrica es necesario utilizar un circuito eléctrico que convierta los cambios en la resistencia en variaciones de voltaje. Los circuitos más empleados son: divisor de voltaje y puente de Wheatstone. Con un puente de Wheatstone se puede obtener una medida precisa y exacta de un cambio pequeño en la resistencia de la galga extensiométrica. El puente es una configuración de 4 elementos resistivos, donde uno o varios de ellos pueden ser un sensor resistivo. Dependiendo de la cantidad de sensores resistivos en el puente, estos se clasifican en cuarto, medio y puente completo. En la figura 14 se observan las diferentes configuraciones para un puente de Wheatstone.

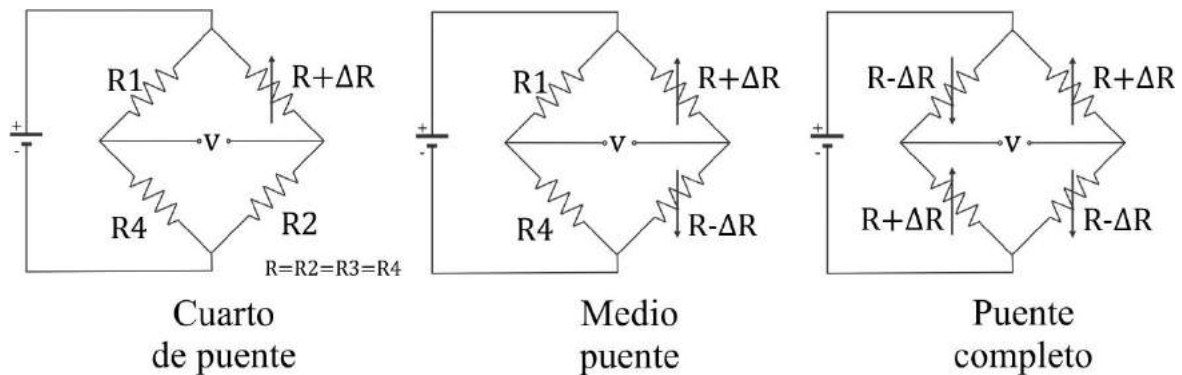


Figura 14. Tres diferentes configuraciones de puente de Wheatstone.

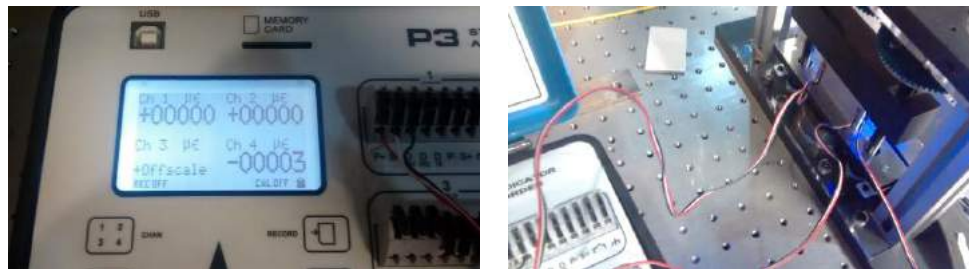
La ventaja principal de utilizar un puente completo es la respuesta proporcional de la salida ante la entrada y la invariancia a cambios de temperatura, por lo cual son los más utilizados para medir deformaciones unitarias. Para realizar la medición con un puente de Wheatstone es necesario que las resistencias fijas tengan niveles de tolerancia muy bajos (alrededor de 0,01% [25]). En el mercado actual hay gran variedad de equipos para la medición del cambio de resistencia en las galgas extensiométricas. Como ejemplo este el indicador y registrador de esfuerzo modelo P3 de la empresa *Vishay micro-measurements* que es un medidor de galgas extensiométricas con las siguientes características: cuatro canales de entrada, configuración para cuarto, medio y puente completo de Wheatstone, almacenamiento de

información, balance de cero y equipo portable con alta duración en la energía de la batería (ver la figura 15).



Figura 15: Indicador y registrador de esfuerzo modelo P3.

La alta estabilidad en los circuitos electrónicos del indicador y registrador de esfuerzos modelo P3, para medir la deformación de una superficie, permite obtener rangos en la medida para deformaciones de  $\pm 31,000 \mu\epsilon$  con un factor de galga (K) de 2,000 ( $\pm 15.5 \text{ mV/V}$ ) y una resolución de  $\pm 1 \mu\epsilon$  para un factor de galga (K) de 2,000 ( $\pm 0.0005 \text{ mV/V}$ ) [26]. En la figura 16, se puede observar la forma de realizar y registrar una medición de esfuerzo en una probeta con el indicador y registrador de esfuerzos modelo P3.



(a)

(b)

Figura 16. Medición de la deformación de una placa de aluminio utilizando el indicador y registrador de esfuerzos modelo P3: (a) Tablero indicador de esfuerzo y (b) ajuste del offset y conexiones.

## 2.4 Interferometría.

### 2.4.1 Holografía.

La holografía es una técnica interferométrica que permite grabar no solo la amplitud, sino la información de la fase de un frente de onda. En la figura 17-a se muestra el montaje óptico básico para realizar un holograma [27]. En esta figura se observa que el holograma se forma por la superposición de dos frentes de ondas sobre un medio. Un frente de onda corresponde a un haz de luz que viene directo del láser, este haz se llama haz de referencia. El otro frente de onda proviene de la luz reflejada por el objeto, a este haz se conoce como haz objeto. Para el caso de holografía clásica, el registro de la interferencia se realiza en una película fotosensible. Para reconstruir la imagen se debe iluminar el holograma con el frente de onda de referencia. La condición es que el holograma debe estar en la misma posición y ángulo con el que se grabó inicialmente (ver figura 17-b).

El ángulo entre el frente de onda objeto y el de referencia determina la frecuencia espacial ( $f$ ) de las franjas de interferencia en la placa fotosensible. La ecuación (23) muestra esta relación.

$$f = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (23)$$

En donde ( $\lambda$ ) es la longitud de la luz láser y ( $\alpha$ ) es el ángulo entre los frentes de onda del objeto y referencia. El proceso matemático que describe la interferencia entre los frentes de onda del objeto y el de referencia se lleva a cabo por la superposición de dos ondas planas. Si se define el frente de onda del objeto y el de referencia como las amplitudes complejas en forma exponencial, se tiene:

$$E_O = a_O e^{-i\varphi_O} \quad (24)$$

$$E_R = a_R e^{-i\varphi_R} \quad (25)$$

donde  $(a)$  es la amplitud y  $(\varphi)$  es la fase, y  $(O)$  y  $(R)$  corresponde a las letras iniciales para los frentes de onda del objeto y la referencia.

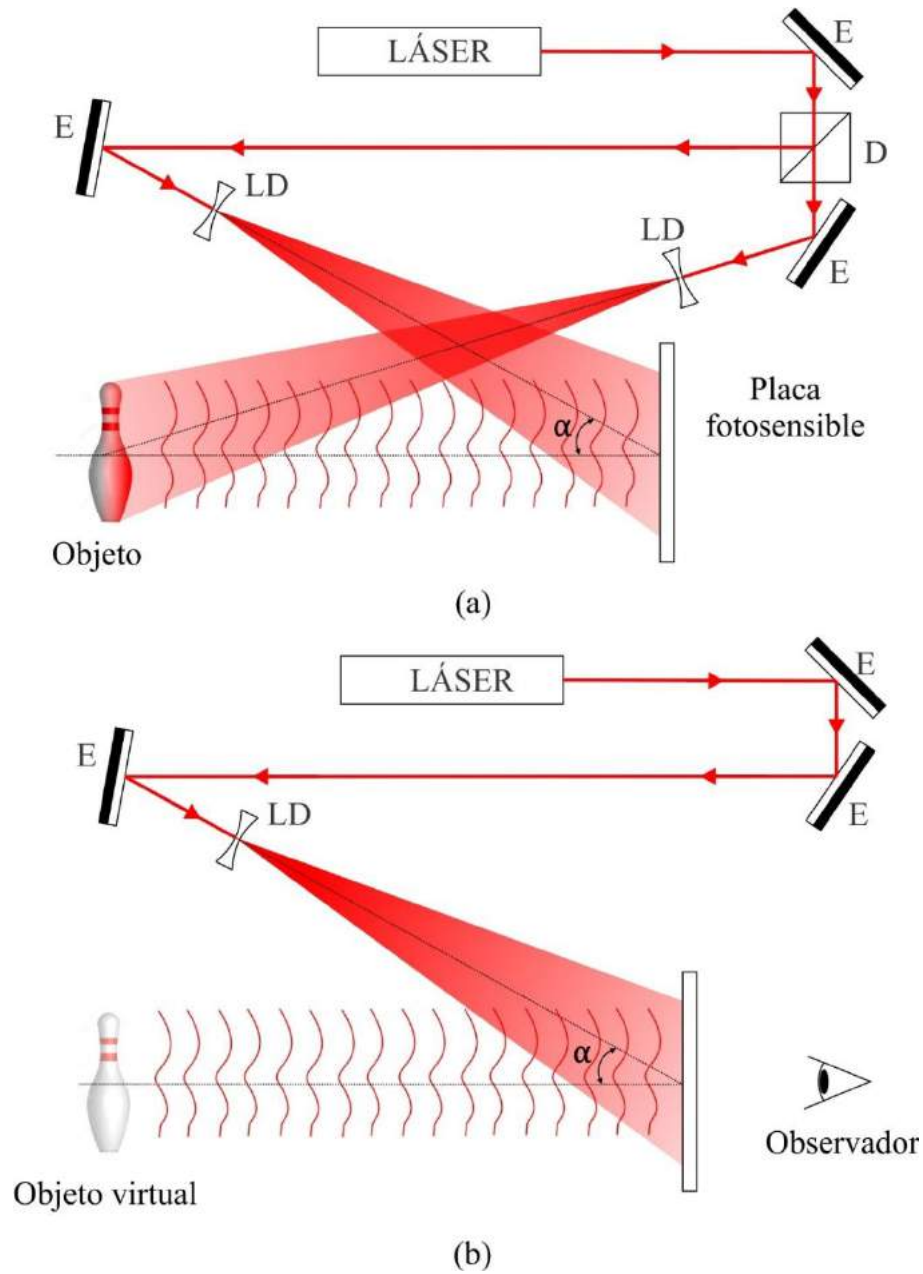


Figura 17: Arreglo óptico para (a) realizar y (b) reconstruir un holograma. Las siglas corresponden a: E espejo, D divisor de haz, LD lente difusor.

La interferencia de estos dos frentes de onda sobre la superficie de la placa fotosensible es:

$$E_{OR} = E_O + E_R = a_O e^{-i\varphi_O} + a_R e^{-i\varphi_R} \quad (26)$$

Por lo que la intensidad será [28]:

$$I = |E_O + E_R|^2 = (E_O + E_R)(E_O + E_R)^* \quad (27)$$

donde \* denota el complejo conjugado. Realizando los cálculos matemáticos se obtiene:

$$\begin{aligned} I &= E_O E_O^* + E_R E_R^* + E_O E_R^* + E_R E_O^* \\ &= E_O E_O^* + E_R E_R^* + |E_O||E_R| [e^{-i\varphi_R} e^{i\varphi_O} + e^{i\varphi_R} e^{-i\varphi_O}] \\ &= |E_O|^2 + |E_R|^2 + |E_O||E_R| [e^{-i\varphi_R} e^{i\varphi_O} + e^{i\varphi_R} e^{-i\varphi_O}] \\ I &= |E_O|^2 + |E_R|^2 + 2|E_O||E_R| \cos(\varphi_O - \varphi_R) \end{aligned} \quad (28)$$

Si se define la magnitud al cuadrado de la onda como la intensidad, y las reemplazamos en la ecuación (28):

$$|E_O|^2 = I_O \quad (29)$$

$$|E_R|^2 = I_R \quad (30)$$

$$|E_O||E_R| = \sqrt{I_O I_R} \quad (31)$$

Se obtiene la intensidad del patrón de interferencia en función de las intensidades de los frentes de onda de la referencia y el objeto

$$I = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\varphi_O - \varphi_R) \quad (32)$$

Y si ahora se definen las siguientes expresiones:

$$a = I_O + I_R \quad (33)$$

$$b = 2\sqrt{I_O I_R} \quad (34)$$

y se reemplazan en la ecuación (32) se obtiene una expresión simplificada para la interferencia de dos ondas:

$$I = a + b \cos(\varphi_O - \varphi_R) \quad (35)$$

Se concluye de la ecuación (35), que el resultado de la interferencia de los dos frentes de ondas es la suma de las intensidades del frente de onda del objeto y de la referencia, y el factor de interferencia. Los términos  $a$ ,  $b$  son la iluminación de fondo y el contraste de las franjas respectivamente.

### 2.4.2 Interferometría Holográfica Digital.

La interferometría holográfica digital es el proceso en el cual se utilizan dos hologramas de un objeto para obtener un patrón de interferencia, el cual indica un estado de deformación. El primer holograma pertenece a un estado inicial o no deformado del objeto en cualquier momento del tiempo, mientras que el segundo holograma corresponde a un estado de deformación del objeto en un instante posterior [29]. De la ecuación (35), se establece un holograma de referencia ( $I_R$ ):

$$I_R = a + b \cos(\varphi_O - \varphi_R) \quad (36)$$

Cuando el objeto ha sufrido una deformación se obtiene un holograma ( $I_D$ )

$$I_D = a + b \cos(\varphi'_O - \varphi'_R) \quad (37)$$

Para obtener las franjas de interferencia, se resta el estado de referencia al estado deformado. Esta operación es conocida como correlación por sustracción [30].

$$\begin{aligned}
I_D - I_R &= a + b \cos(\varphi'_O - \varphi'_R) - a - b \cos(\varphi_O - \varphi_R) \\
I_D - I_R &= b(\cos(\varphi'_O - \varphi'_R) - \cos(\varphi_O - \varphi_R)) \quad (38)
\end{aligned}$$

Utilizando la siguiente identidad trigonométrica en la ecuación (38), resulta:

$$\begin{aligned}
\cos u - \cos v &= -2 \sin\left(\frac{u+v}{2}\right) \sin\left(\frac{u-v}{2}\right) \quad (39) \\
I_D - I_R &= -2b \left[ \sin\left(\frac{(\varphi'_O - \varphi'_R) + (\varphi_O - \varphi_R)}{2}\right) \sin\left(\frac{(\varphi'_O - \varphi'_R) - (\varphi_O - \varphi_R)}{2}\right) \right]
\end{aligned}$$

Como el frente de onda de referencia siempre se mantiene igual, se asume que  $\varphi_R = \varphi'_R$  (se suma y resta  $\varphi_O$  en el numerador del primer término).

$$\begin{aligned}
I_D - I_R &= -2b \left[ \sin\left(\frac{-2\varphi_R + \varphi'_O + \varphi_O}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi'_O - \varphi_O}{2}\right) \right] \\
I_D - I_R &= -2b \left[ \sin\left(\frac{-2\varphi_R + \varphi'_O + \varphi_O - \varphi_O + \varphi_O}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi'_O - \varphi_O}{2}\right) \right] \quad (40)
\end{aligned}$$

Si definimos el cambio de fase entre un estado deformado y uno de referencia,  $\Delta\varphi = \varphi'_O - \varphi_O$ , reescribimos la ecuación (40) y se obtiene:

$$I_D - I_R = -2b \left[ \sin\left(\frac{-2\varphi_R + 2\varphi_O + \Delta\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right] \quad (41)$$

La ecuación (41) describe la intensidad del patrón de interferencia entre dos estados del objeto, un estado de referencia y otro deformado. El primer término de la ecuación contiene la diferencia de fase entre los dos estados y está acompañado por los términos  $-2\varphi_R + 2\varphi_O$  que representan el ruido del efecto del moteado sobre el objeto. En cambio, el segundo término de la ecuación solo



contiene la diferencia de fase y por ende es el término de modulación de las franjas de interferencia.

- **Interferómetro fuera de plano (caso especial en DHI)**

Un interferómetro fuera de plano es un arreglo óptico que puede detectar los desplazamientos perpendiculares a la superficie del objeto. En la figura 18 se muestra un esquemático de este tipo de arreglo óptico.

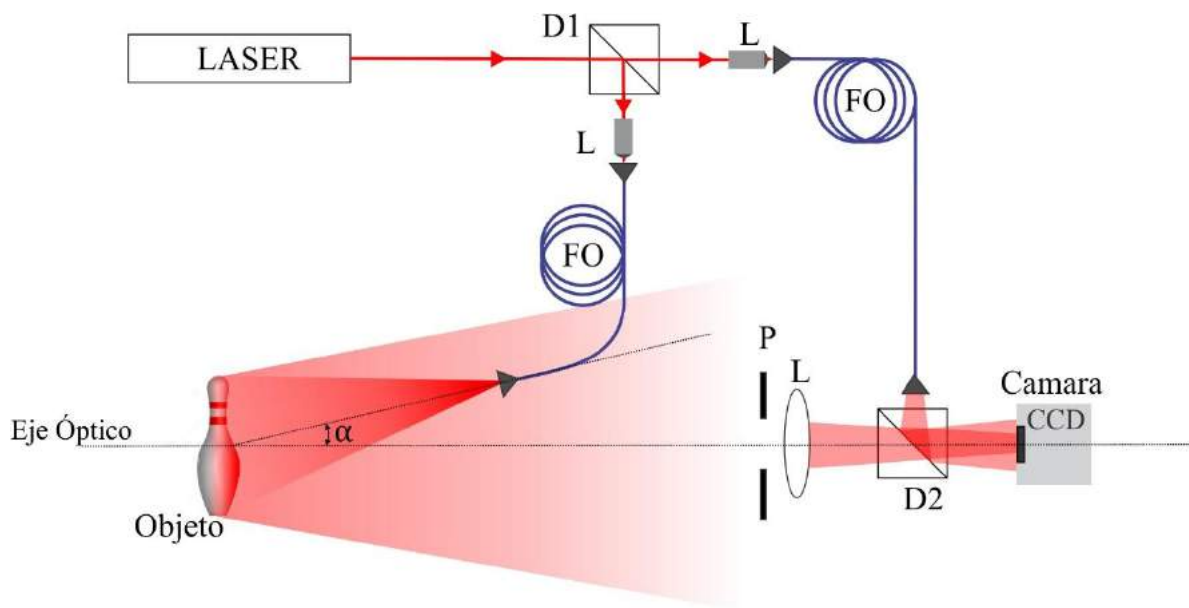


Figura 18: Interferómetro fuera de plano. Las siglas corresponden a: (L) lente, (FO) fibra óptica, (P) pupila, D divisor de haz.

El haz de luz producido por el láser es dividido en dos haces: haz de objeto y haz de referencia, por medio de un divisor de haz (D1). El haz objeto ilumina la muestra bajo estudio y la luz retro esparcida por este se dirige hacia una lente con una pupila P. La lente (L) forma una imagen del objeto en el plano del sensor de la cámara. La luz se recombina con el haz de referencia mediante otro divisor de haz (D2). El ángulo  $\alpha$  que forma el haz objeto y el eje óptico determina la sensibilidad del sistema.

El desplazamiento (d) que experimenta la superficie del objeto está relacionado con el cambio de fase ( $\Delta\phi$ ), la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la fuente de luz y las características geométricas del arreglo óptico. La ecuación (42) relaciona el desplazamiento con el cambio de fase óptica.

$$d = \frac{\lambda}{2\pi(1 + \cos \alpha)} \Delta\phi \quad (42)$$

### 2.4.2.1 Portadora espacial.

El arreglo óptico fuera de plano de la figura 18 sirve para ESPI y DHI, la diferencia entre ambas está en los métodos para obtener la fase óptica. En ESPI se utiliza un piezoeléctrico para obtener por lo menos tres desplazamientos de fase (phase stepping), en cambio, en DHI se utiliza el divisor de haz para introducir una portadora espacial (Fourier). El ángulo del divisor de haz ocasiona que la fase del haz de referencia se modifique (tenga portadora), como se observa en la ecuación (43).

$$I = a + b \cos(\varphi_O - \varphi_R(\theta)) \quad (43)$$

Al introducir esta portadora, se puede observar como los lóbulos en el espectro de Fourier del holograma de imagen se desplazan (ver figura 19).

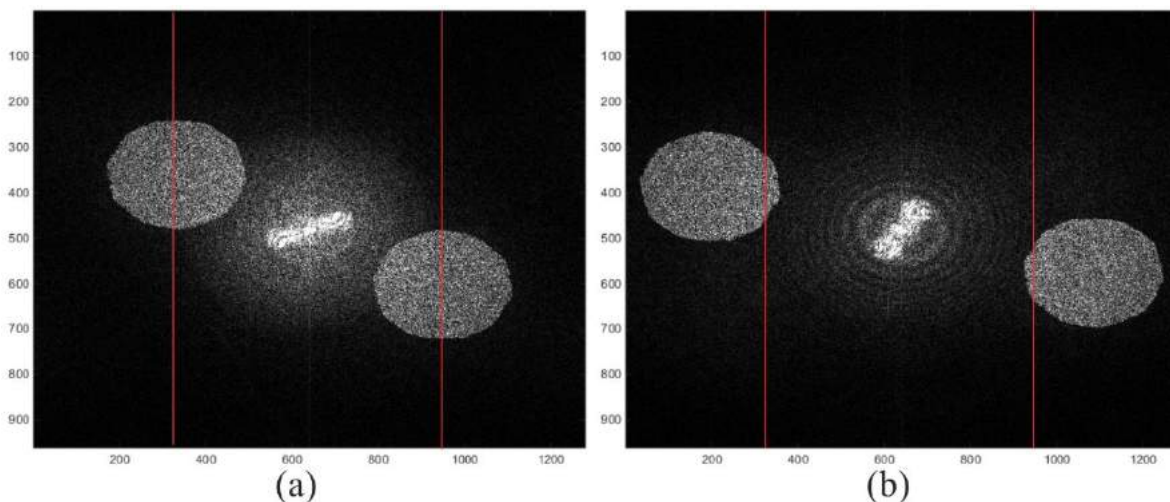


Figura 19: Desplazamiento de los lóbulos debido a la portadora, a) ubicación de los lóbulos para una posición inicial y b) desplazamiento de los lóbulos.

De acuerdo a las propiedades de la transformada de Fourier esto se conoce como traslación en frecuencia, y se define de la siguiente forma. Sea una función  $g(x)$  igual a la función  $f(x)$  por una función coseno.

$$g(x) = f(x) \cos(2\pi u_0 x) \quad (44)$$

En donde ( $u_0$ ) es la frecuencia portadora y ( $x$ ) es la variable independiente. Reemplazando la función coseno por su forma en exponencial compleja, se tiene:

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

Al evaluar la transformada de Fourier para la función  $g(x)$ , como se muestra en la ecuación (45), se obtiene:

$$\begin{aligned} F(g(x)) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} (f(x)e^{i2\pi u_0 x} + f(x)e^{-i2\pi u_0 x}) e^{-i2\pi u x} dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} (f(x)e^{-i2\pi(u-u_0)x}) dx + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} (f(x)e^{-i2\pi(u+u_0)x}) dx \end{aligned} \quad (45)$$

Finalmente se llega a la ecuación (45), la cual indica que la transformada de Fourier de una función  $f(x)$  multiplicada por una función coseno, es la transformada de Fourier de la función  $f(x)$  desplazada simétricamente por la frecuencia de la función coseno.

$$G(u) = \frac{1}{2} F(u - u_0) + \frac{1}{2} F(u + u_0) \quad (45)$$

El resultado de la ecuación (45) se explica gráficamente en la figura 20. La transformada de Fourier de la función  $f(x)$  es  $F(u)$  (ver figura 20-a), pero si la función  $f(x)$  está multiplicada o modulada por un función coseno, la transformada de Fourier de  $f(x)$  será  $F(u-u_0)$  (ver figura 20-b). Por lo tanto al

modificar la frecuencia de la función coseno, se modifica la separación de los lóbulos en la transformada de Fourier.

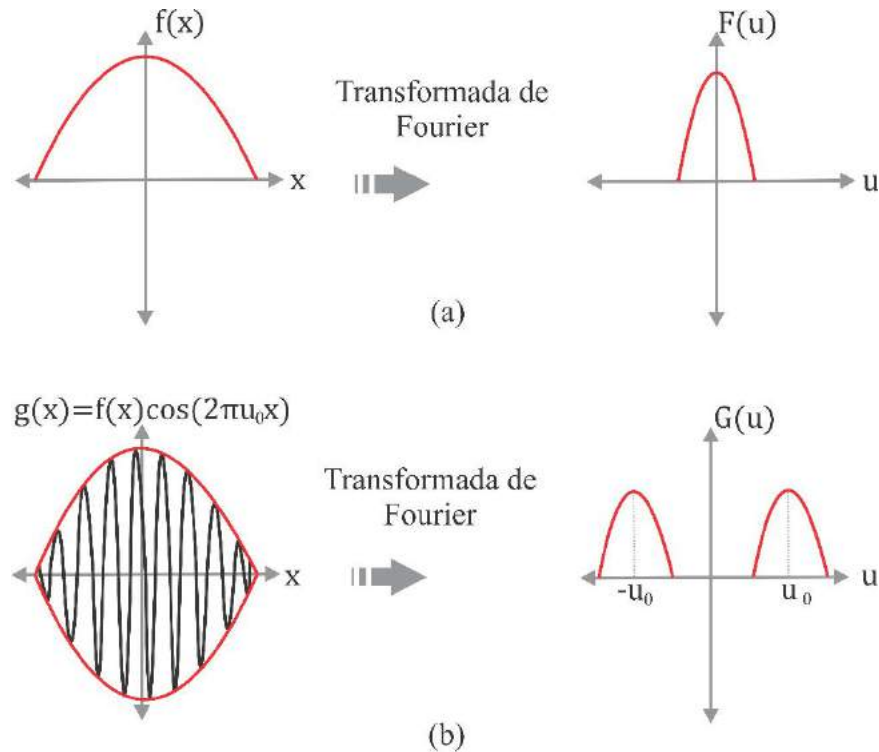


Figura 20. (a) Transformada de Fourier para una función  $f(x)$  y (b) transformada de Fourier aplicando la propiedad de desplazamiento en la frecuencia.

#### 2.4.2.2 Fase óptica.

Para obtener las franjas de interferencia se realiza una correlación como se describió en la ecuación (38). Pero antes se aplica un filtro pasa bandas para eliminar el ruido y aislar la señal de interés. Este filtro está determinado por la pupila y la posición de la portadora espacial. En la figura 21 se ejemplifica este procedimiento. Después de filtrar y aplicar la transformada inversa de Fourier para los hologramas de referencia ( $H_r$ ) y deformado ( $H_d$ ), se obtienen las imágenes  $I_{H_r}$  e  $I_{H_d}$ . Con esta información se puede calcular la fase óptica envuelta mediante [31]:

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \frac{\text{Re}(IH_r)\text{Im}(IH_d) - \text{Im}(IH_r)\text{Re}(IH_d)}{\text{Re}(IH_r)\text{Re}(IH_d) + \text{Im}(IH_r)\text{Im}(IH_d)} \quad (46)$$

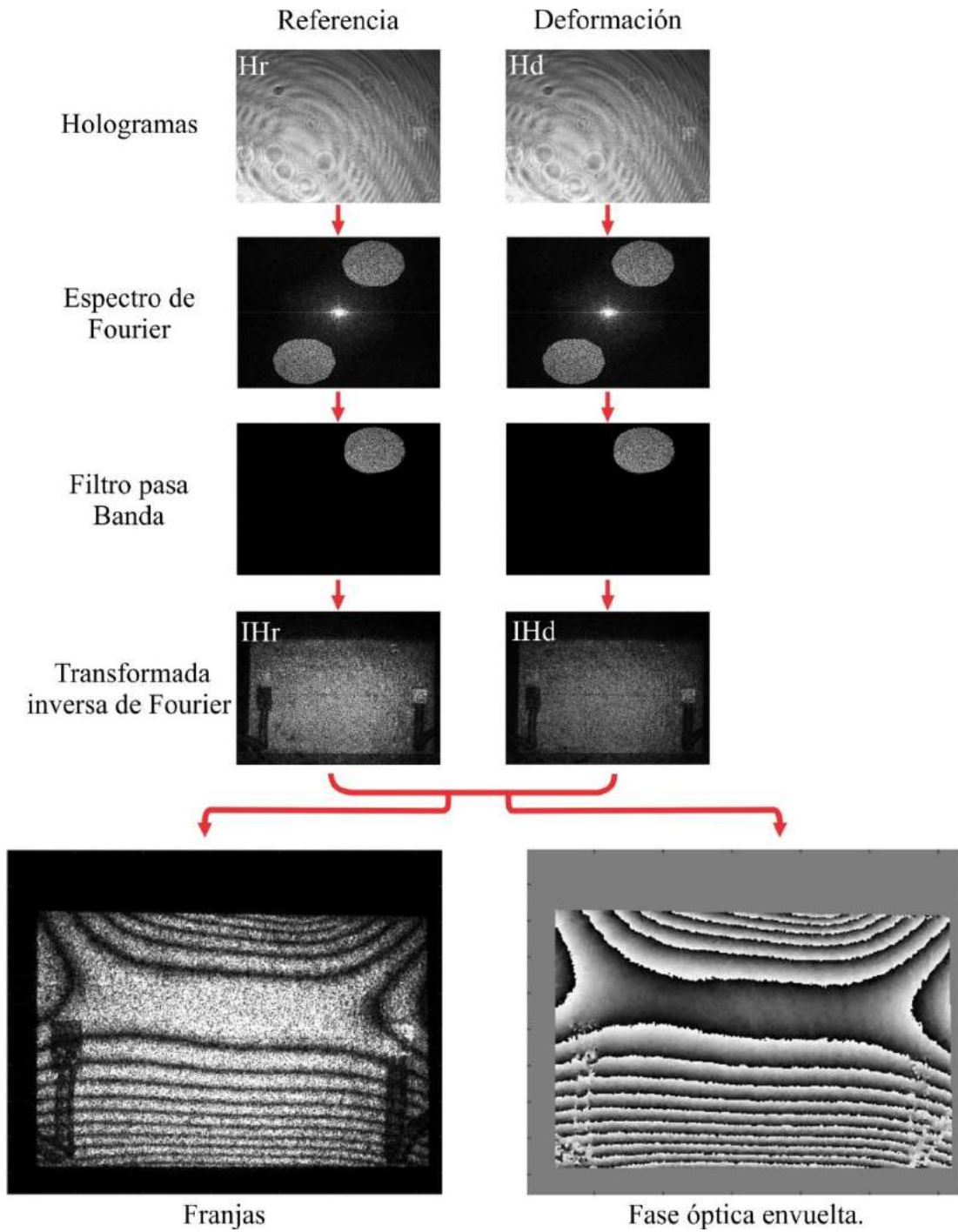


Figura 21: Procesamiento digital de los hologramas para obtener las franjas de interferencia y la fase óptica envuelta.



# CAPITULO III

## 3 Desarrollo experimental.

En este capítulo se describe el diseño de las diferentes partes que componen el prototipo de la máquina de ensayo en compresión. Además se describen algunos ajustes y pruebas que se realizaron para validar el funcionamiento del prototipo.

### 3.1 Diseño mecánico.

El diseño del sistema mecánico se basó en las maquinas universales electromecánicas existentes en el mercado: eXpert 4000 de Admet [32], Model 1 ST de Tinius Olsen [33] y la máquina 5940 de Instron [34]. Estas máquinas están diseñadas para realizar pruebas mecánicas a probetas pequeñas (altura promedio de 20 cm) y sus sistemas mecánicos se fundamentan en el desplazamiento vertical de una cruceta, mediante dos husillos que rotan por la acción de un motor (DC, paso a paso o servomotor). El diseño mecánico del prototipo inició estableciendo los requerimientos que debía tener la máquina para usarse en pruebas ópticas no destructivas (ver Tabla 2).

<b>Requerimiento</b>	<b>Valor</b>
<b>Tipo de prueba mecánica</b>	Compresión
<b>Fuerza aplicada y medida</b>	$\leq 300$ libras de fuerza (1334.47 N)
<b>Tamaño máximo de la probeta a medir</b>	$7 \times 8.7 \times 2.54$ cm (altura, ancho y espesor)
<b>Bajo peso</b>	Peso máquina $< 10$ Kg
<b>Altura</b>	Altura $< 60$ cm

Tabla 2: Requerimientos para el prototipo de la máquina de ensayo en compresión.

### 3.1.1 Marco estructural.

El marco estructural está compuesto por dos columnas o perfiles de aluminio que sujetan dos soleras del mismo material en sus extremos. En cada solera se agregó una placa de acrílico que sirve para sujetar dos rodamientos que se utilizan para que los tornillos (M10) giren. En la placa inferior de acrílico se dejó un nicho para la celda de carga y en el soporte inferior se agregaron 8 barrenos para sujetar la máquina a la mesa holográfica. Para desplazar la cruceta verticalmente hacia arriba o hacia abajo se utilizaron dos tornillos (M10) milimétricos de paso 1.5 y diámetro de 10 mm.

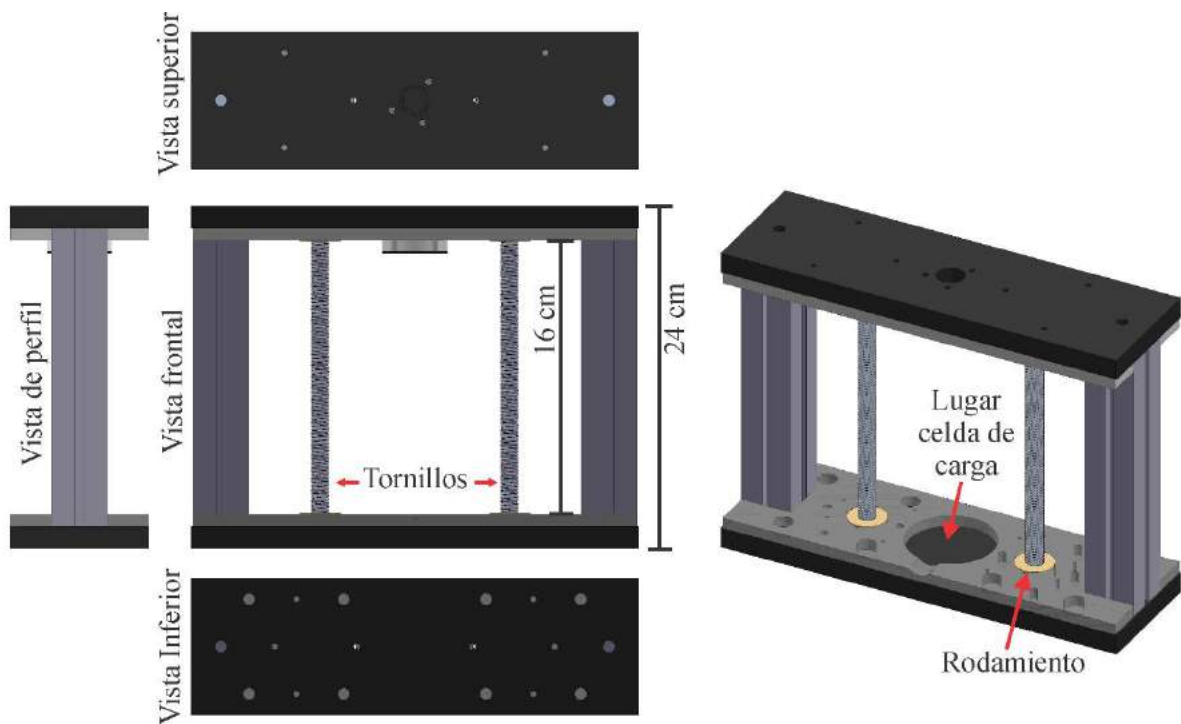
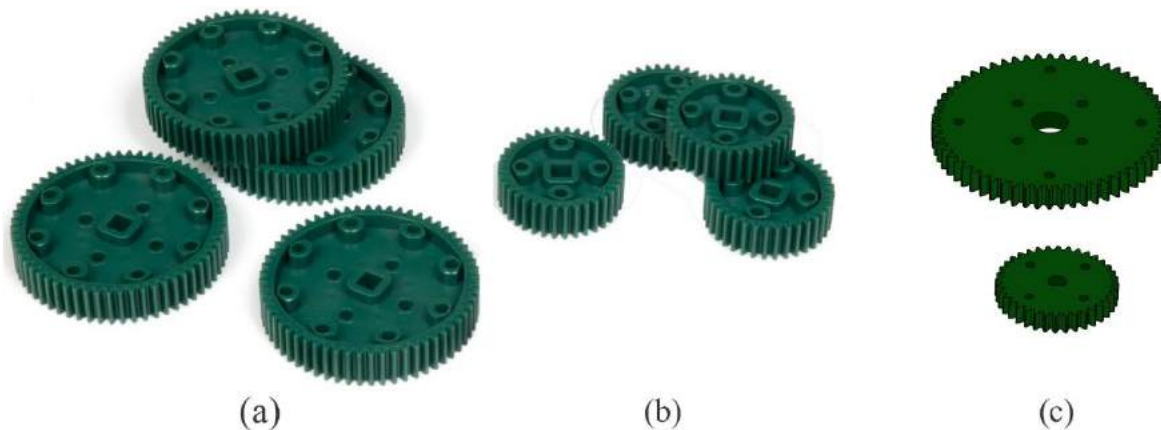


Figura 22: Diseño del marco estructural para el prototipo.

### 3.1.2 Sistemas de engranes y transferencia de fuerza.

Para transmitir el movimiento del motor a los tornillos (M10) se utilizaron engranes plásticos, construidos en impresión 3D. El diseño de los engranes fue una modificación de los engranes de alta resistencia de uso en robótica, como se observa en la figura 23-a y figura 23-b.





*Figura 23: Engranos de (a) 60 dientes, (b) 36 dientes de alta resistencia, y (c) modificación de los engranes para la impresión 3D.*

Las modificaciones que se realizaron fueron remover los relieves y reducir a la mitad el espesor de los engranes, con el objetivo de simplificar la impresión 3D, como se aprecia en la figura 23-c. Se utilizaron tres engranes en el prototipo, uno de 36 y dos de 60 dientes. El engrane de 36 dientes se utilizó para el motor y los dos engranes de 60 dientes se utilizaron en los tornillos que desplazan la cruceta. El desplazamiento de la cruceta se obtiene con el valor numérico del paso del tornillo y la relación de transmisión entre los dos engranes. El paso del tornillo indica el desplazamiento lineal de la tuerca cuando el tornillo da una vuelta completa, que este caso para el tornillo M10 el paso es de 1.5 mm. La relación de transmisión entre los dos engranes establece la relación de giro de un engrane cuando el otro engrane da una vuelta completa (para el caso de dos engranes). La relación de transmisión para los engranes de 36 y 60 dientes es de  $3/5$ . De acuerdo a esto, cuando el engrane de 36 dientes de una vuelta completa, el engrane de 60 dientes gira  $3/5$  de vuelta y la cruceta se desplaza 0.9 mm ( $1.5\text{mm} \times 3/5$ ).

Para sujetar los engranes de 60 dientes a los tornillos se utilizaron dos tuercas para tornillo (M10). El engrane se ubicó en la mitad de las tuercas y estas se giraron en sentido contrario una de la otra, de tal manera que hicieran presión contra el engrane. Además se agregó una pieza de acrílico para sujetar el engrane a la tuerca inferior y asegurar que el tornillo y el engrane giren al mismo tiempo. En la figura 24-a y figura 24-b se observa la forma de sujetar el engrane

al tornillo (M10). Para el engrane de 36 dientes se diseñó un soporte que sujeta el engrane con el eje del motor DC, como se observa en la figura 24-c y figura 24-d.

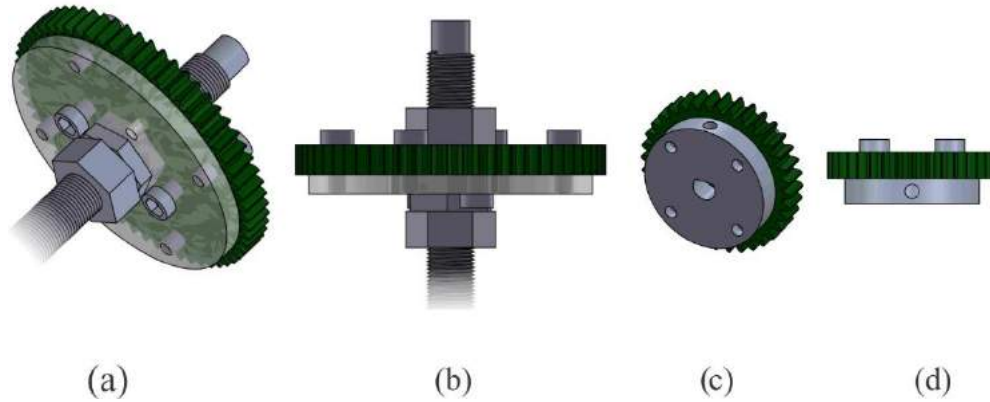


Figura 24: vista en (a) perspectiva y (b) lateral del soporte de los engranes de 60 dientes, vista en (c) perspectiva y (d) lateral del soporte para el engrane de 30 dientes.

### 3.1.3 Análisis de la fuerza de compresión (fuerza axial) y selección del motor DC.

Para cumplir con el requerimiento de la fuerza máxima de 300 lb-f y elegir un motor DC que la alcance, se realizó un análisis de las fuerzas que actúan entre los engranes y los tornillos (M10) que desplazan la cruceta. En figura 25 se observa la relación entre las fuerzas que interactúan en dos engranes rectos. El motor DC hace mover el engrane 1 con un torque ( $T_1$ ) y una fuerza ( $F_1$ ). El torque ( $T_1$ ) se transmite al engrane 2 y genera un torque ( $T_2$ ). La relación entre los torques ( $T_1$ ) y ( $T_2$ ) se debe a la fuerza que ejerce el engrane 1 sobre el engrane 2 y la fuerza que ejerce el engrane 2 sobre el engrane 1, estas dos fuerzas son iguales pero en sentido contrario de acuerdo a la tercera ley de Newton [35].

En la ecuación (49) se establece esta igualdad y en la ecuación (50) se obtiene la relación entre los torques ( $T_1$ ) y ( $T_2$ ), y se concluye que el torque ( $T_2$ ) es afectado por la relación del tamaño de los engranes.

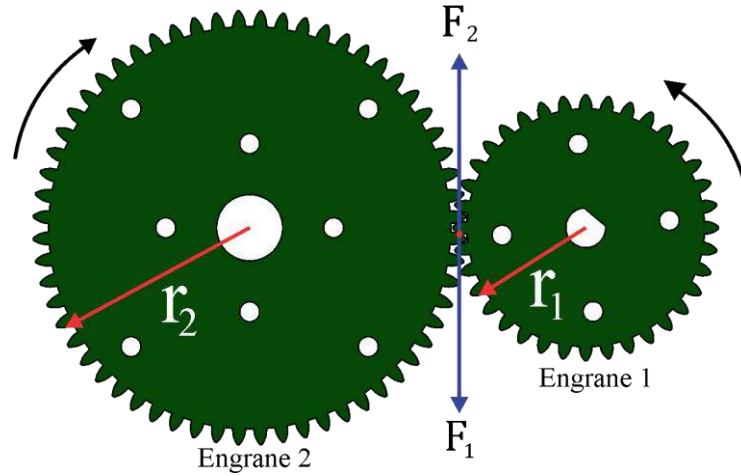


Figura 25: Relación de fuerzas entre dos engranes.

$$T_2 = F_2 \times r_2 \quad (47)$$

$$T_1 = F_1 \times r_1 \quad (48)$$

$$F_1 = -F_2 \quad (49)$$

$$\frac{T_1}{r_1} = -\frac{T_2}{r_2} \quad (50)$$

Ahora, se busca la relación entre el torque ( $T_2$ ) y la fuerza axial ( $F_{axial}$ ) del tornillo que será transmitida a la cruceta. En la figura 26 se muestra la fuerza axial producida por el torque ( $T_2$ ). Esta fuerza axial para un tornillo sin perfil cuadrado se obtiene de: [36].

$$F_{axial} = \frac{2T_2}{d_m} \cdot \left( \frac{\pi d_m + \mu_r l \sec \theta}{\pi \mu_r d_m \sec \theta - l} \right) \quad (51)$$

Donde ( $\mu_r$ ) es el coeficiente de rozamiento entre el tornillo y la cruceta, ( $2\theta$ ) es el ángulo de la rosca, ( $d_m$ ) es el diámetro del tornillo, ( $l$ ) es el avance del tornillo [37] y ( $T_2$ ) es el torque que genera el engrane de 60 dientes. Al despejar el torque  $T_2$  de las ecuaciones (50) y (51) e igualando ambas, se halla el valor del torque  $T_1$  que debe ejercer el motor DC para alcanzar una fuerza de 300 lb-f, como se observa a continuación:

$$T_2 = -\frac{T_1 r_2}{r_1} \quad (52)$$

$$T_2 = \frac{d_m F_{axial}}{2} \cdot \left( \frac{\pi \mu_r d_m \sec \theta - l}{\pi d_m + \mu_r l \sec \theta} \right) \quad (53)$$

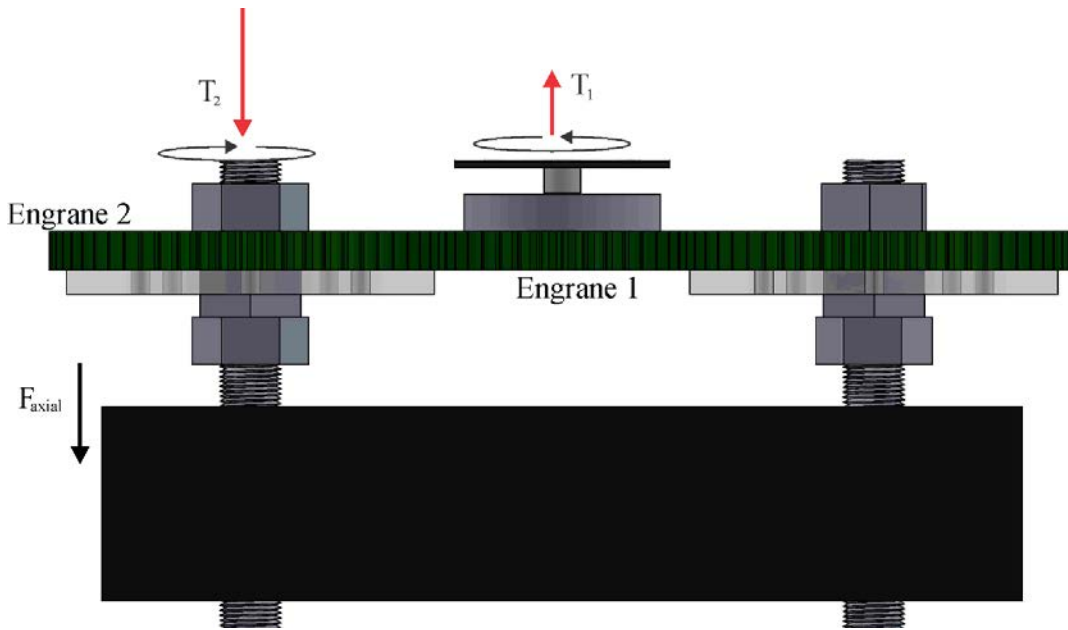


Figura 26: Fuerza axial producida por el torque  $T_2$ .

La ecuación (52) proporciona el valor de  $T_2$  que depende de la acción del motor DC y la relación de los radios de los engranes. En cambio, la ecuación (53) provee el valor de  $T_2$  que depende de la fuerza axial ejercida por la cruceta y los parámetros mecánicos que hay entre la cruceta y el tornillo. Como el valor del torque 2 ( $T_2$ ) debe ser igual en ambas expresiones, se igualan las expresiones (52) y (53).

$$-\frac{T_1 r_2}{r_1} = \frac{d_m F_{axial}}{2} \cdot \left( \frac{\pi \mu_r d_m \sec \theta - l}{\pi d_m + \mu_r l \sec \theta} \right) \quad (54)$$

Al despejar  $T_1$  de la ecuación (54), se obtiene la relación entre la fuerza axial máxima a ser aplicada (300 lb-f) y el torque 1 ( $T_1$ ) que debe ejercer el motor DC, y que se muestra en la ecuación (55).

$$-T_1 = \frac{r_1}{r_2} \frac{d_m F_{axial}}{2} \cdot \left( \frac{\pi \mu_r d_m \sec \theta - l}{\pi d_m + \mu_r l \sec \theta} \right) \quad (55)$$

Para calcular este valor se toman en cuenta los parámetros que se listan en la Tabla 3 que al sustituirlos en la ecuación (52) obtiene el valor torque1 ( $T_1$ ) que debe ejercer el motor de DC.

Parámetro	valor
$r_1$	38.24 mm
$r_2$	63.29 mm
$d_m$	9.026 mm
$F_{axial}$	300 lb-f = 1334.47 N
$\mu_r$	0.1 [36]
$\theta$	30°
$l$	1.5

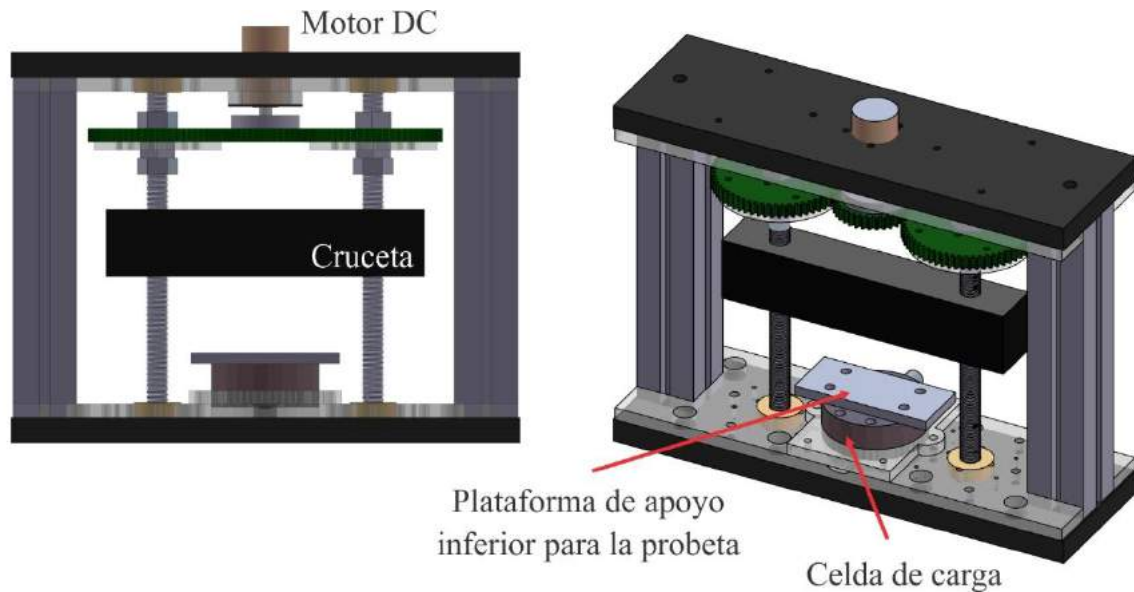
Tabla 3: Parámetros que modifican el valor del torque  $T_1$ .

$$-T_1 = \frac{38.24}{63.29} \cdot \frac{9,026 \times 1334.47}{2} \cdot \left( \frac{\pi \times 0.1 \times 9,026 \times \sec 30 - 1.5}{\pi \times 9,026 + 0.1 \times 1.5 \times \sec 30} \right)$$

$$-T_1 = 226,3 \text{ N. mm} = 2,3 \text{ Kg cm}$$

El signo negativo del torque  $T_1$ , indica que la dirección es opuesta a la dirección del torque  $T_2$ . Por lo tanto, el motor DC que cumple con esta especificación fue el TG-01F-FU-509 de la empresa Tsukasa, que tiene las siguientes características: voltaje de operación de 24V, consumo de corriente de 33 mA sin carga y 300 mA con carga y un torque de 3Kg-cm. Para terminar con el diseño del prototipo se agregaron: los engranes, el motor DC, la cruceta y la celda de carga con la plataforma de apoyo inferior para la probeta, como se

observa en la figura 27. Para lograr un acople entre la cruceta y la probeta, la celda de carga se colocó con el botón de carga tocando la base inferior del prototipo.



*Figura 27. Diseño completo del prototipo.*

### **3.2 Diseño Electrónico.**

A continuación se describe todo el diseño electrónico que se realizó para controlar el prototipo de la máquina. En la figura 28 se muestra un diagrama de bloques con los elementos necesarios del diseño electrónico para el prototipo. Las líneas rojas indican la transferencia de datos, mientras que las negras indican el suministro de energía, Y los bloques trazados de color rojo son los diseños electrónicos que se realizaron. El diseño está compuesto por: un circuito para acondicionar la señal de la celda de carga, una fuente de voltajes que suministra la energía al motor DC y a la celda de carga, un controlador de potencia para el giro y velocidad del motor DC, señales lumínicas para dar información del funcionamiento de la máquina y un microcontrolador encargado de digitalizar la señal de la celda de carga, enviar y recibir datos a la computadora y enviar señales al controlador de potencia.

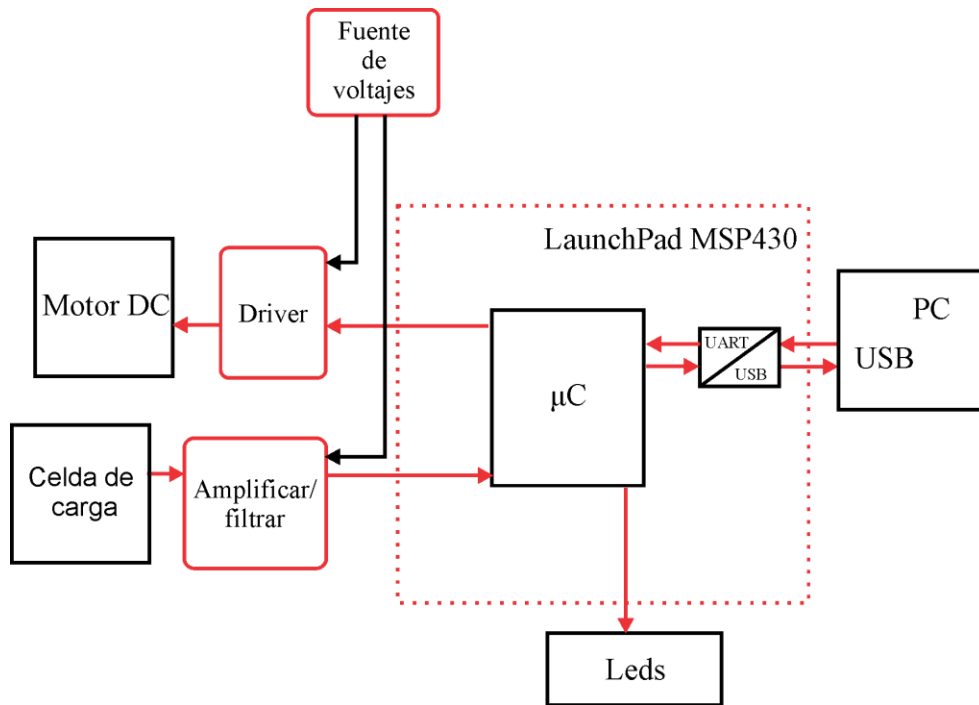


Figura 28: Diagrama de bloques para el diseño electrónico del prototipo.

### 3.2.1 Acondicionamiento de la señal en la celda de carga.

El diseño básico para realizar el acondicionamiento de una señal eléctrica de un sensor consiste de las siguientes etapas [38]: amplificación, filtrado y conversión de voltaje Analógico/Digital, como se ilustra en la figura 29.

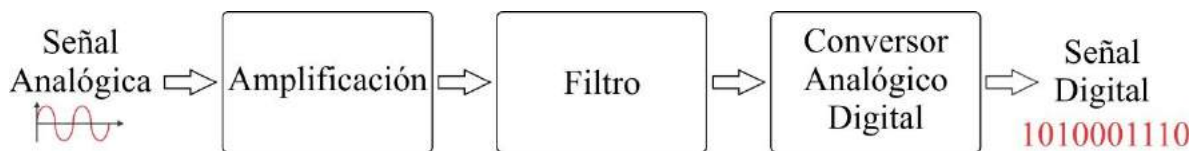
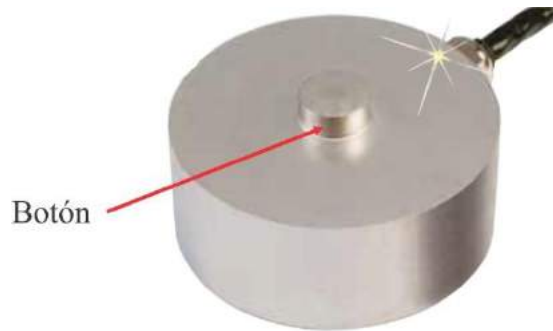


Figura 29: Diagrama básico para digitalizar una señal análoga.

El sensor que se utilizó para detectar la fuerza aplicada por la cruceta, es una celda de carga de la marca Omega Serie LC305. Este tipo de celda se conoce

comúnmente como celda de botón, porque tiene uno en la parte superior que sirve para posicionar la fuerza que se desea medir. En la figura 30 se observa la celda de carga que se utilizó en el prototipo.



*Figura 30: Celda de carga.*

Las características que tiene la celda de carga son las siguientes:

- Salida= 2mV/V.
- Voltaje de alimentación=10 V.
- Rango de la señal de salida = Salida por el Voltaje de alimentación= 20 mV
- Rango de Medición= 300 lb-f
- Sobrecarga segura= 150% de la carga

### **3.2.1.1 Amplificación de la señal de la celda de carga.**

Según las características de la celda de carga, para 300 lb-f el voltaje de salida es 20 mV. Como la celda de carga puede soportar una sobrecarga sin daño de 450 lb-f (150% de la carga), se decidió obtener un rango de medición de 380 lb-f, por lo que el voltaje de salida de la celda a escala completa es de 25,3 mV. De acuerdo a lo anterior, se amplificó el voltaje de la celda de 25,3 mV a 2.5V, para obtener un rango útil para un conversor analógico/digital. Así, el factor de ganancia (G) para amplificar el voltaje de la celda de carga se establece por la ecuación (56) como:



$$G = \frac{\text{Voltaje de salida del amplificador}}{\text{Voltaje de salida celda de carga a escala completa}} \quad (56)$$

$$G = \frac{2,5 \text{ V}}{25,3\text{mV}} = 98,8$$

El factor de ganancia es un requisito para la selección del amplificador. De acuerdo a [39], [40], el amplificador que se utiliza para acondicionar una celda de carga es un amplificador de instrumentación, debido a su alto rechazo en modo común (CMRR) y la gran impedancia en la entrada. Así, el amplificador que se utilizó fue el INA 128 y sus características más relevantes son.

Parámetro	Valor
<b>Ganancia</b>	$G \leq 1000; 1 + \frac{50\text{K}\Omega}{R_G}$
<b>Voltaje de alimentación</b>	$\pm 18\text{V}$
<b>CMRR</b>	120 dB

Tabla 4: Características del amplificador INA 128.

De acuerdo a la Tabla 4, el factor de ganancia (G) está determinado por la ecuación (57):

$$G = 1 + \frac{50\text{K}\Omega}{R_G} \quad (57)$$

donde, la resistencia de ganancia es ( $R_G$ ) y  $50 \text{ K}\Omega$  es una constante. Despejando  $R_G$  de la ecuación (57) se determinó el valor de la resistencia para ajustar el factor de ganancia a 99,8.

$$R_G = \frac{50\text{k}\Omega}{G - 1} \quad (58)$$

$$R_G = \frac{50\text{k}\Omega}{99,8 - 1} = 506,07\Omega$$

El valor de la resistencia  $R_G$  no es un valor comercial, por lo tanto se utilizó una resistencia de  $510 \Omega$ . En la figura 31 se observa el diseño del circuito para amplificar y eliminar el ruido en modo común proveniente de la celda de carga.

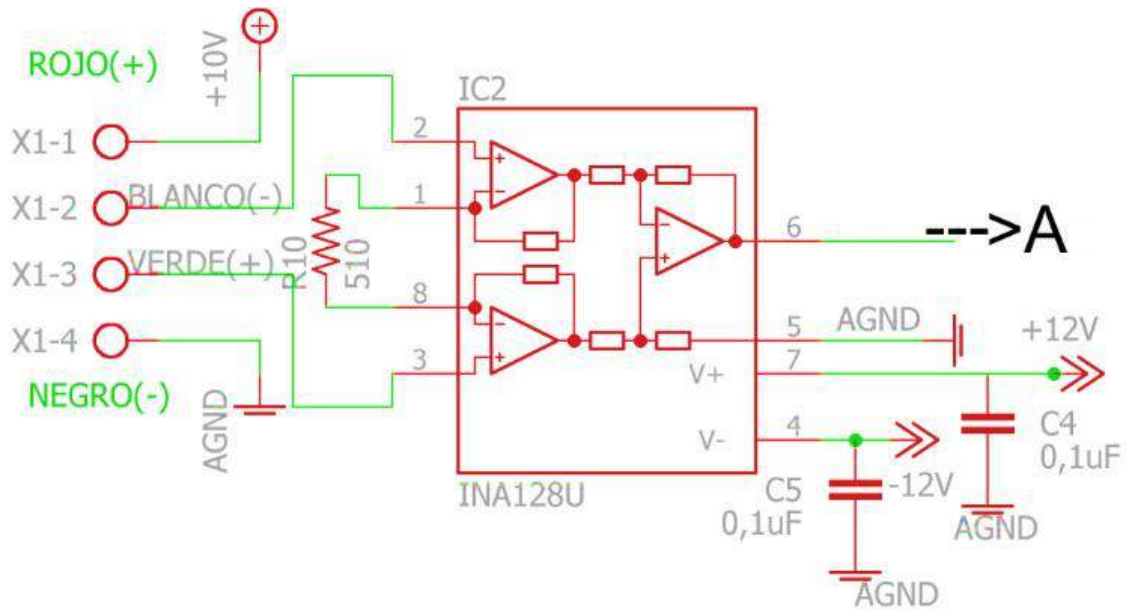


Figura 31: Diseño del circuito de amplificación.

Nota: los dibujos dentro del recuadro rojo, solo indican la configuración interna del circuito integrado INA128.

### 3.2.1.2 Filtraje de la señal de la celda de carga.

Un filtro pasa bajas sirve para eliminar ruido de alta frecuencia como es el ruido de la red eléctrica y otros. Para realizar el diseño de un filtro pasa baja es necesario fijar el parámetro de la frecuencia de corte. La frecuencia de corte determina el valor máximo de las frecuencias que pasan por el filtro pasa baja sin ser atenuadas. Para nuestro diseño, la frecuencia de corte fue de 10Hz, eliminando la mayor cantidad de ruido proveniente de las frecuencias de 50 Hz y 60 Hz [41]. Se utilizó un filtro pasa-bajas *Butterworth* de segundo orden con arquitectura múltiple de realimentación (MFB). En la figura 32-a se observa el diagrama del circuito eléctrico para el filtro y en la figura 32-b se observa su respuesta para diferentes valores de calidad (Q) y una frecuencia de corte de 2.5 Hz.

El factor de calidad (Q) [42] es una medida para la selectividad del filtro, pero en un filtro pasa baja modifica la zona de transición alrededor de la

frecuencia corte. Un valor ideal de  $Q$  para un filtro de segundo orden *Butterworth* es de 0,7. Los filtros MFB tienen la ventaja de ser menos sensibles a variaciones de los valores de los componentes electrónicos [43]. A continuación se presentan las ecuaciones (59)-(63) que establecen los valores de los componentes eléctricos del filtro pasa bajas.

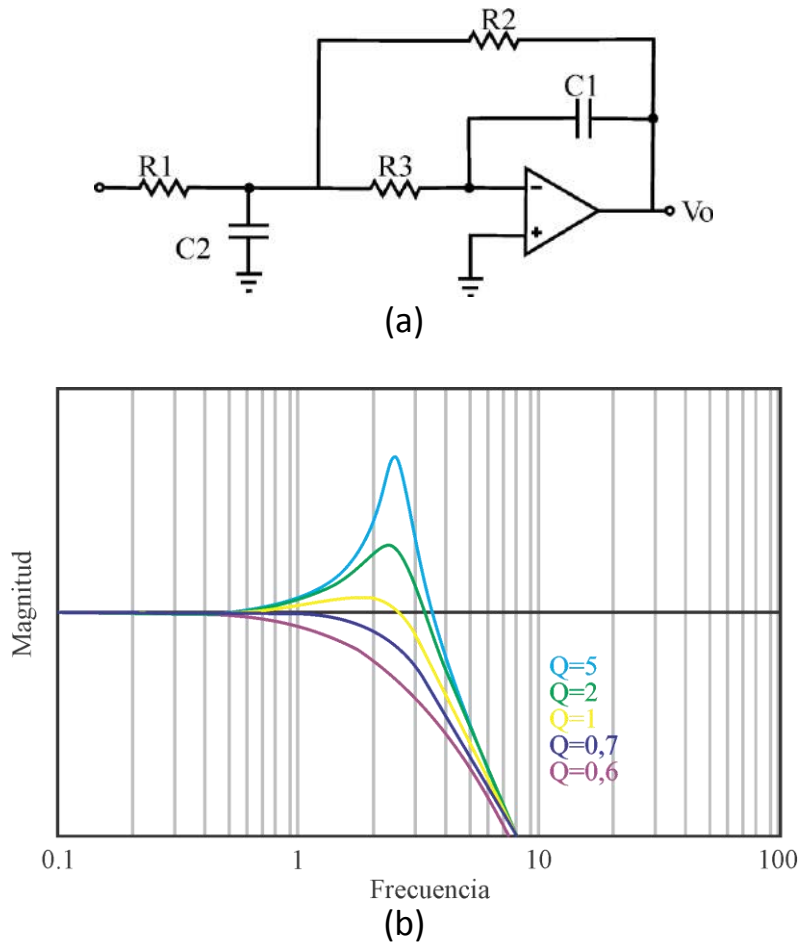


Figura 32: (a) Diagrama del circuito de un filtro pasa baja de segundo orden, arquitectura MFB y (b) respuestas en frecuencia de un filtro pasa baja para diferentes valores de  $Q$ .

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1 \sqrt{mn}} \quad (59)$$

$$R_2 = R_1 \quad (60)$$

$$R_3 = mR_1 \quad (61)$$

$$C_2 = nC_1 \quad (62)$$

$$K = -1 \quad (63)$$

La frecuencia de corte es ( $f_c$ ), ( $m$ ) y ( $n$ ) son los parámetros para determinar la selectividad del filtro (factor  $Q$ ), la ganancia del filtro ( $K$ ), resistencia ( $R$ ) y capacitancia ( $C$ ). Para nuestro diseño, el valor de la frecuencia de corte ( $f_c$ ) es de 10 Hz, los parámetros ( $m$ ) y ( $n$ ) son 0.222 y 4.7, y el condensador 1 ( $C_1$ ) es de 0.1  $\mu$ F.

$$R_1 = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 0.1 \times 10^{-6} \times \sqrt{0.222 \times 4.7}} = 155.8 \text{ K}\Omega$$

$$R_2 = R_1 = 155.8 \text{ K}\Omega$$

$$R_3 = mR_1 = 34.6 \text{ K}\Omega$$

$$C_2 = nC_1 = 0.47 \text{ }\mu\text{F}$$

Hay que aclarar que los valores obtenidos para las resistencias no son comerciales, por lo tanto se realizaron los siguientes cambios: La resistencia ( $R_1$ ) se reemplazó por dos resistencias en serie de 100K $\Omega$  y 56K $\Omega$ . Y la resistencia de 34.6K $\Omega$  se reemplazó por una resistencia comercial de 34.5K $\Omega$ . Se agregó a la salida del filtro una etapa de amplificación en configuración inversor de ganancia unitaria, debido a la salida negativa del filtro. Así, se obtuvo un valor positivo para el conversor analógico/digital. El amplificador que se utilizó para esta etapa fue el OPA177 de Texas Instruments.

En la figura 33, se observa el diseño del circuito para filtrar la señal proveniente del amplificador de instrumentación que incrementa la señal de la celda de carga. La señal proveniente del circuito amplificador entra por la línea A y la salida filtrada se dirige al conversor analógico/digital por la línea C. Se agregaron otros componentes pasivos al circuito para lograr un desacople de baja impedancia en la conexión a tierra, evitando ruido de bajas frecuencia [44]. Por ejemplo, se agregaron condensadores cerámicos de 0.1  $\mu$ F en los pines de alimentación de los circuitos integrados amplificadores.

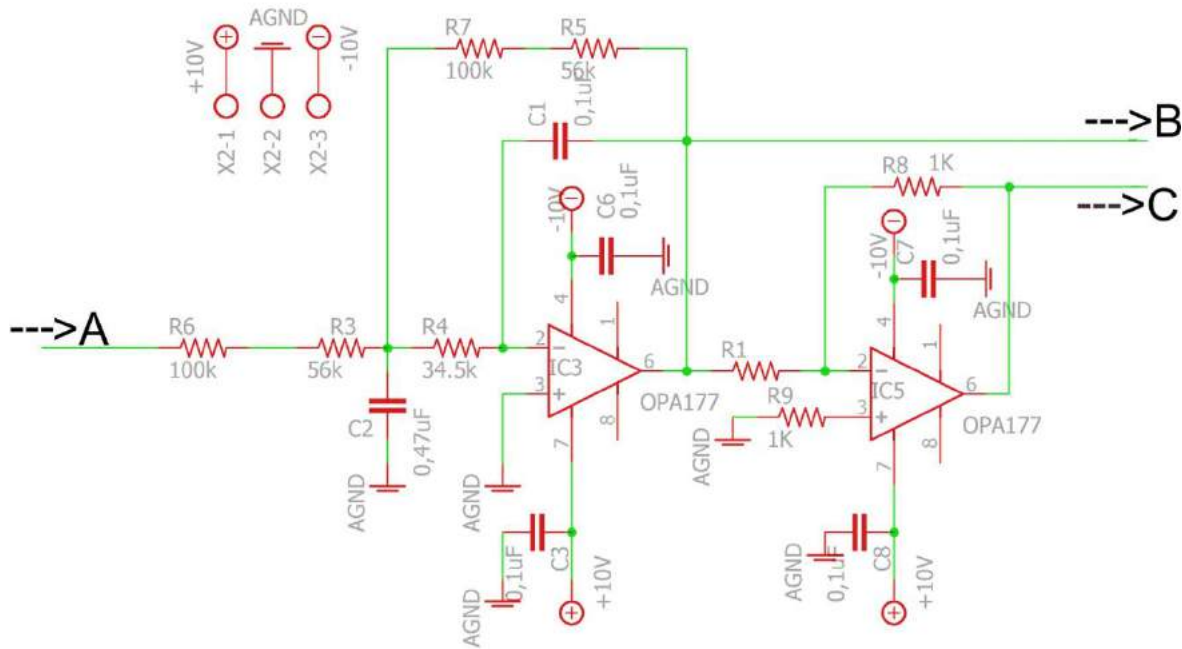


Figura 33: Diseño del circuito filtro pasa bajas.

### 3.2.1.3 Conversor Analógico/Digital.

Los requerimientos básicos para elegir un conversor analógico/digital son: el número de bits que establece la resolución mínima de la conversión; tasa de muestreo máxima que establece la frecuencia máxima para la cual no hay *aliasing*; el voltaje de alimentación y el tipo de las entradas analógicas (entrada simple o diferencial) [45]. A continuación se describen los métodos para determinar las características básicas del conversor analógico/digital que requiere el prototipo. La ecuación (64) determina el número de bits para una conversión análoga digital [46].

$$\text{Numero de bits} = \log_2 \left( \frac{V_{\text{ref}}}{\text{Ruido maximo del sistema}} \right) \quad (64)$$

En donde, el ruido máximo del sistema (o variación de voltaje) proviene de los componentes eléctricos y electrónicos. El voltaje de referencia del conversor analógico/digital es ( $V_{\text{ref}}$ ) que es el ruido que no se pudo filtrar en la etapa anterior. En la Tabla 5 se muestran los componentes que pueden generar mayor

cantidad de ruido en el circuito para acondicionar la señal de la celda de carga. Cabe aclarar que la celda de carga genera un ruido de 5  $\mu\text{V}$  (valor experimental obtenido a partir de la medida del voltaje de la celda con un osciloscopio) que es eliminado por el amplificador de instrumentación a causa del rechazo en modo común que tiene este. Por lo tanto, se tiene en cuenta la variación del 0.25% en el voltaje de salida de la celda de carga especificada por el fabricante en la hoja de datos.

<b>Componente</b>	<b>Ruido (Volts)</b>
<b>INA 128, amplificador de instrumentación</b>	10nV
<b>OPA 177, amplificador operacional</b>	150 nV
<b>Celda de Carga</b>	25.3 mV ( $\pm 0.25\%$ ) $\approx \pm 63.2\mu\text{V}$ , Después de pasar por el amplificador de instrumentación $\pm 63.2\mu\text{V} \times 98,8 = 6.24\text{mV}$

*Tabla 5: Ruido producido por algunos componentes del diseño electrónico para el acondicionamiento de la celda de carga.*

El voltaje de referencia ( $V_{\text{ref}}$ ) elegido fue de 2.5 V, un valor estandarizado en los conversores análogo digital. Por lo tanto, remplazando los valores de la Tabla 5 y el voltaje de referencia, el número de bits es:

$$\text{Numero de bits} = \log_2 \left( \frac{2.5 \text{ V}}{6.24 \text{ mV}} \right) = 8.64 \text{ bits}$$

La tasa de muestro se determinó a partir de 2 veces la frecuencia de corte ( $f_c$ ) del filtro pasa bajas, cumpliendo con el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon [47].

$$\text{Tasa de muestreo} = 2f_c = 2 \times 10 \text{ Hz} = 20 \text{ Hz}$$

Por último se eligieron los parámetros de voltaje y tipo de entrada analógica con valores comerciales. Estos son; voltaje de alimentación de 5V y entrada

analógica simple. En la Tabla 6 se reúnen las características que debe tener el conversor analógico/digital.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Numero de bits</b>	8.64 bits
<b>Tasa de muestreo</b>	20 Hz
<b>Voltaje de alimentación</b>	5 V
<b>Entrada analógica</b>	Simple.

*Tabla 6: Características básicas de un conversor analógico/digital, a partir de los requerimientos de diseño.*

Se decidió utilizar el microcontrolador MSP430-F5590 porque tiene un conversor análogo digital que cumple con las características enunciadas anteriormente.

### **3.2.2 El microcontrolador.**

Fue necesario utilizar un dispositivo capaz de controlar la velocidad del motor DC, transferir la información a la computadora y realizar la adquisición de datos provenientes de la celda de carga. Este dispositivo fue un microcontrolador. Se utilizó un microcontrolador general, el MSP430-f5529 de la empresa Texas Instruments. En la Tabla 7 se listan las características del microcontrolador para el diseño del prototipo.

Para obtener un diseño modular del prototipo, se utilizó una tarjeta de evaluación para el microcontrolador MSP430-f5529, (ver figura 34). Esta tarjeta es la *LaunchPad* MSP430 y tiene las siguientes características: sistema para depurar, programador, regulación de voltaje, electrónica necesaria para el funcionamiento del microcontrolador y comunicación USB. En el microcontrolador se utilizaron las siguientes características para controlar las diferentes partes del prototipo. Se utilizó un temporizador para generar la señal PWM (*pulse-width modulation*) que controla la potencia suministrada al motor DC. El conversor analógico/digital se empleó para digitalizar la señal de voltaje de la celda de carga. Además, se utilizaron los puertos de entrada/salida para

controlar algunas señales lumínicas, que indican la dirección del movimiento de la cruceta, sobrecarga en la celda y movimiento del motor.

<b>Características</b>	<b>descripción</b>
<b>Frecuencia de reloj</b>	25 MHz
<b>Memoria de programa</b>	128 M
<b>Convertor Analógico/Digital</b>	12 bits (Numero de bits)
	200-kcps (Tasa de muestreo)
	3.3V (Alimentación)
	Entrada simple y diferencial
<b>Temporizadores</b>	4 de 16 bits
<b>Comunicación</b>	USB, UART ,SPI, I2C
<b>Pines de entrada/salida</b>	60

*Tabla 7: Características del microcontrolador MSP430-f5529.*



*Figura 34: Módulo de evaluación LaunchPad MSP430.*

Finalmente se utilizó la UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) para transferir la información entre la computadora y el microcontrolador. En la figura 35 se muestra el funcionamiento del microcontrolador en el diseño del prototipo.



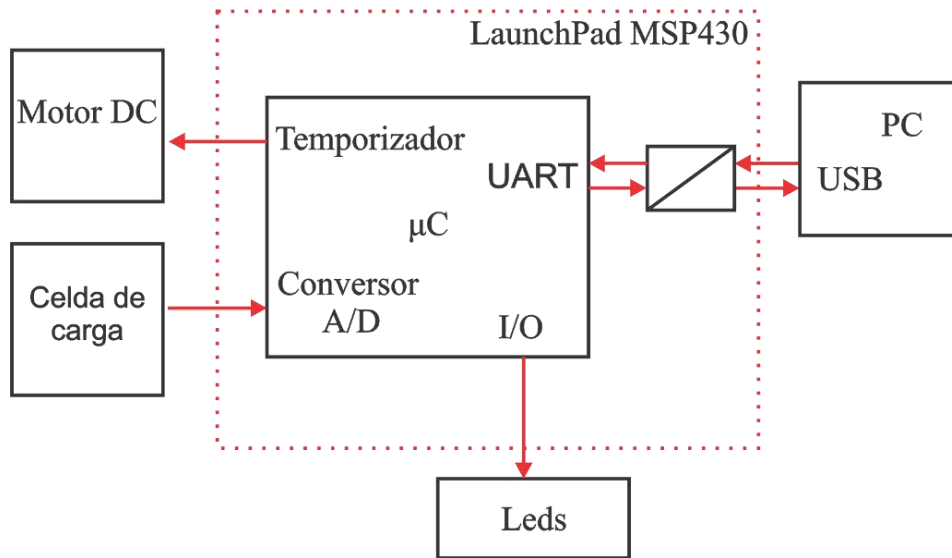


Figura 35: Diagrama de bloques del funcionamiento del microcontrolador en el prototipo.

### 3.2.3 Controlador de potencia para el motor DC.

El controlador de potencia es un módulo que está entre el microcontrolador y el motor DC, encargado de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del motor. Además este módulo permite realizar el cambio de giro del motor DC. En la figura 36 se observa el diseño del circuito electrónico, la sección A es la conexión con el microcontrolador, la sección B es para aislar las conexiones a tierra y la sección C es para el circuito L298. El elemento principal de este módulo es un circuito puente H, llamado así porque su diagrama esquemático forma una letra H [48]. Hay diferentes formas de realizar este circuito, con transistores BJT y transistores FET. Incluso existen circuitos integrados que contienen todos los componentes para funcionar como un puente H, como por ejemplo el integrado L293 o L298.

La selección del tipo de puente H depende del consumo de corriente. El motor DC que tiene el prototipo posee un consumo de corriente 300 mA (con carga) a 20V. Por lo tanto se eligió el circuito integrado L298, que es un puente H de uso común con capacidad de manejar cargas inductivas como solenoides, relés y motores, tiene 4 canales de salida, la capacidad de corriente es de 2 Amperes en corriente continua por canal y el voltaje de alimentación para las cargas es

de 50 V máximo, en la sección C se puede observar el diagrama que representa el puente H.

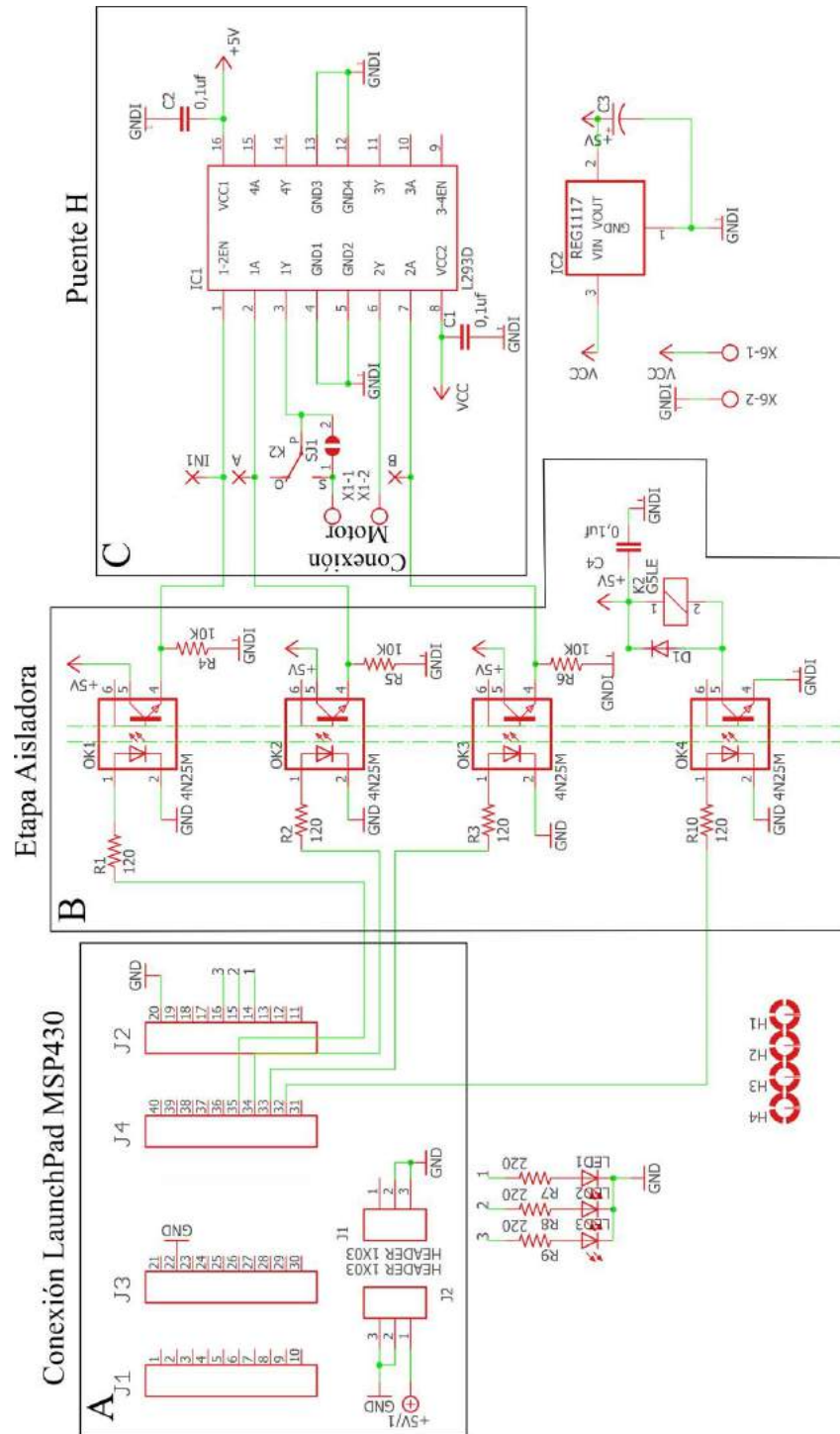


Figura 36: Diagrama esquemático del diseño del controlador de potencia.

Para controlar el L298 fueron necesarias 3 señales digitales conectadas en los pines 33 al 35 de la conexión al LaunchPad, como se observa en la sección A de la figura 36, dos de las señales son para controlar el sentido de giro del motor DC y la otra señal para activar el L298. En la sección B de la figura 36 hay 4 opto-acopladores que sirven para separar las conexiones entre la tierra digital y la tierra del motor DC. De esta forma se evita que las frecuencias de resonancia del motor se introduzcan en el circuito de acondicionamiento de la celda de carga [49]. Las señales digitales que pasan por los opto-acopladores son para controlar el giro del motor, la velocidad (PWM) y de seguridad a sobrecargas de la celda de carga.

La señal lógica para la seguridad de la celda controla un relé que desconecta el motor cuando hay una sobrecarga. Cuando la fuerza del prototipo de máquina de ensayo en compresión alcance el valor máximo deseado, el relé se activa y suspende el flujo de corriente al motor DC (como se observa en la parte inferior de la sección B).

### **3.2.4 Fuente de voltajes.**

La fuente es la encargada de suministrar la energía a las diferentes partes eléctricas y electrónicas del prototipo como: motor, circuitos, sensores y PCB. En la figura 37 se observa el diagrama básico de funcionamiento de una fuente de voltaje [50]. El primer elemento es el transformador, encargado de aumentar o disminuir el voltaje AC. La función del rectificador es entregar una señal con un promedio de voltaje DC.

Después la señal rectificadora pasa a través de un filtro para obtener un voltaje DC casi constante, y por último se utiliza un regulador de voltaje, que a menudo es un circuito integrado, para obtener un voltaje DC sin voltaje rizo y estable ante una variación en la carga.

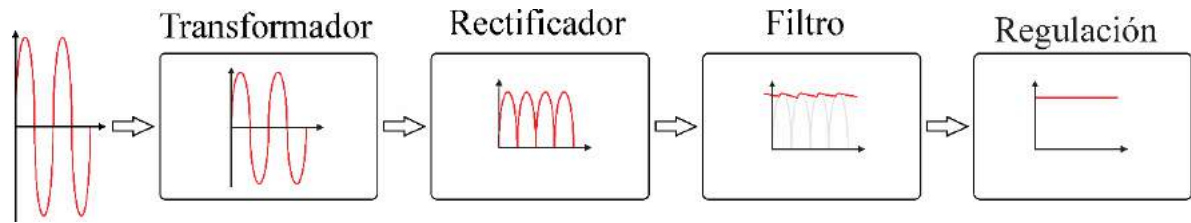


Figura 37: Diagrama básico del funcionamiento de una fuente de voltaje.

El diseño electrónico de la fuente de voltaje se realizó a partir de los requerimientos impuestos por el voltaje de consumo de los componentes eléctricos, electrónicos y circuitos impresos, los cuales se observan en la Tabla 8.

<b>Componente</b>	<b>Volts</b>	<b>Amperes</b>
<b>Motor DC</b>	20 V	300 mA (con carga)
<b>Celda de carga</b>	10V	30 mA
<b>Circuito Acondicionador de voltaje para la celda de carga</b>	$\pm 10$ V	10 mA
<b>Circuito controlador de potencia para motor</b>	20 V	50 mA

Tabla 8: Consumo de voltaje y corriente de los principales componentes eléctricos y circuitos impresos (PCB).

En los planos esquemáticos de los diseños electrónicos se observan otros valores de voltaje distintos a los indicados en la Tabla 8. Estos valores de voltaje se suministran con la alimentación del puerto USB de la computadora y se derivan de los voltajes mencionados en la Tabla 8. De acuerdo a los requerimientos de voltajes fue necesario realizar una fuente de voltaje con los siguientes niveles de voltaje: 20V, +10V y -10V. Para evitar que el ruido producido por el motor se introduzca en la conversión analógica/digital, se diseñaron dos fuentes con conexión a tierra independientes. La primera fuente es para el acondicionamiento de señal y alimentación de energía a la celda de carga y la segunda fuente es para el controlador de potencia y la alimentación

del motor DC. Por último, la alimentación del microcontrolador fue por medio de la conexión USB.

Para la primera fuente se utilizó un transformador de 9V, 0V, 9V (voltaje AC) y 500mA y un puente de diodos de 1A, para rectificar la señal de salida del transformador. El filtro se realizó con capacitores de 2200 $\mu$ F/24V, un capacitor para +10V y otro para -10V. Con un regulador LM7810 se obtuvo el valor fijo de +10V, en cambio, con el regulador LM337 (regulador variable negativo) y ajustando la resistencia variable R5 se obtuvo el voltaje de -10V. En figura 38-a se observa el diagrama esquemático para esta fuente. La segunda fuente se realizó con un transformador de 18V (voltaje AC) y 500mA y un puente de diodos de 1A para rectificar la señal. Un capacitor de 2200  $\mu$ F/24V filtró la señal. El regulador variable LM317 se utilizó para obtener el voltaje de 20V. En figura 38-b se observa el diagrama esquemático para esta fuente.

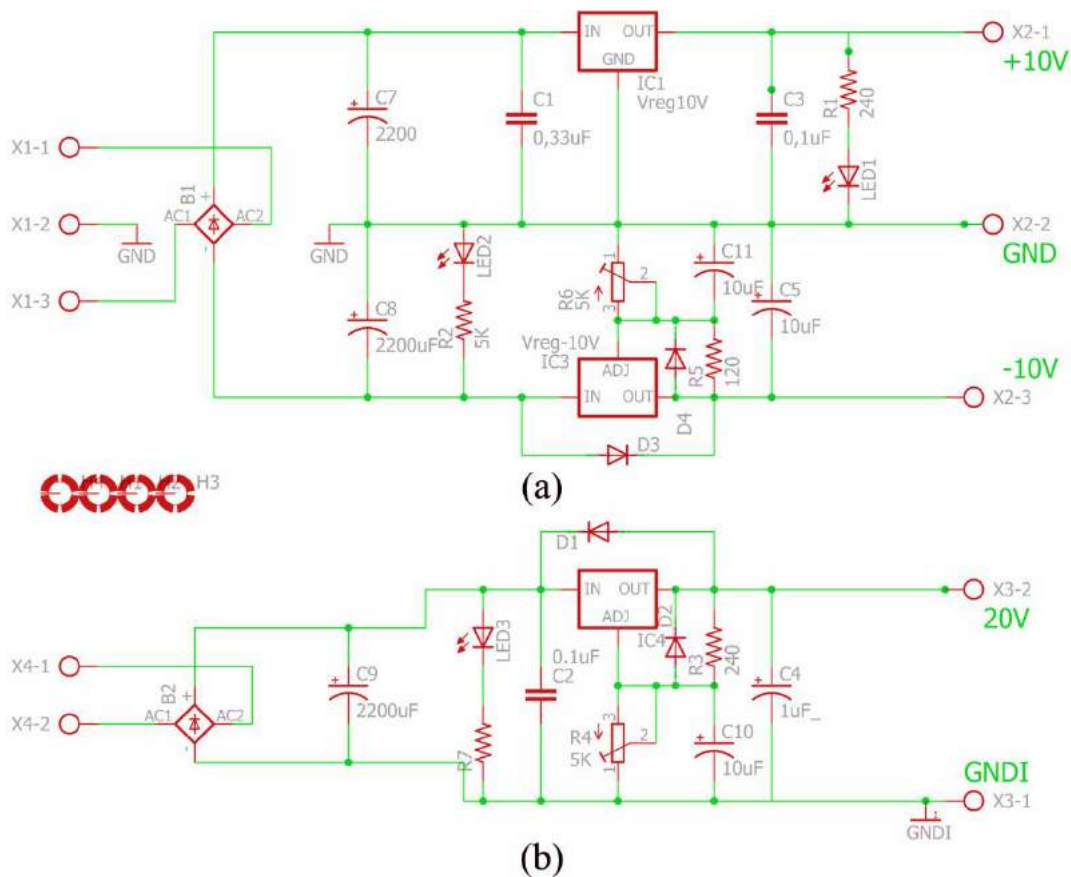
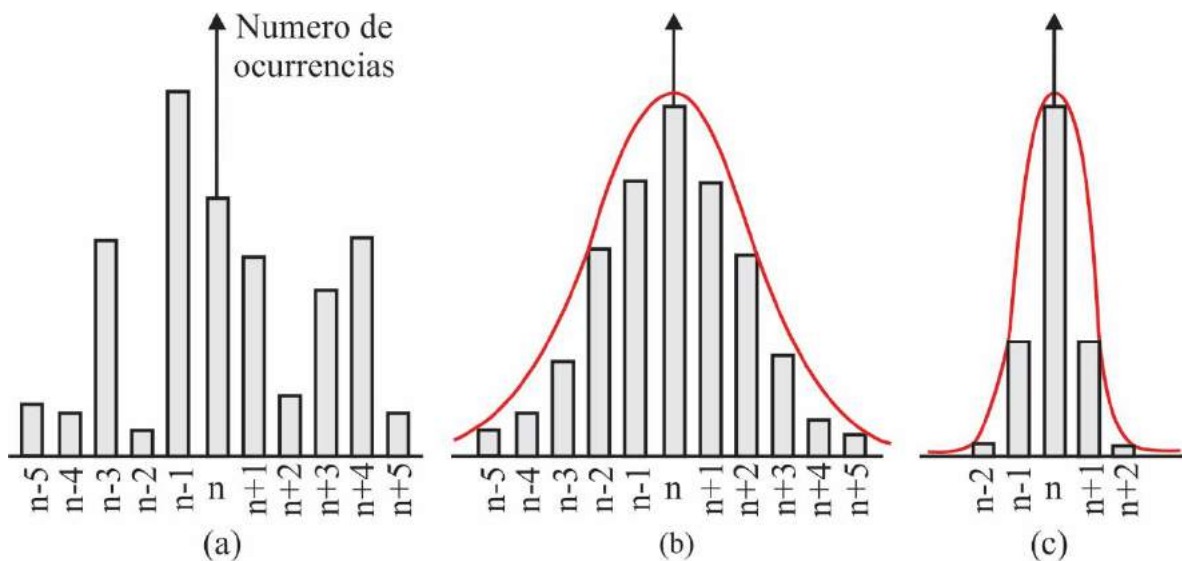


Figura 38: Diagrama esquemático del diseño de la fuente de voltajes. (a) Fuente de voltaje para acondicionamiento de señal, (b) fuente de voltaje motor DC.

### 3.2.5 Circuitos impresos (Printer Circuit Board, PCB).

Se realizaron los circuitos impresos en el software Eagle 7.0 (bajo licencia Freeware). Los diseños de los circuitos impresos fueron modulares y el principal fue la *LaunchPad* MSP430. El buen desempeño de un circuito impreso debe tener las siguientes características: Retorno de señales de corriente, planos de conexión a tierra y desacople de la fuente [51]. En la figura 39-a se observa el comportamiento de los datos para un conversor analógico/digital que tiene en su entrada análoga un voltaje fijo y estable, y que está montado en un circuito impreso que tiene sus pistas de cobre mal trazadas. Para este caso, la ocurrencia en los datos de la conversión analógica/digital no tiene una distribución normal [46].



*Figura 39: Histogramas de una señal muestreada para diferentes casos. (a) PCB con problema en el plano de conexión a tierra, (b) PCB con un buen plano de conexión a tierra, pero con ruido, (c) PCB con un buen plano de conexión a tierra y menor cantidad de ruido.*

Para un circuito impreso con un buen diseño en el trazado de las pistas de cobre, se espera que la conversión analógica/digital siempre represente el mismo valor ( $n$ ) para cada conversión en el tiempo, o por lo menos un error de alrededor de 5 bits ( $n+5$ ,  $n-5$ ), pero conservando una distribución normal entre el dato deseado ( $n$ ) y el rango de error, como se observa en la figura 39-b y

figura 39-c, en donde el circuito impreso se realizó con un buen trazado de sus pistas de cobre. La diferencia entre estas dos imágenes es el nivel de ruido, la figura 39-b tiene mayor nivel de ruido que la figura 39-c.

A partir del diseño de los circuitos de la etapa de amplificación (figura 31), filtraje (figura 33) y los conectores para la *LaunchPad* MSP430, se realizó el diseño de los circuitos impresos tratando de abarcar la mayor parte de cobre como plano de conexión a tierra. Las pistas se trazaron evitando que hubiera retorno de señales de corriente y los circuitos integrados más delicados, como los conversores, fueron desacoplados de la fuente de voltaje, utilizando condensadores en los pines de alimentación. Después del diseño de los circuitos impresos, inició el proceso de fabricación, el cual consistió en imprimir el diseño de las pistas sobre una cara de la placa de cobre y luego por el reverso de la misma el otro diseño. Para remover el cobre excesivo en la placa de cobre y obtener solo las pistas, fue necesario sumergir la placa de cobre en ácido férrico, así la parte de la placa de cobre que estaba protegida con la impresión no fue afectada por el ácido y el cobre expuesto fue removido. A continuación se realizaron las perforaciones de los agujeros para los componentes eléctricos y electrónicos con tecnología de agujero pasante (Through-Hole). Antes de soldar los componentes, fue necesario imprimir sobre la placa el nombre y valor de los componentes utilizados, con la finalidad de guiar el proceso de ubicación de los componentes.

En la figura 40 se observa el diseño de la PCB para el circuito acondicionador de la señal para la celda de carga de la capa superior (figura 40-a), la capa inferior (figura 40-b) y la capa nombres (figura 40-c). En la figura 40-b se puede observar que más del 70% de la capa inferior es conexión a tierra, como lo sugiere las reglas de diseño de circuitos impresos.

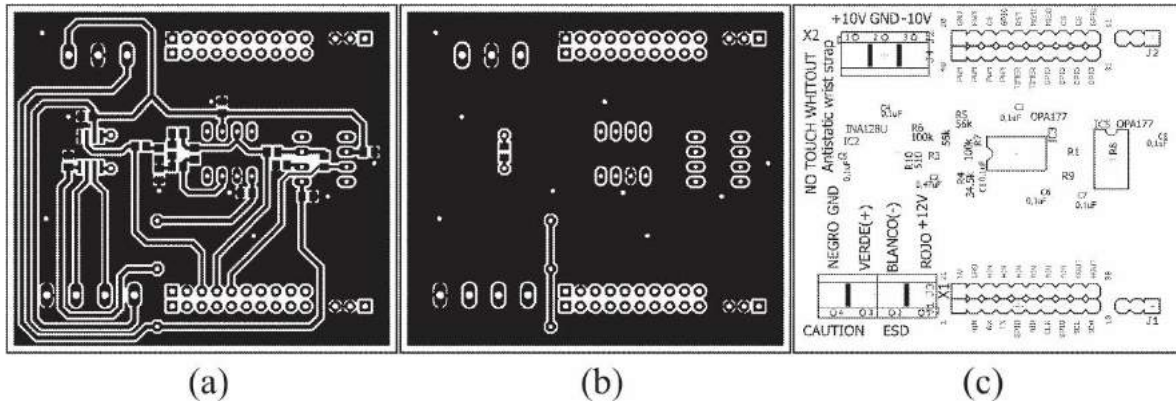


Figura 40: Diseño de la PCB para el acondicionamiento de la celda de carga. (a) capa superior, (b) capa inferior y (c) capa de nombres.

En la figura 41 se observa el diseño del circuito impreso para el controlador de potencia del motor DC. En la capa inferior (figura 41-a) de este diseño, se aprecia la separación de la conexión a tierra. La parte izquierda del diseño es para la parte lógica y la derecha es para el motor DC. El acople entre las dos partes se realizó mediante opto-acopladores.

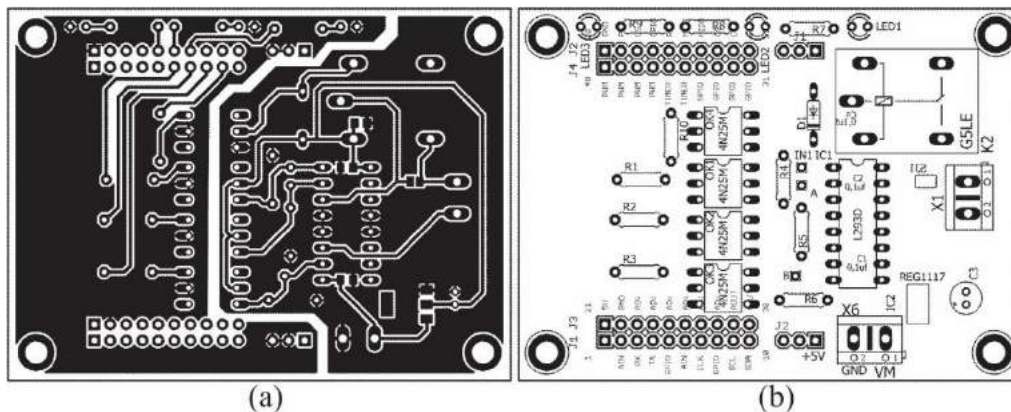


Figura 41: Diseño de la PCB para el controlador de potencia del motor DC. (a) Capa inferior y (b) capa de nombres.

En la figura 41 se observa el diseño del circuito impreso para la fuente de voltaje. En la capa superior se observan caminos eléctricos geométricos, anchos y con ángulos de 90, según la recomendación del fabricante [52]. Y en la capa



inferior se observa que las conexiones a tierra son diferentes para las dos fuentes, con el objetivo de evitar que el ruido producido por el motor DC llegue a la celda de carga por medio de una conexión física.

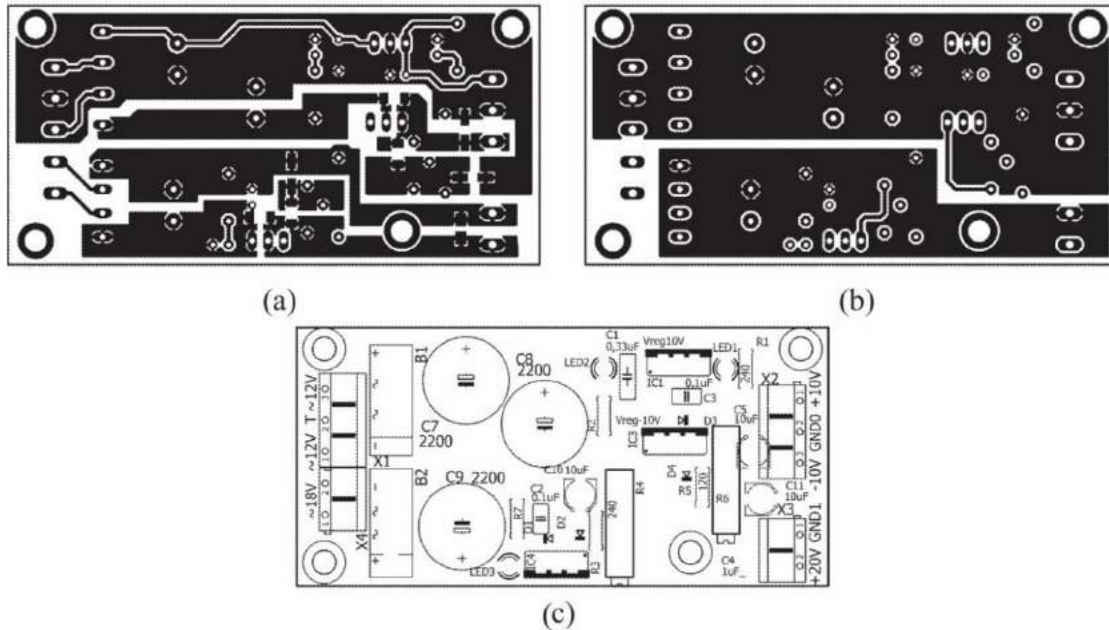


Figura 42: Diseño de la PCB para la fuente de voltaje. (a) capa superior, (b) capa inferior y (c) capa de nombres.

### 3.3 Algoritmos de control.

Para controlar el prototipo fue necesario realizar dos algoritmos, uno para el microcontrolador y otro para la interfaz gráfica en la computadora. El algoritmo del microcontrolador es el encargado de realizar la conversión analógica/digital, la generación del PWM y las señales de control para el motor DC, activar y desactivar las señales lumínicas y por último enviar y recibir información a la computadora.

El algoritmo para la interfaz gráfica en la computadora recibe la información del microcontrolador para visualizar y controlar la fuerza aplicada por la

máquina, recibe y procesa la información de la cámara digital para obtener los hologramas de imagen.

### **3.3.1 Algoritmo para el microcontrolador.**

En la figura 43 se observa el diagrama de flujo que se realizó para el microcontrolador MSP430-f5529. El algoritmo está conformado por una rutina principal y tres rutinas de interrupciones, la cuales son para el conversor analógico/digital, el temporizador del PWM y para la transmisión de la información entre el microcontrolador y la computadora.

El funcionamiento lógico del diagrama de flujo es el siguiente. La interrupción de la conversión análoga digital se ejecuta cuando hay una conversión disponible en el buffer. Dentro de la interrupción se suma 9 veces el valor de la conversión. Cuando la suma de la conversión se ha enviado a la computadora se puede volver a sumar 9 veces la lectura de la celda. El resultado de la conversión es de 12 bits, pero al sumar 9 veces este valor es necesario una variable de 16 bits. El objetivo de sumar 9 veces el valor es realizar un filtro por promedio y mejorar la relación señal ruido (SNR por sus siglas en inglés) de la celda de carga.

La interrupción de la comunicación RX se ejecuta cuando el microcontrolador recibe un dato de la computadora. En ese momento se reciben 2 bytes para el ciclo útil del PWM y un byte para asignar el giro del motor DC. Además se pone en 1 la bandera final, permitiendo que el flujo principal trabaje.

En el diagrama de flujo principal se concatenan los bytes del PWM, el contador del temporizador empieza a funcionar para activar el ciclo útil de la señal PWM, el giro del motor se establece, la información de la celda se envía en 2 bytes, se comprueba si la celda de carga esta con sobrecarga y al final se limpian variables.

La interrupción del temporizador se ejecuta cuando el contador alcanza el valor del ciclo útil del PWM. Dentro de la interrupción se apaga el contador del temporizador y se apaga la señal del PWM.

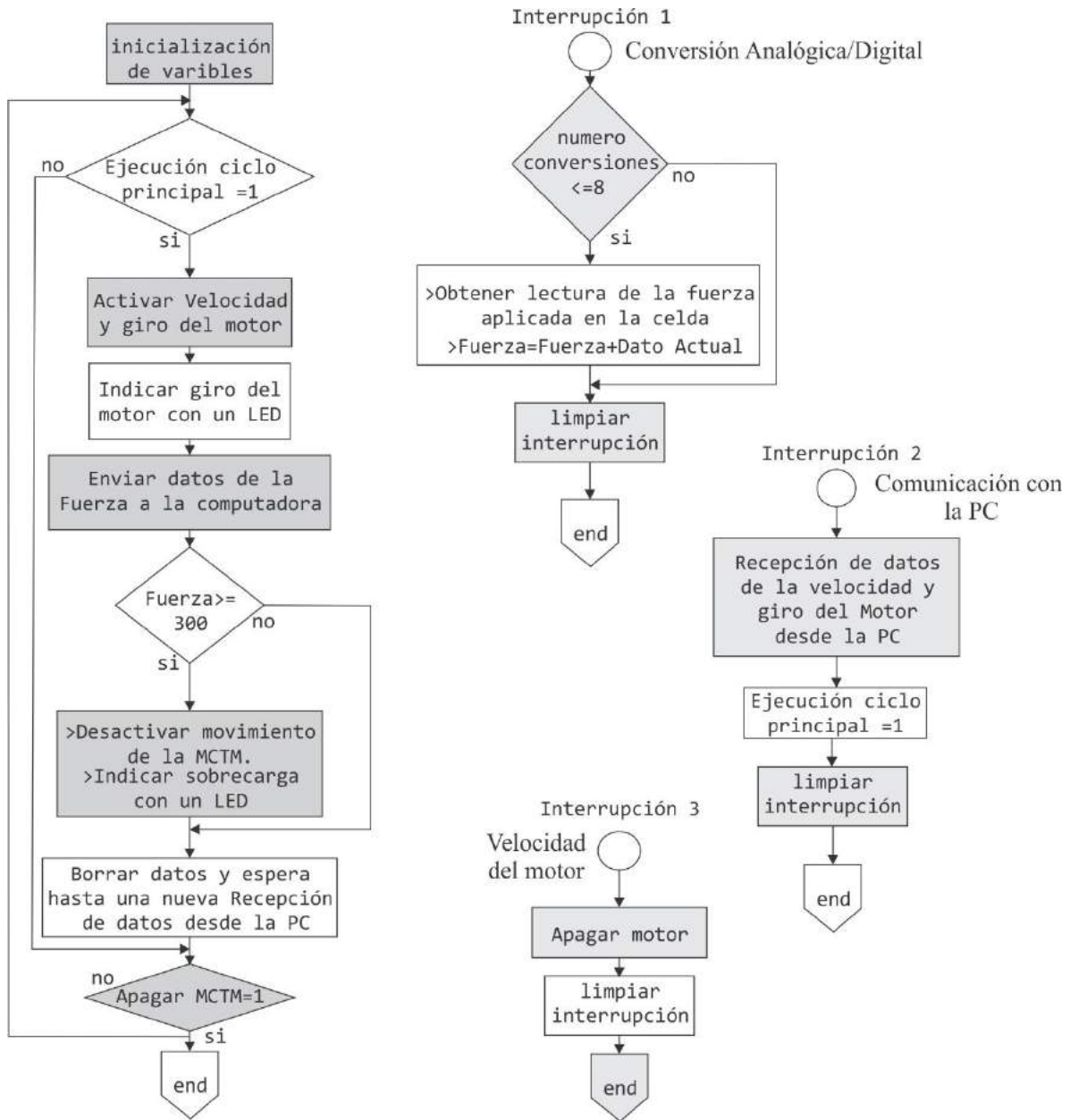


Figura 43: Diagrama de flujo del algoritmo que ejecuta el microcontrolador MS430-f5529.

### **3.3.2 Algoritmo para la interfaz gráfica.**

En la interfaz gráfica hay varios eventos para los diferentes botones existentes en ella. El evento del botón RUN es el que contiene el algoritmo que realiza las tareas principales en la interfaz gráfica. En la figura 44 se observa el diagrama de flujo del algoritmo.

La primera sección del algoritmo está constituido por la comunicación y control con la máquina, el cual realiza las siguientes tareas: envía un dato dummy y recibe dos bytes con el valor de la celda de carga. El dato se convierte de binario a decimal y se escala al valor de la fuerza.

La interfaz gráfica tiene la posibilidad de manejar la maquina manual o automática. De acuerdo a esta selección se modifica el valor del ciclo útil del PWM y el sentido de giro del motor DC. Al final se envían estos dos parámetros a la máquina y se recibe un dato dummy.

En la segunda sección del algoritmo se realiza todo el proceso con la cámara digital y el procesamiento de los hologramas digitales. Es posible realizar 4 visualizaciones con respecto al procesamiento de los hologramas: holograma original, la transformada de Fourier del holograma, la correlación entre un holograma de referencia y los hologramas actuales y por último visualizar la fase envuelta.

Si la opción de grabar es activada, es posible guardar los hologramas en el disco duro de la computadora en formato TIFF (Tagged Image Format File, formato de archivo de imágenes con etiquetas). Al mismo tiempo se genera un archivo de texto que almacena el valor de la fuerza para cada holograma.

Por último, con el botón de stop se puede detener la ejecución de la interfaz gráfica. Para asegurar que la máquina no siga en movimiento, se envía un valor nulo de PWM y una instrucción de parar. Los datos de fuerza se guardan en memoria, el puerto serial se cierra y el objeto de video se borra.

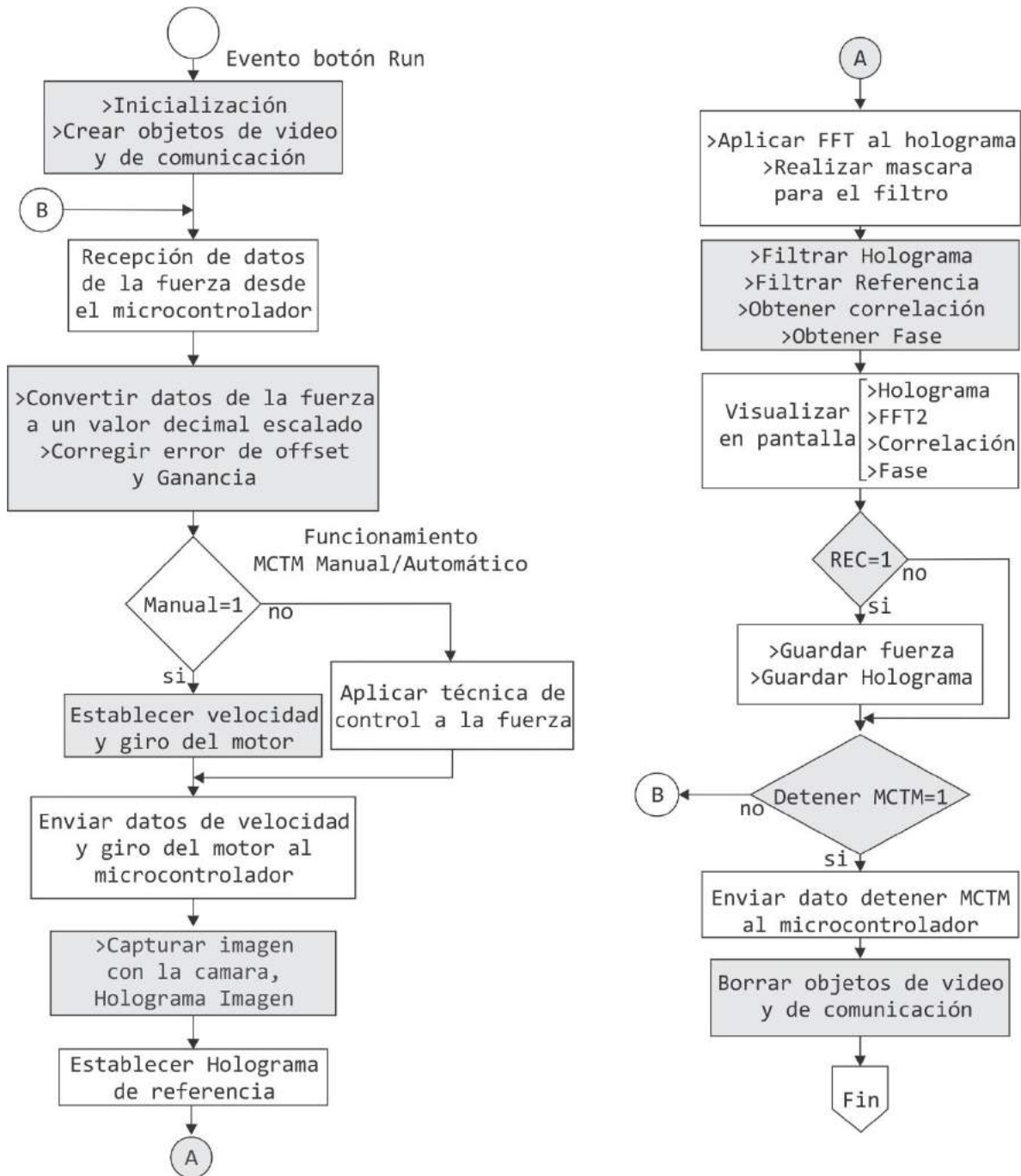
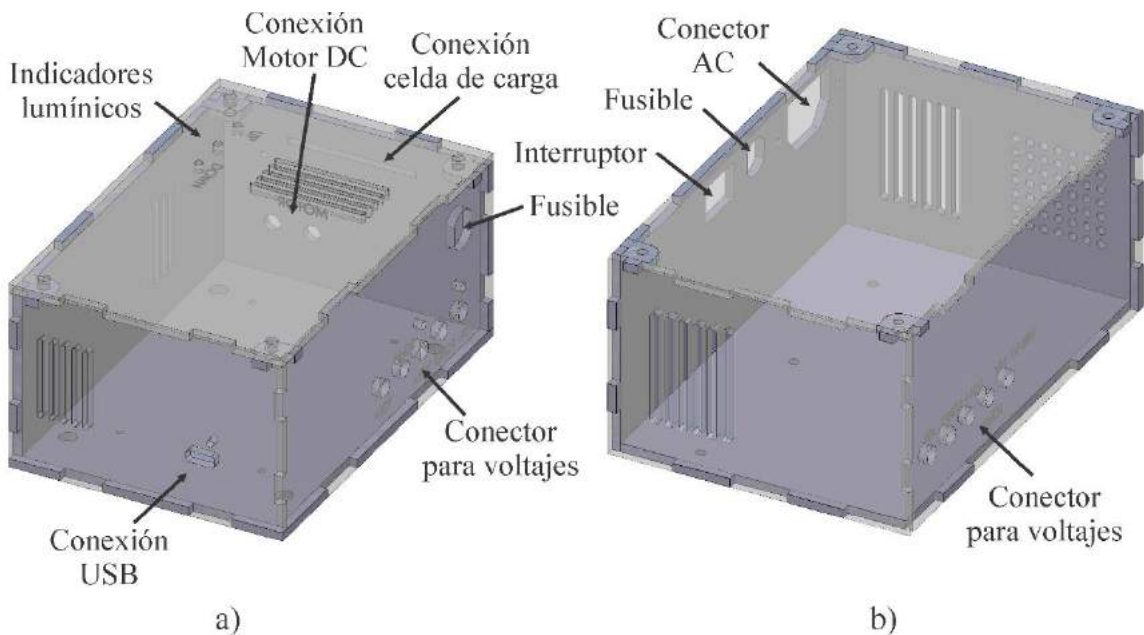


Figura 44: Diagrama de flujo del algoritmo que ejecuta el botón run en la interfaz gráfica.

### 3.4 Protección de los circuitos impresos.

Para proteger los circuitos impresos del polvo y otros factores externos, se realizó el diseño y fabricación de dos cajas en acrílico cortado por láser: una para la fuente de voltaje y otra para el acondicionamiento de señal, el microcontrolador y el controlador de potencia. En el diseño de las cajas se tuvo en cuenta dejar las aberturas para las diferentes conexiones: conector para el cable USB, los conectores para los voltajes, los conectores para el cable de la celda de carga, el conector para el motor DC, el conector para la alimentación AC de la fuente de voltaje, interruptor y otros. En la figura 45 se observa el diseño para las cajas.



*Figura 45: Diseño de las cajas para resguardar los circuitos impresos. (a) Caja para el microcontrolador, acondicionamiento de la señal y controlador de potencia del motor, y (b) caja para la fuente de voltaje.*

# CAPITULO IV

## 4 Pruebas y Resultados.

### 4.1 Pruebas de funcionamiento del prototipo de máquina de ensayo en compresión.

Las pruebas de funcionamiento sirvieron para comprobar que el prototipo funcionaba como se esperaba. Las pruebas que se realizaron fueron: calibración de la celda de carga, comportamiento en lazo abierto, repetitividad y las primeras pruebas de la medición de la deformación por DHI de una probeta de aluminio.

#### 4.1.1 Calibración de la celda de carga.

La calibración de la celda de carga se realizó con tres series de mediciones utilizando cuatro bloques de hierro. Los bloques de hierro se pesaron en la báscula Mettler Toledo BBA231 (valor de referencia) y en la celda de carga, y con los datos obtenidos se obtuvieron los errores de offset y de ganancia. En la Tabla 9 se registraron los valores de la fuerza obtenidos por la báscula y la celda de carga, y en la figura 46 se observa el comportamiento de los datos.

Medición	Bloques	Báscula Peso (lb-f)	Fuerza-Celda de carga (lb-f)		
			Prueba1	Prueba2	Prueba3
A	0	0	14,5	14,8	14,6
B	1	19,4	34,5	34,8	34,6
C	1+2	41,9	57,5	57,7	57,6
D	1+2+3	66,1	82,4	82,3	82,5
E	1+2+3+4	90,4	107,7	107,3	107,7

Tabla 9: Registro del peso de los bloques de hierro.

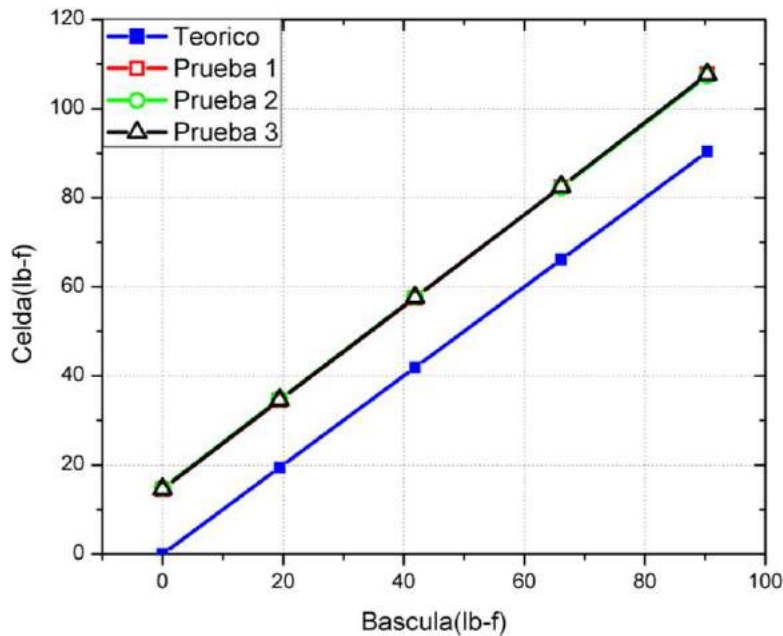


Figura 46: Comportamiento de la celda de carga sin corrección de offset, en donde las tres pruebas dan los mismos valores.

En la figura 46 se observa que la respuesta de la celda es lineal, la medición es repetible y la medición de la fuerza posee un error de offset. Este error está en la medida debido a la diferencia entre la temperatura en que se calibró la celda de carga y la temperatura donde se utiliza en esta prueba. El valor del error de offset se estableció como el promedio del valor de la fuerza para un peso cero, así, de la Tabla 9 en la fila A que corresponde a la medida para un peso cero, el error de offset fue de 14,63 lb-f. A continuación se restó el error de offset a cada medición de cada prueba y se obtuvo el resultado de la figura 47.

De esta grafica se observó que la medición de la fuerza iba incrementando para cada valor deseado. Este error se llama error de ganancia y se debe a la variación en la ganancia de los componentes electrónicos (especialmente en los amplificadores operaciones) utilizados en la etapa de acondicionamiento de la señal de celda de carga. El error de ganancia se corrigió multiplicando una constante de ganancia (G) por los datos obtenidos de la celda de carga. El valor de la constante de ganancia fue de 0,97.



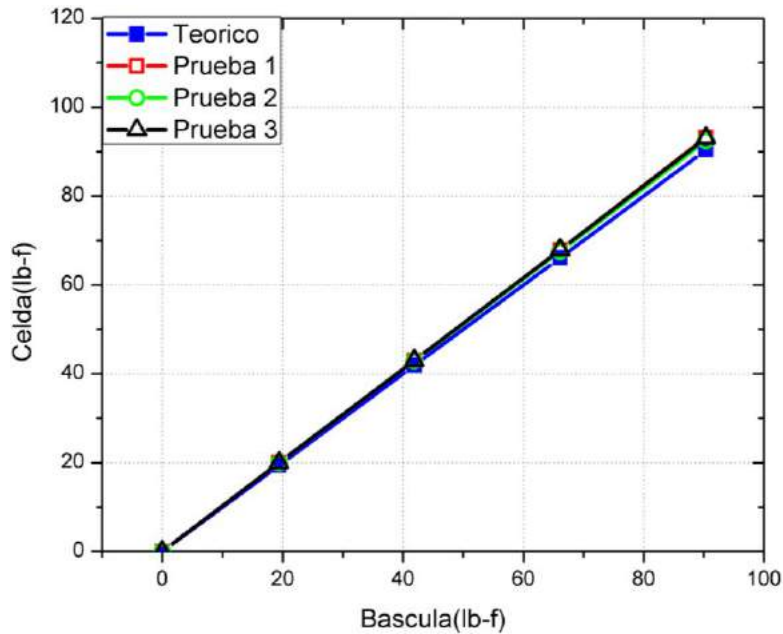


Figura 47: Corrección del error de offset e identificación del error de ganancia.

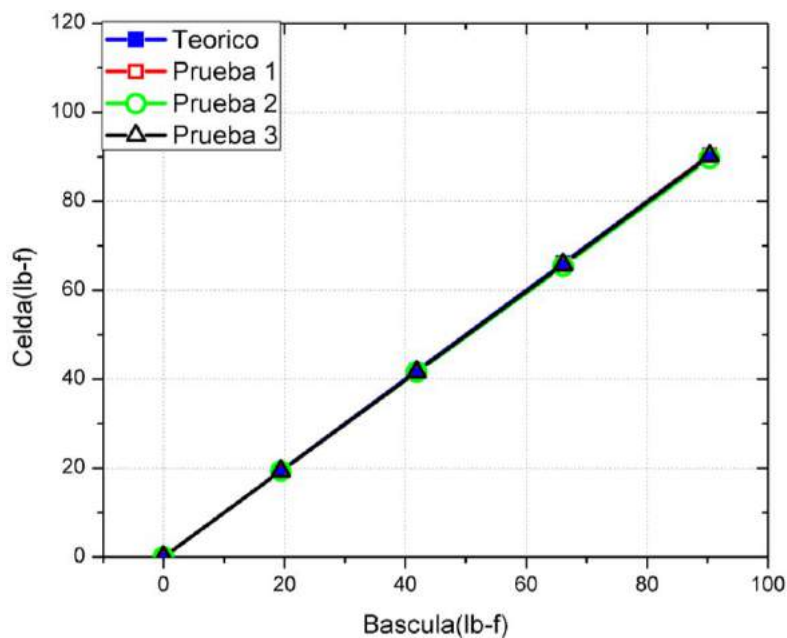


Figura 48: Datos de la celda de carga calibrados, con corrección del error de offset y el factor de ganancia.

Con el error de offset ( $E_{\text{off}}$ ) y el factor de ganancia ( $G$ ) se plantea la ecuación (65) para obtener la medición de la fuerza correcta. En donde la fuerza calibrada o correcta es ( $F_{\text{calibrada}}$ ) y la fuerza obtenida por la celda de carga es ( $F_{\text{celda}}$ ). En

la figura 48 se observan los datos de la Tabla 9 con la corrección del error offset ( $E_{off}$ ) y el factor de ganancia ( $G$ ).

$$F_{Calibrada} = (F_{celda} - E_{off}) * G \quad (65)$$

$$F_{Calibrada} = (F_{celda} - 14,6) * 0,97$$

#### 4.1.2 Comportamiento en lazo abierto del prototipo.

La prueba en lazo abierto sirvió para observar el comportamiento de la fuerza aplicada, establecer los parámetros del control de la misma y para comprobar el torque del motor. La prueba consistió en la medición de la fuerza aplicada por la cruceta para diferentes valores del ciclo útil del PWM. En la figura 49 se observa el resultado de la prueba y se concluye que: el motor DC puede alcanzar la fuerza de 300 lb-f para un ciclo útil del 75% del voltaje nominal, por lo tanto, el motor DC cumplió con los requisitos del torque establecidos en el diseño mecánico. Segundo, la prueba indica que la fuerza aplicada es repetible y su comportamiento no es lineal.

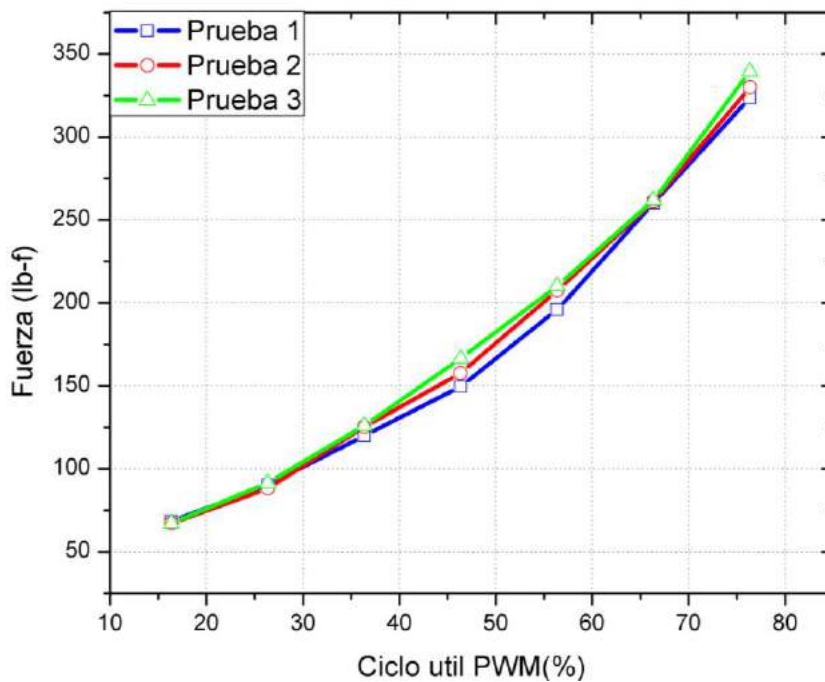
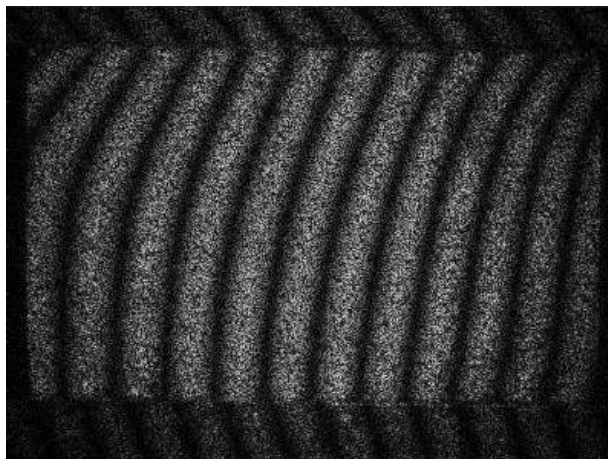


Figura 49: Comportamiento de la fuerza con respecto a cambios en el ciclo útil del PWM.

### 4.1.3 Primeras pruebas de la medición del desplazamiento relativo con DHI.

Para confirmar el funcionamiento del prototipo, se decidió realizar la medición de la deformación de una probeta de aluminio por medio de DHI. Para esta prueba se utilizaron probetas de aluminio con las siguientes dimensiones: 60 mm de largo, 30.1 mm de ancho y 3 mm de espesor. La prueba consistió en someter la probeta a diferentes valores de fuerza y observar la distribución de las franjas de interferencia debido a la carga. El resultado que se esperaba eran franjas de interferencia perpendiculares a la fuerza aplicada, sin embargo el resultado fue distinto. Al someter la probeta a una fuerza de 70 lb-f se obtuvo un holograma de referencia, después la fuerza se incrementó a 75 lb-f y se obtuvo el holograma de deformación. Al realizar la correlación por sustracción de los hologramas el resultado fueron franjas de interferencia paralelas a la fuerza aplicada, como se observa en la figura 50.

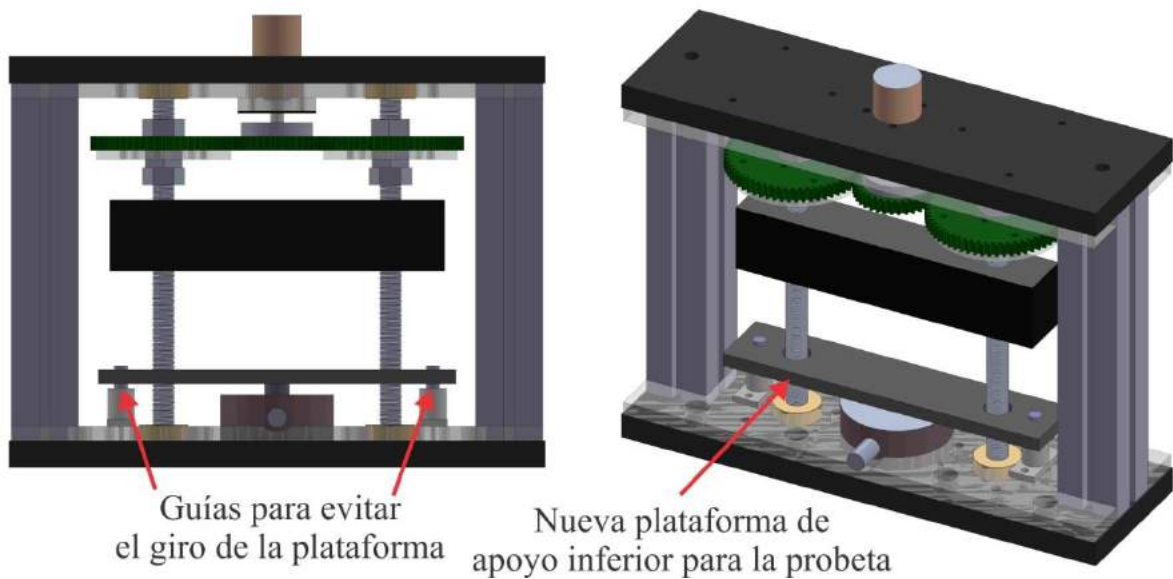


*Figura 50: Franjas de interferencia para la deformación de la probeta de aluminio para la primera prueba con DHI.*

El comportamiento de las franjas mostró que alguna pieza mecánica en el prototipo se movía al aplicar la fuerza. Este movimiento era de rotación, ocasionando que la probeta girara sobre el eje del botón de la celda de carga. Para solucionar esto, se rediseñó la sección en donde se encontraba la celda de carga y la plataforma de apoyo inferior para la probeta. La celda de carga se sujetó a la base inferior con tornillos, en esta posición el botón de la celda está

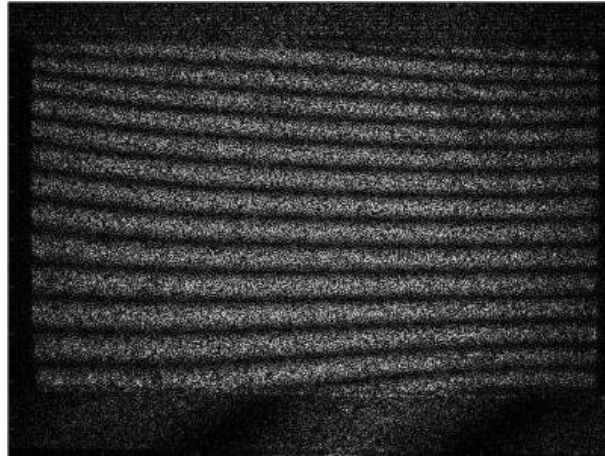
en contacto con la plataforma de apoyo inferior para la probeta. Con este cambio, se eliminaron los movimientos que pudiera sufrir la celda de carga cuando se aplica una fuerza.

Para evitar que la plataforma de apoyo inferior de la probeta rotara, se agregaron dos guías en los extremos de esta. En la figura 51 se observan el rediseño en el prototipo.



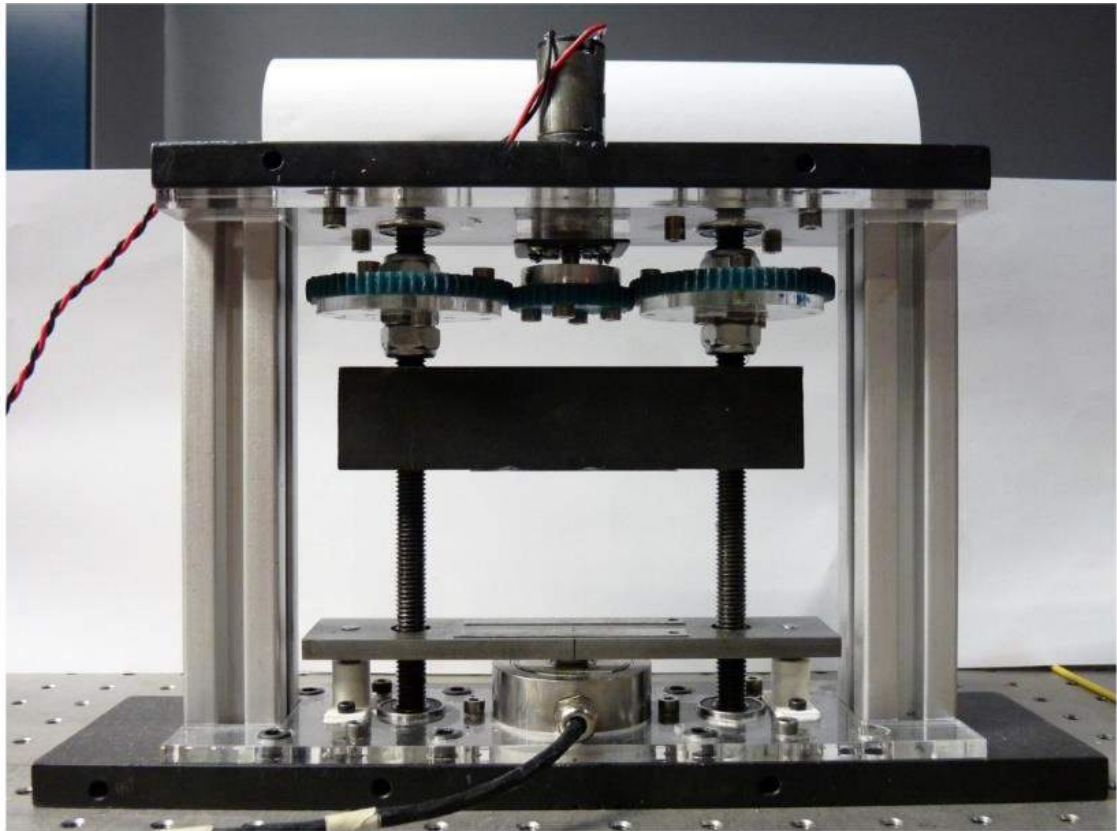
*Figura 51: Re-diseño del soporte para la probeta y nueva postura de la celda de carga.*

Después de aplicar los cambios estructurales en el prototipo, se volvió a realizar el experimento y se logró obtener franjas perpendiculares a la fuerza, como se observa en la figura 52.

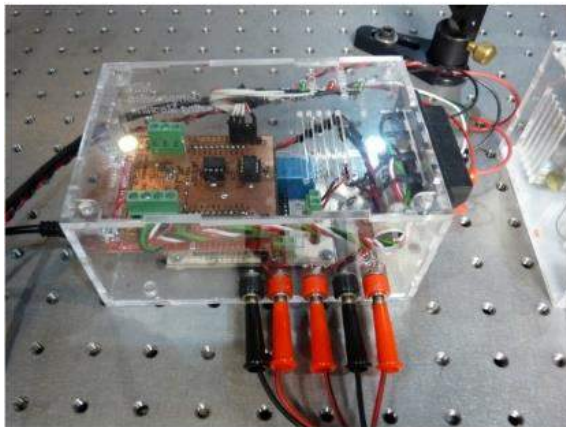


*Figura 52: Franjas de interferencia para la deformación de la probeta de aluminio, 2<sup>da</sup> medición con DHI.*

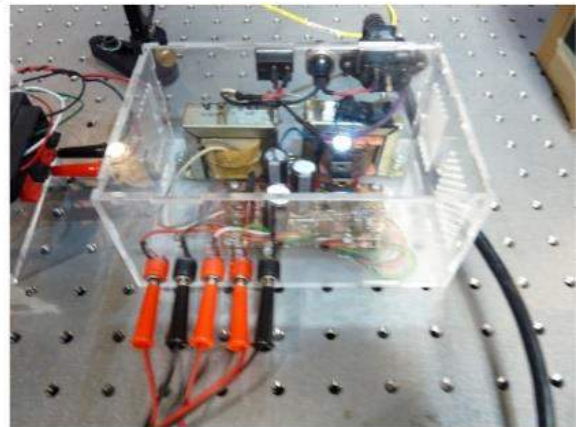
A continuación, en la figura 53 se muestra el diseño final del prototipo con todos los cambios aplicados.



(a)



(b)



(c)

*Figura 53: Prototipo final de la máquina de ensayo en compresión. (a) Marco estructural con la parte mecánica, (b) circuitos para el acondicionamiento de la señal, el microcontrolador y el controlador de potencia y (c) fuente de voltajes.*

## 4.2 Pruebas de repetitividad.

Esta prueba consistió en aplicar diferentes valores de fuerza a probetas de aluminio y medir la deformación unitaria (strain) de estas. La medición de la deformación unitaria se realizó mediante una galga extensiométrica adherida a la probeta y que estaba conectada al instrumento indicador y registrador de esfuerzos modelo P3.

### 4.2.1 Con galga extensiométrica.

La galga extensiométrica que se utilizó es de la empresa Vishay Micro-Measurements serie CEA-06-062UW-120, en la figura 54 se observa el tamaño de la galga que se utilizó. Este tipo de galga es para uso común y sus características son las siguientes [53]:

- Resistencia  $120 \pm 0,3\%$
- Tamaño de la rejilla  $3,05 \text{ mm} \times 1,57 \text{ mm}$  (largo y ancho).
- Tamaño completo  $5,59 \text{ mm} \times 3,05 \text{ mm}$  (largo y ancho).



*Figura 54: Galga extensiométrica CEA-06-062UW-120.*

## 4.2.2 Probetas.

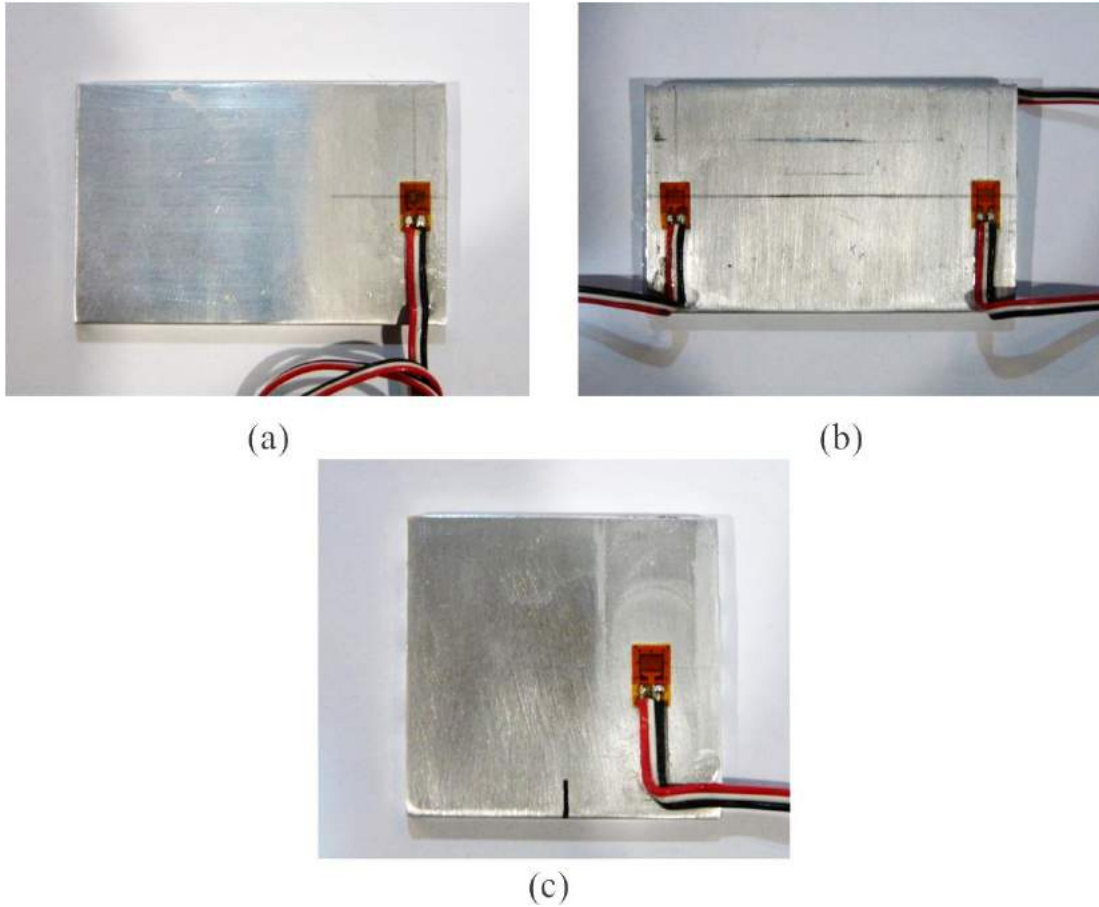
Las probetas que se utilizaron, se maquinaron a partir de una solera de aluminio 6061 con una longitud de 2 m, un ancho de 3.81 cm y un espesor de 0.3 cm. A partir de esta se cortaron las probetas con dos diferentes dimensiones. Las medidas de las probetas fueron de 38,1 de ancho, 60 mm de largo y 3 mm de espesor para el primer grupo de probetas. Y las medidas del segundo grupo de probetas fueron de 38,1 mm de ancho, 40 mm de largo, y 3 mm de espesor.

Para adherir las galgas extensiométricas se solicitó la ayuda del Dr. Francisco J. Casillas Rodríguez, de la Universidad de Guadalajara campus Lagos de Moreno, para la asesoría técnica de elementos para el pegado de las galgas extensiométricas. Además, fue necesario seguir las recomendaciones que indica el fabricante para pegar galgas extensiométricas [54], [55] y manejar los materiales [56]. En la Tabla 10 se muestra una lista de las probetas utilizadas para realizar la prueba de repetitividad. En todas las probetas se ubicó una galga extensiométrica a 5 mm del lado derecho de la probeta y a la mitad de altura (ver figura 55-a y figura 55-c), sin embargo a una probeta se adhirieron 3 galgas a modo de control, la primera a 5 mm del lado izquierdo, la segunda a 5 mm del lado derecho, y la tercera del otro lado de la superficie de la probeta (ver figura 55-b).

	<b>Tamaño 1 38.1x60x3 mm</b>	<b>Tamaño 2 38.1x40x3 mm</b>	<b>Cantidad de galgas</b>
<b>Probeta 1</b>	Si		1
<b>Probeta 2</b>	Si		1
<b>Probeta 3</b>	Si		1
<b>Probeta 4</b>	Si		3
<b>Probeta 5</b>		Si	1
<b>Probeta 6</b>		Si	1

*Tabla 10: Características de las probetas utilizadas para la prueba de repetitividad.*





*Figura 55: Probetas con las galgas adheridas: (a) probeta del tamaño 1, (b) probeta del tamaño 1 con tres galgas adheridas y (c) probeta del tamaño 2.*

### **4.2.3 Metodología de la Prueba.**

Para realizar las mediciones de la deformación en las probetas se utilizaron dos métodos. En el primer método (A), las probetas se colocaban en la plataforma de apoyo inferior para la probeta y se aplicaba una fuerza controlada. En el segundo método, método (B), se agregaron 4 láminas de acero a modo de guías en las superficies (cruceta y plataforma de apoyo inferior) que comprimen la probeta, para que la probeta tuviera la misma posición en cada prueba.

Nota: En esta sección cuando se haga referencia al término deformación, se debe entender que es la deformación unitaria (Strain), porque es el valor que se

obtiene con una galga extensiométrica. El método A consistió de los siguientes pasos para obtener la información de la deformación.

1. La probeta se coloca en la plataforma de apoyo inferior para la probeta de la máquina.
2. La cruceta se baja hasta tocar la parte superior de la probeta
3. Se aplica una precarga de 50 lb-f.
4. El valor del offset es ajustado a cero en el instrumento Indicador y registrador de esfuerzos modelo P3.
5. Se registran los datos de la deformación para incrementos proporcionales de 10 lb-f.
6. La fuerza vuelve a 50 lb-f y se espera 10 minutos.
7. Se aplica de nuevo el paso 5 y 6 por lo menos una vez más.
8. La probeta es retirada de la máquina y se espera 10 minutos
9. Se coloca de nuevo la probeta en la máquina, tratando que esta quede en la misma posición a la prueba anterior.
10. Se repiten de nuevo los pasos del 2 al 7
11. Se retira la probeta.

En la figura 56 se observan los datos obtenidos de la probeta 3 utilizando la metodología A. Las pruebas 1 y 2 corresponden a la medida de la deformación para los puntos 5 y 7, y las pruebas 3 y 4 corresponden a la medida de la deformación cuando la probeta se ubicó de nuevo en la máquina después de haberla retirado (puntos 8, 9 y 10). Se observa que la respuesta de la deformación es lineal para todas las mediciones.

Además, las pruebas 1 y 2 tienen el mismo comportamiento y las pruebas 3 y 4 también tienen el mismo comportamiento, lo que indica la repetitividad entre las mediciones. Sin embargo entre los dos grupos de pruebas hay una diferencia en la pendiente de la curva, siendo mayor para las primeras mediciones.

Esto se debe a la nueva posición que tuvo la probeta, cuando se quitó y se volvió a ubicar en la máquina para realizar las mediciones de las pruebas 3 y 4.

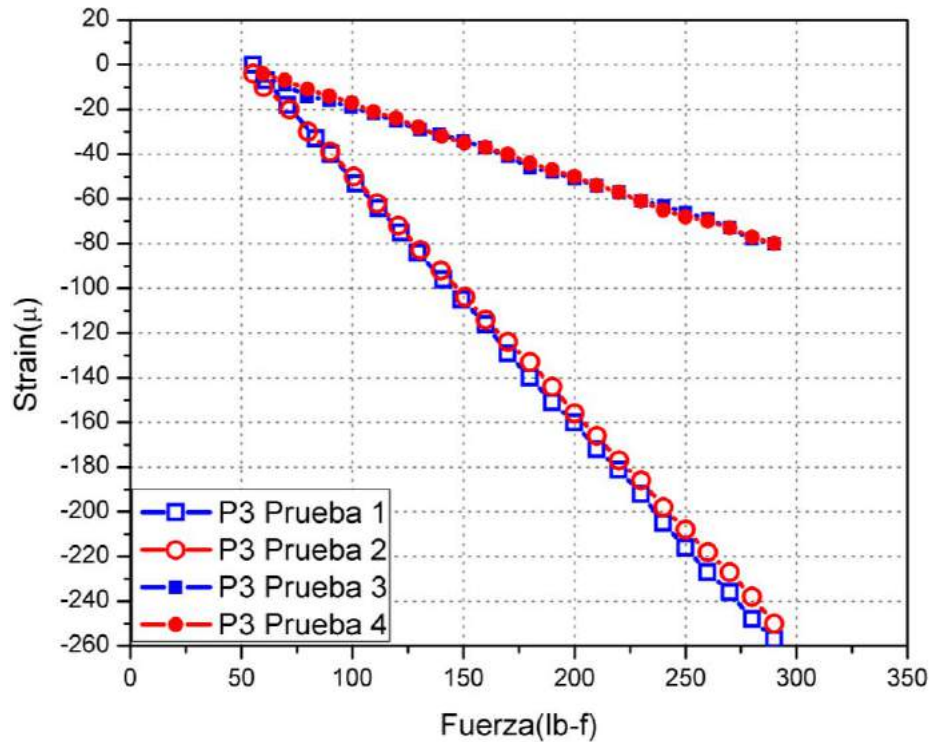


Figura 56: Medición de la deformación para la probeta 3 utilizando el método A.

Para comparar los resultados anteriores, se realizó la medición de la deformación utilizando la probeta 4 (con tres galgas) y empleando de nuevo el método A. La medición de la deformación se llevó a cabo en las galgas extensiométricas (G1) y (G2). En la figura 57 se muestra la probeta 4 con la nomenclatura para las galgas adheridas a esta.



Figura 57: Probeta 4 con tres galgas extensiométricas, dos enfrente (galga 1 (G1) y galga 2 (G2)), y una por detrás (galga 3 (G3)).

En la figura 58 se presentan los resultados de la deformación de la probeta 4 para la galga 1 (G1). Se observa que las pruebas 11 y 12 son lineales y son repetibles, pero cuando la probeta es retirada y se coloca de nuevo en la máquina la pendiente cambia, en este caso para las pruebas 13 y 14 la deformación aumentó.

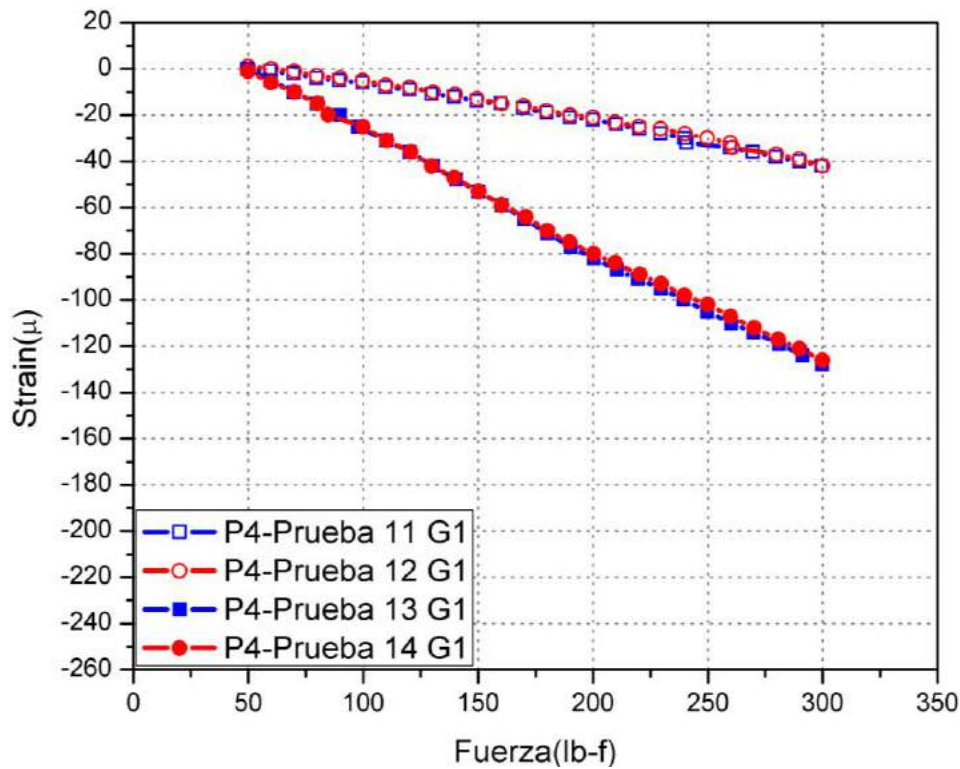


Figura 58: Medición de la deformación para la probeta 4 en la galga 1 (G1) utilizando el método A.

En la figura 59 se presentan los resultados de la deformación de la probeta 4 para la galga 2 (G2). Se observa que las pruebas 11 y 12 no son lineales para los primeros valores de fuerza, sin embargo a partir de 130 lb-f el comportamiento es lineal, y son repetibles. Para esta prueba también se observa que la pendiente cambió para las pruebas 13 y 14.

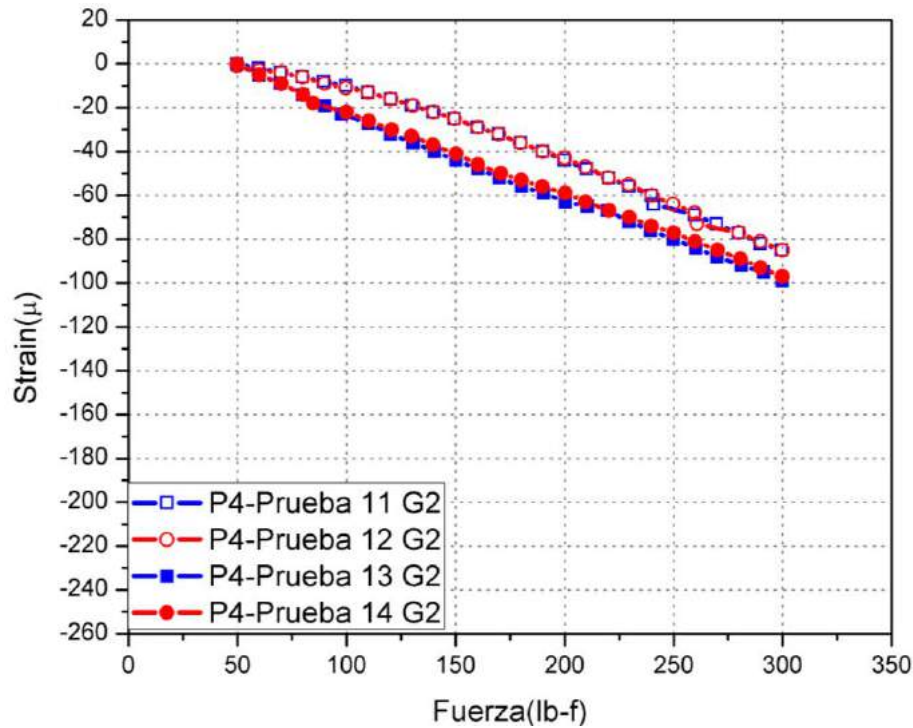
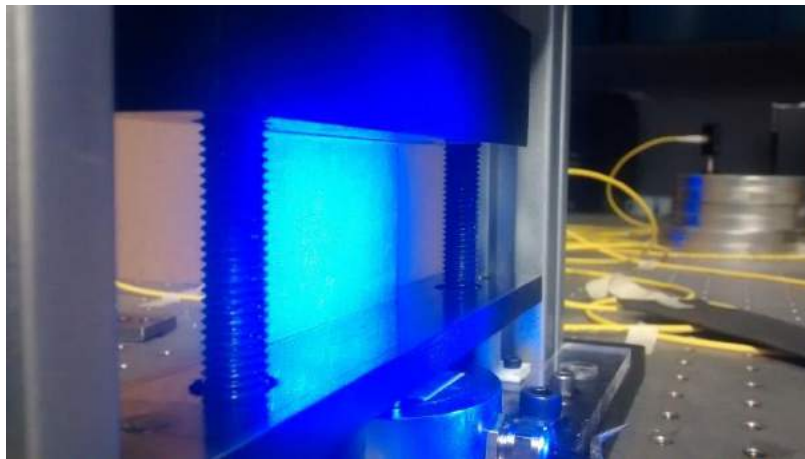


Figura 59: Medición de la deformación para la probeta 4 en la galga 2 (G2) utilizando el método A.

De los resultados anteriores se concluyen dos cosas: la posición de la probeta en la máquina afecta la medida de la deformación de la probeta, y la deformación de la probeta tiene el mismo comportamiento cuando esta no es retirada de la máquina. Ahora, se propone un método B para realizar las mediciones. Para estas pruebas se agregaron láminas de acero en la superficie de los planos que comprimen la muestra, con el objetivo de crear unas guías para que la probeta siempre quede en el mismo lugar, como se observa en la figura 60-b. El método B consistió en los siguientes pasos para obtener la información de la deformación.

1. La probeta se coloca en la plataforma de apoyo inferior para la probeta de la máquina.
2. La cruceta se baja hasta tocar la parte superior de la probeta
3. Se aplica una precarga de 50 lb-f.
4. El valor del offset es ajustado a cero en el instrumento Indicador y registrador de esfuerzos modelo P3.

5. Se registran los datos de la deformación para incrementos proporcionales de 10 lb-f.
6. La probeta es retirada de la máquina y se espera 10 minutos
7. Se coloca de nuevo la probeta en la máquina, en la misma posición.
8. Se aplica de nuevo los pasos 3, 5, 6, 7 y 8, para realizar otra medición.
9. Se retira la probeta de la máquina.



(a)



(b)

*Figura 60: (a) Configuración de la máquina para el método A iluminada con un láser. (b) Laminas agregadas a la plataforma inferior para el método B.*

Para realizar las mediciones de la deformación utilizando el método B, se utilizaron la probetas 5 y 6, porque estas tienen las mismas características del

material que las probetas 3 y 4. Además se evitó utilizar las mismas probetas debido al tipo de fijación de las galgas extensiométricas a las probetas. Al someter una probeta a pruebas repetidas es probable que el pegamento de la galga falle. En la figura 61 se observan las tres pruebas que se hicieron en la probeta 5 utilizando el método B. Se aprecia que las mediciones siguen teniendo un comportamiento lineal y los datos entre las tres pruebas tienen la misma pendiente de la deformación, por lo que, la fuerza que se aplica en este caso sí es repetible.

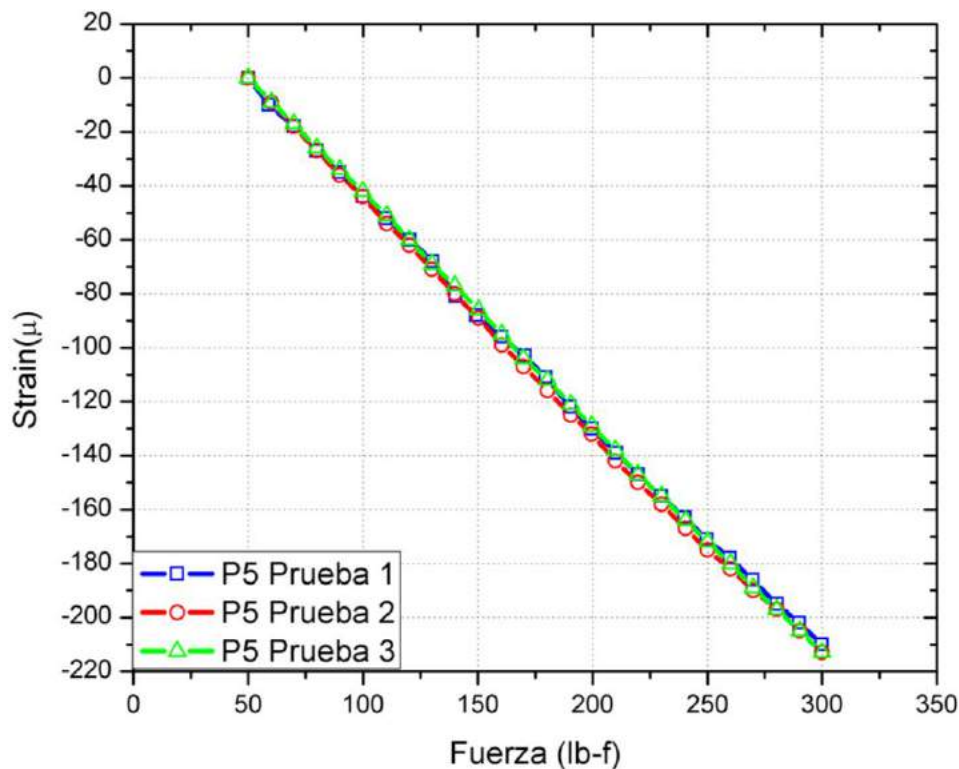


Figura 61: Medición de la deformación para la probeta 5 utilizando el método B.

Para comprobar el resultado anterior, se realizaron otras 3 pruebas utilizando la probeta 6 y el método B. En la figura 62 se observan los resultados de esta prueba. Se puede notar que los datos son lineales y para las tres pruebas los resultados tienen valores muy cercanos. Con los resultados para la probeta 5 y 6 utilizando el método B, se aseguró que la medición de la deformación siempre fuese la misma, incluso si la probeta se retira y se vuelve a poner en la máquina.

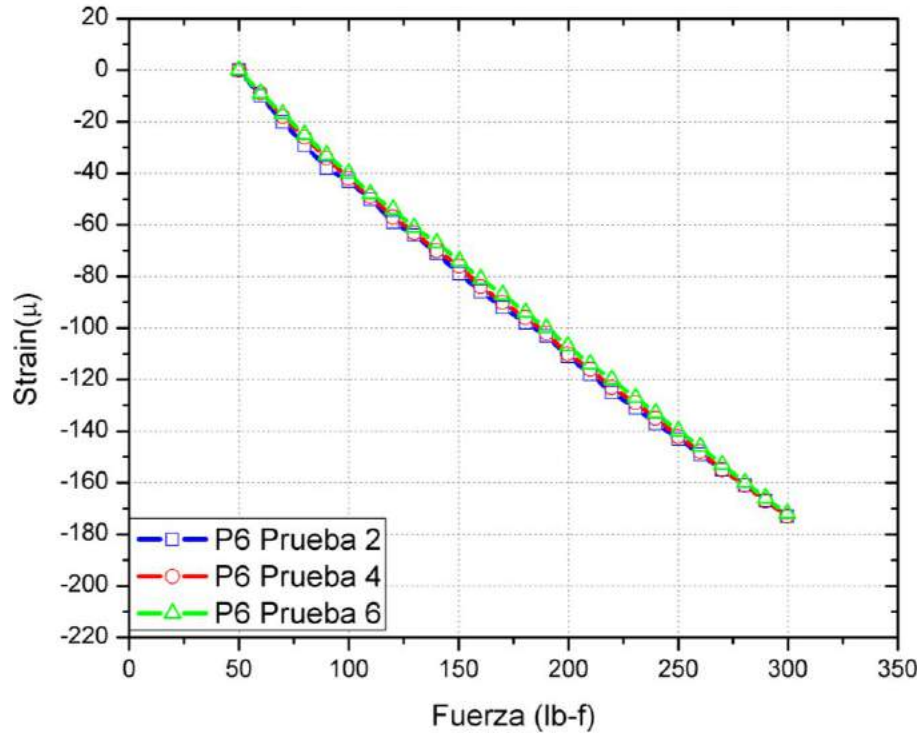


Figura 62: Medición de la deformación para la probeta 6 utilizando el método A.

En la figura 61 y figura 62 se observa que las mediciones de la deformación no alcanzan el mismo valor para la fuerza de 300 lb-f, esto se debe al tamaño de la galga que genera una medida puntual. En la figura 63 se observa que las galgas no están sobre el mismo eje horizontal.

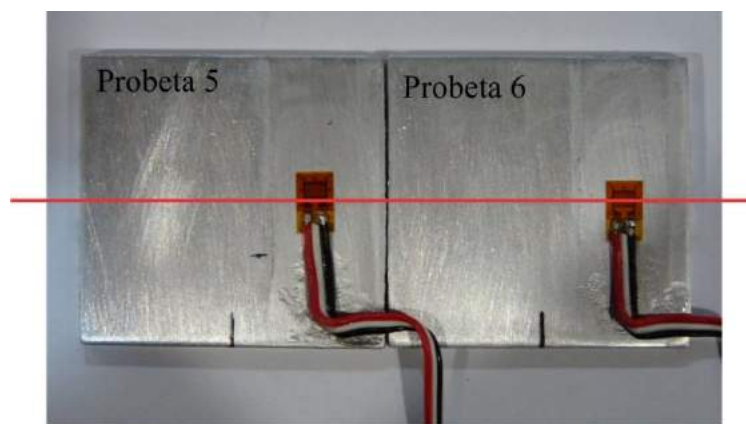


Figura 63. Probetas 5 y 6.



## 4.3 Medición del desplazamiento relativo utilizando

### DHI.

La medición del desplazamiento relativo de las probetas por DHI consistió en someter las probetas a una fuerza controlada por la máquina, mientras se registraban hologramas con una cámara digital y al final se almacenaban estos en la memoria de la computadora. Se utilizaron dos arreglos experimentales que miden el desplazamiento fuera del plano de la superficie de la probeta (ver figura 18). La razón de utilizar dos arreglos ópticos fue por el modo de aplicar la fuerza a la probeta. El primer modo consistió en aplicar la fuerza en incrementos de 10 lb-f y esperar un tiempo de 2 minutos, por lo tanto el sistema fue lento y no era necesario utilizar una cámara rápida. El segundo modo consistió en aplicar una fuerza lineal creciente en un tiempo corto (para una fuerza desde 70 a 300 lb-f, el tiempo fue de 80 s). Por esta razón no fue posible obtener los hologramas y al mismo tiempo controlar la fuerza de la máquina utilizando una cámara lenta. La solución fue realizar el registro de los hologramas con una cámara rápida y controlar esta con otra computadora.

Se nombró DHI de baja velocidad al primer arreglo óptico y al segundo arreglo óptico se le nombró de DHI de alta velocidad. Para DHI de baja velocidad, se utilizó un láser de color azul (longitud de onda 480 nm), una cámara digital (Chameleon CMLN-13S2M-CS) de 1280 x 960 pixeles, y se utilizó una sola computadora para manejar la máquina y la cámara digital. Para DHI de alta velocidad se utilizó una laser de color verde (longitud de onda de 532 nm), una cámara digital rápida (PCO Edge 5.5) de 1920x1080 y se utilizaron dos computadoras, una para la máquina y otra para la cámara digital. El segundo arreglo óptico utilizó otro laser porque era necesaria mayor potencia para iluminar la muestra debido a los tiempos cortos de exposición de la cámara rápida.

Con el primer arreglo óptico se realizaron mediciones del desplazamiento de la superficie en probetas con y sin galgas extensiométricas. Y con el segundo arreglo óptico se realizó la medición de la deformación en probetas que no tenían galgas extensiométricas. En la Tabla 11 se enumeran las probetas que se utilizaron en los arreglos ópticos.

	<b>Tamaño 1 38.1x60x3 mm</b>	<b>Tamaño 2 38.1x40x3 mm</b>	<b>Cantidad de galgas</b>
<b>Probeta 4</b>	Si		3
<b>Probeta 7</b>		Si	0
<b>Probeta 8</b>		Si	0
<b>Probeta 9 con agujero</b>		Si	0

*Tabla 11: Nuevas probetas para las mediciones en DHI.*

### **4.3.1 Mediciones con DHI de baja velocidad.**

Las mediciones del desplazamiento relativo con este arreglo óptico, se realizaron con la siguiente metodología:

1. Se coloca la probeta en la máquina y se aplica un valor de precarga de 50 lb-f.
2. La fuerza se incrementa en 10 lb-f.
3. Hay que esperar un tiempo de 2 minutos antes de registrar el holograma con la cámara digital. Este tiempo es para asegurar que la fuerza aplicada por la cruceta y la fuerza de reacción que ejerce la probeta a la cruceta se estabilicen, además para que las piezas mecánicas de la maquina también se estabilicen.
4. Se aplica de nuevo los pasos 2 y 3, hasta llegar a una fuerza aplicada de 300 lb-f.

Las probetas que se utilizaron con este arreglo óptico fueron las probetas 4 y 7. La probeta 4 tiene 3 galgas extensiométricas adheridas, mientras que la probeta 7 no tiene galgas pegadas. Para la probeta 4, se registró la deformación que detectaba las galgas extensiométrica G1 y G2, y al mismo tiempo se obtuvieron los hologramas.

#### **4.3.1.1 Medida del desplazamiento relativo en la probeta 4.**

En la figura 64 se observa la medición de la deformación unitaria obtenida por las galgas G1 y G2 adheridas a la probeta 4. El comportamiento de la

deformación es lineal y la deformación que detecta la galga 1 es mayor en comparación a la medición con la galga 2.

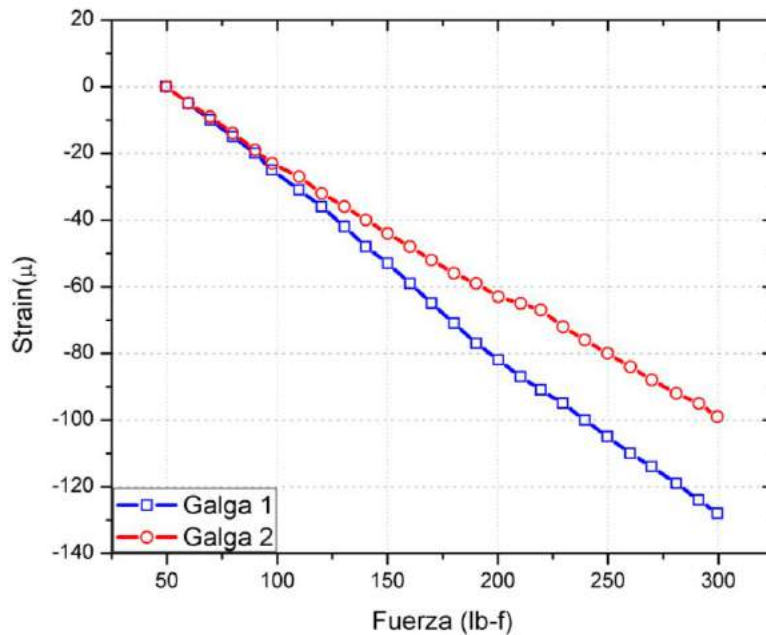


Figura 64: Medición de la deformación unitaria para la probeta 4 utilizando las galgas extensiométricas G1 y G2.

Para observar el comportamiento del desplazamiento relativo de la superficie de la probeta utilizando DHI, fue necesario realizar un procesamiento digital de los hologramas y los resultados se pueden observar en la figura 65. Aquí se graficó la fuerza aplicada a la probeta desde 50 a 200 lb-f, y se muestran los mapas de fase relativa entre los incrementos de la fuerza i.e. el primer mapa de fase se obtiene del holograma de 60 lb-f con respecto al de 50 lb-f, el segundo 70 lb-f con respecto al de 60 lb-f y así sucesivamente. Los círculos en la curva de la fuerza representan el instante en que se realizó la captura del holograma. De la figura 65 se puede observar que la fase óptica relativa permanece similar a baja compresión y cambia en valores altos. Esto se explica debido a que las galgas son artefactos superficiales de contacto que deforman el patrón de franjas y la probeta entra en otro estado de deformación.

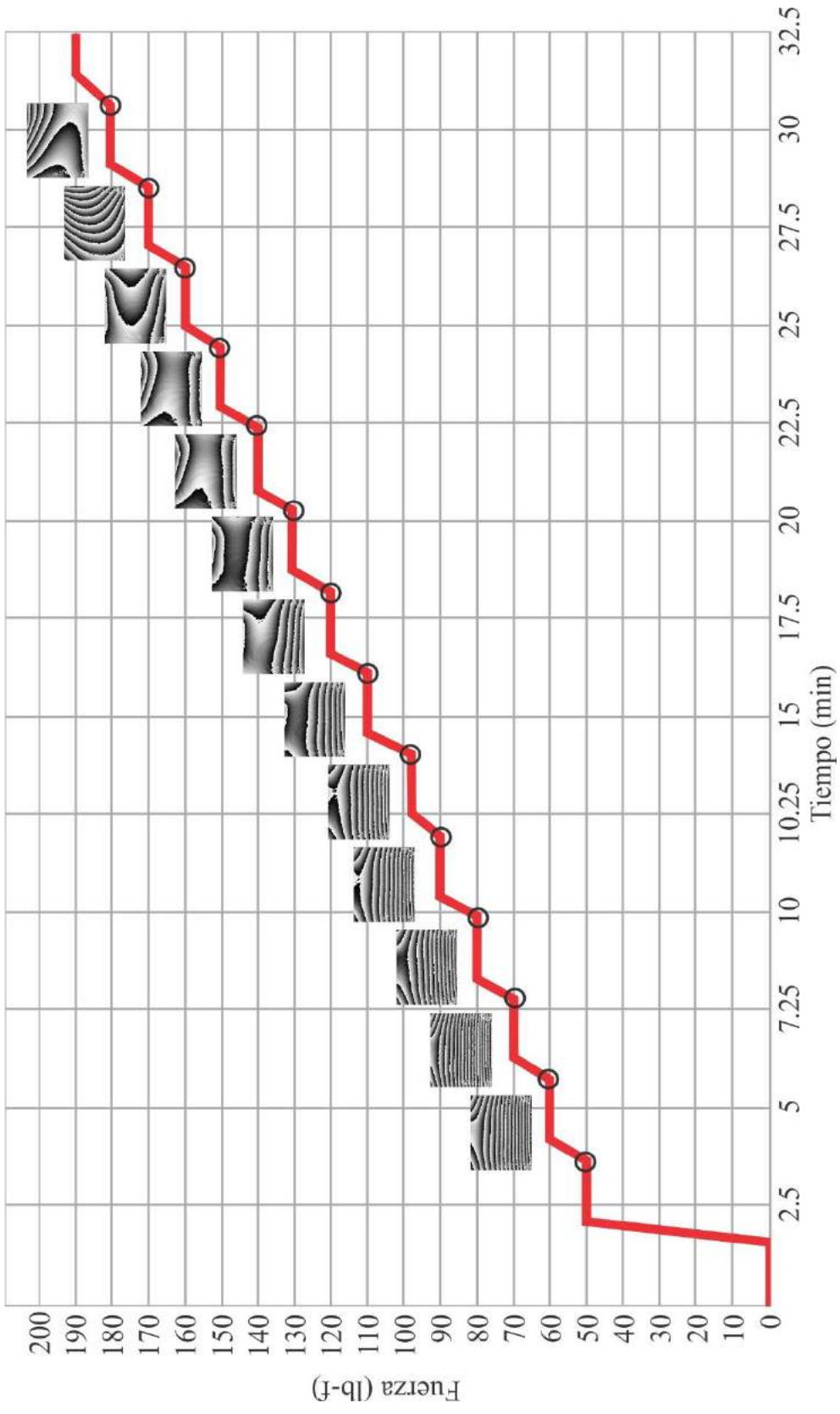


Figura 65: Fuerza aplicada a la probeta 4 y los mapas de fase obtenidos entre los incrementos de la fuerza. Medida del desplazamiento relativo en la probeta 7.

#### 4.3.1.2 Medida del desplazamiento relativo en la probeta 7.

La probeta 7 no tiene galgas extensiométricas por lo que solo se realizaron medidas del desplazamiento relativo de la superficie. La prueba consistió en poner la probeta en la máquina y aplicar una fuerza incremental de 10 lb-f desde 50 lb-f hasta 100 lb-f y en cada incremento se registró un holograma después de esperar un tiempo de 2 minutos. A continuación se retiró la probeta y se volvió a colocar de nuevo para realizar una segunda prueba. El propósito de esta prueba fue comparar los desplazamientos relativos de la superficie entre las dos pruebas y comprobar el resultado de la repetitividad obtenida con las galgas extensiométricas en las pruebas preliminares.

En la figura 66 se muestra la fuerza aplicada a la probeta 7 con respecto al tiempo, además se agregan los mapas de fase envuelta relativa para las pruebas 1 y 2. También se puede observar que la distribución de los mapas de fase entre las pruebas 1 y 2 es similar. Estos resultados muestran que la fuerza que aplica la maquina es repetible entre mediciones, confirmando los resultados obtenidos con las galgas extensiométricas pero con una resolución aún mayor.

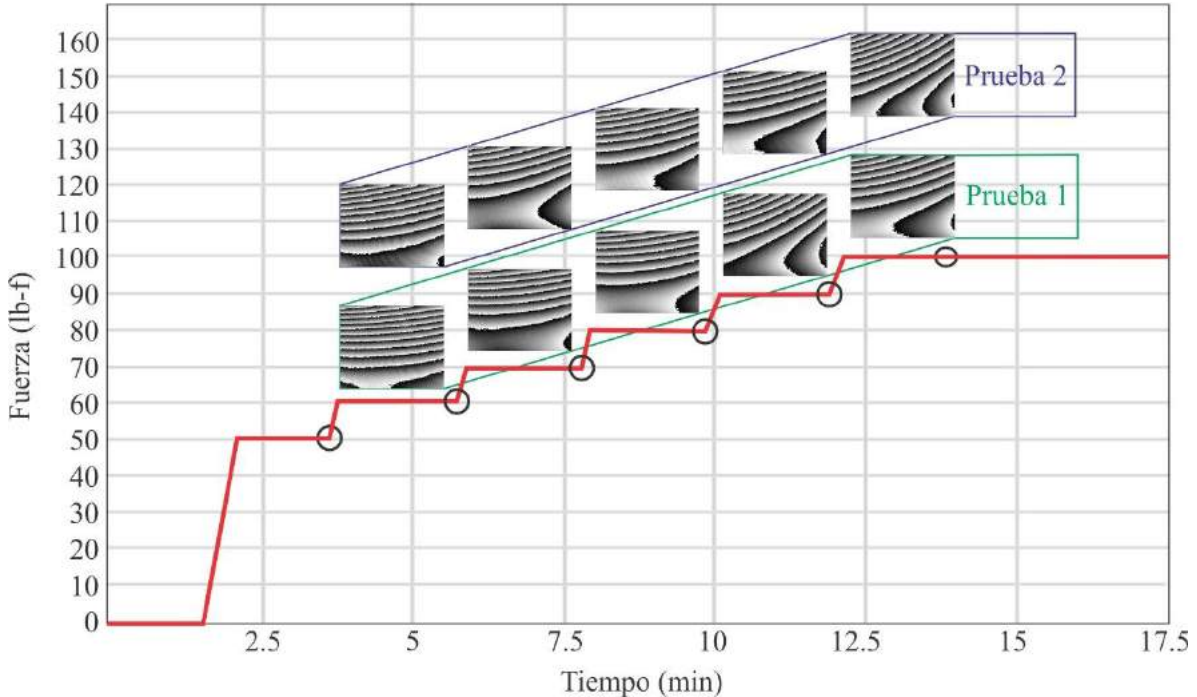


Figura 66: Comparación entre dos mediciones del desplazamiento relativo para la probeta 7, cuando fue sometida a incrementos de 10 lb-f desde 50 lb-f hasta 100 lb-f.

### **4.3.2 Mediciones con DHI de alta velocidad.**

Las mediciones del desplazamiento relativo con este arreglo óptico, se realizaron con la siguiente metodología:

1. Se coloca la probeta en la máquina y se aplica un valor de precarga de 70 lb-f. El valor de la precarga cambió de 50 lb-f a 70 lb-f a causa de una falla en el sistema mecánico (no determinado) para el cual el sistema de control implementado tardaba 4 segundos en restablecer la pendiente de la recta de la fuerza aplicada.
2. Se inicia la grabación de los hologramas con la cámara rápida y al mismo instante se aplica la fuerza a la probeta en forma continua y lineal.
3. Cuando la fuerza llega al valor deseado, la maquina automáticamente se detiene y después hay que suspender el registro de los hologramas.
4. La fuerza aplicada vuelve a cero y la probeta es retirada de la máquina.
5. Se repite los pasos del 1 al 4 para obtener la mediciones que sean necesarias.

Para las mediciones con este arreglo óptico, se utilizaron dos probetas de aluminio, una probeta con un agujero en el centro (probeta 9 en modo hole drilling) y una probeta sin agujero (probeta 8). Se utilizaron dos computadoras, una para controlar la máquina y la otra para controlar la cámara digital y almacenar los hologramas obtenidos. Al utilizar dos computadoras, fue necesario sincronizar los valores de la fuerza registrada por la máquina y los hologramas capturados con la cámara digital. La cámara rápida que se utilizó para este experimento, permitió aplicar una fuerza incremental constante, sin hacer una pausa prolongada entre los incrementos de la fuerza, como en el caso anterior. La velocidad de captura de las imágenes con la cámara fue de 100 cuadros por segundo.

#### **4.3.2.1 Medida del desplazamiento relativo en la probeta 8.**

En la figura 67 se observa una sección del resultado total del experimento. El segmento de grafica que se observa es para una fuerza aplicada desde 251 a 252.3 lb-f y en un tiempo de 0.45 s.

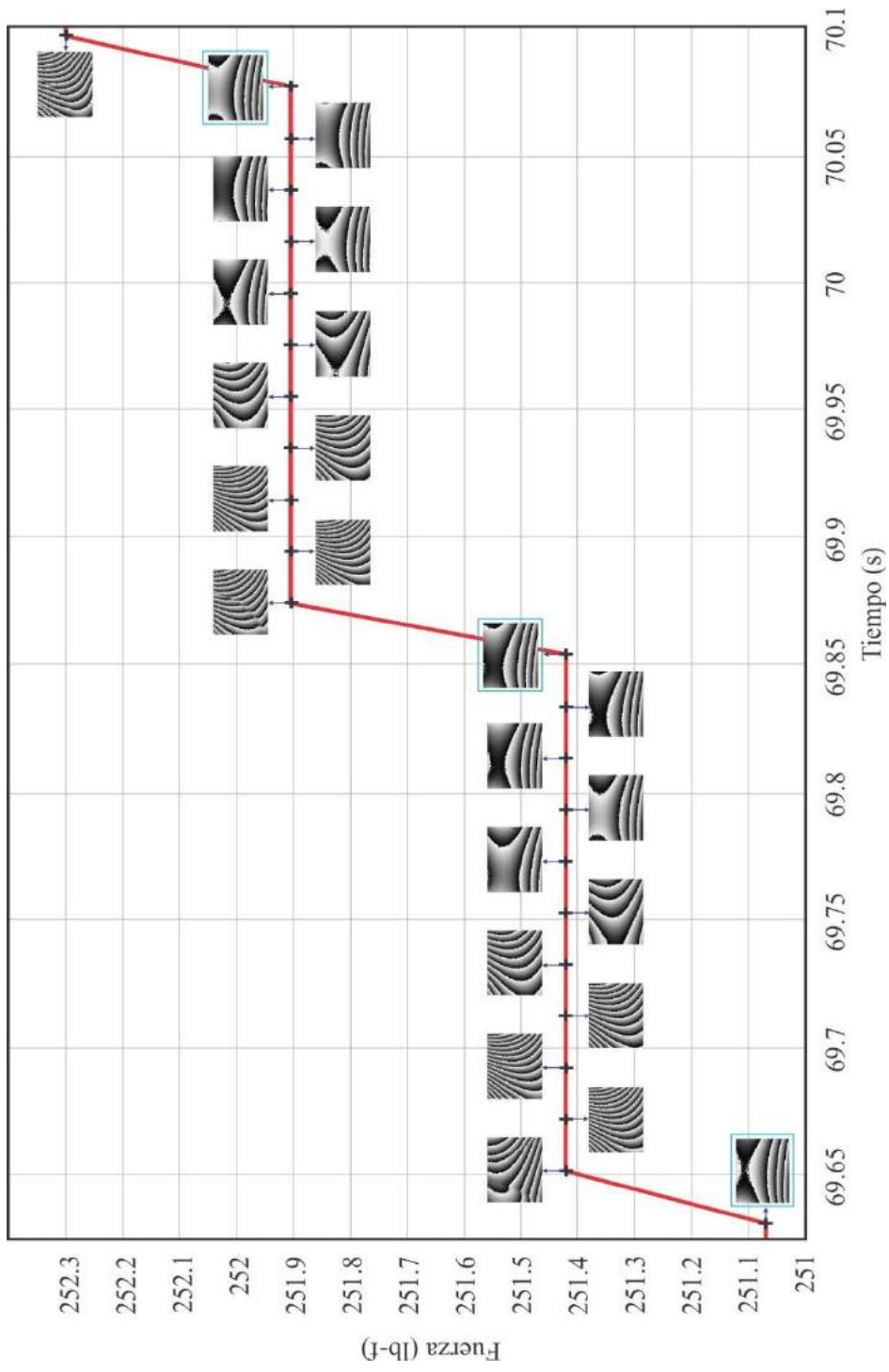


Figura 67: Mapas de fase obtenidos con el segundo arreglo óptico, utilizando la probeta 8 y una cámara rápida. Los mapas de fase en marco azul serían los observados con otra cámara.

En la gráfica se observa que hay tres incrementos en la fuerza de aproximadamente 0.4 lb-f. Al utilizar la cámara rápida se pudo observar como el mapa de fase envuelta iba cambiando. Cuando la fuerza se aplica en la probeta, se obtiene un mapa de fase con muchas franjas, pero después de 2 a 3 mapas de fase, se observa como disminuyó el número de franjas en la probeta. En esta prueba todos los mapas de fase se obtuvieron con un holograma de referencia que se capturó cuando se aplicaba una fuerza de 232.7 lb-f a la probeta.

Este fenómeno transitorio se atribuye al tipo de control que mueve el motor y a la holgura (backlash) que tiene la caja reductora del motor y la que existe entre los dientes de los engranes impresos en 3D. El control del motor aplica la fuerza por solo un instante (50 ms) y después deja sin energía el motor, permitiendo que la caja reductora que trae el motor quede con holgura, por lo tanto la fuerza de reacción que la placa de aluminio ejerce en la cruceta provoca que los engranes giren en sentido contrario y el motor no se opone a este movimiento.

En la figura 67 se muestra que la celda de carga no detecta este rápido backlash pero no así la fase óptica que lo registra. Con un arreglo óptico sin la misma cámara rápida solo se verán los tres mapas al final de cada estacionario (mapas con marco azul), por lo que este análisis de sobre-muestreo sirve para validar los transitorios que puede presentar este prototipo y caracterizarlo.

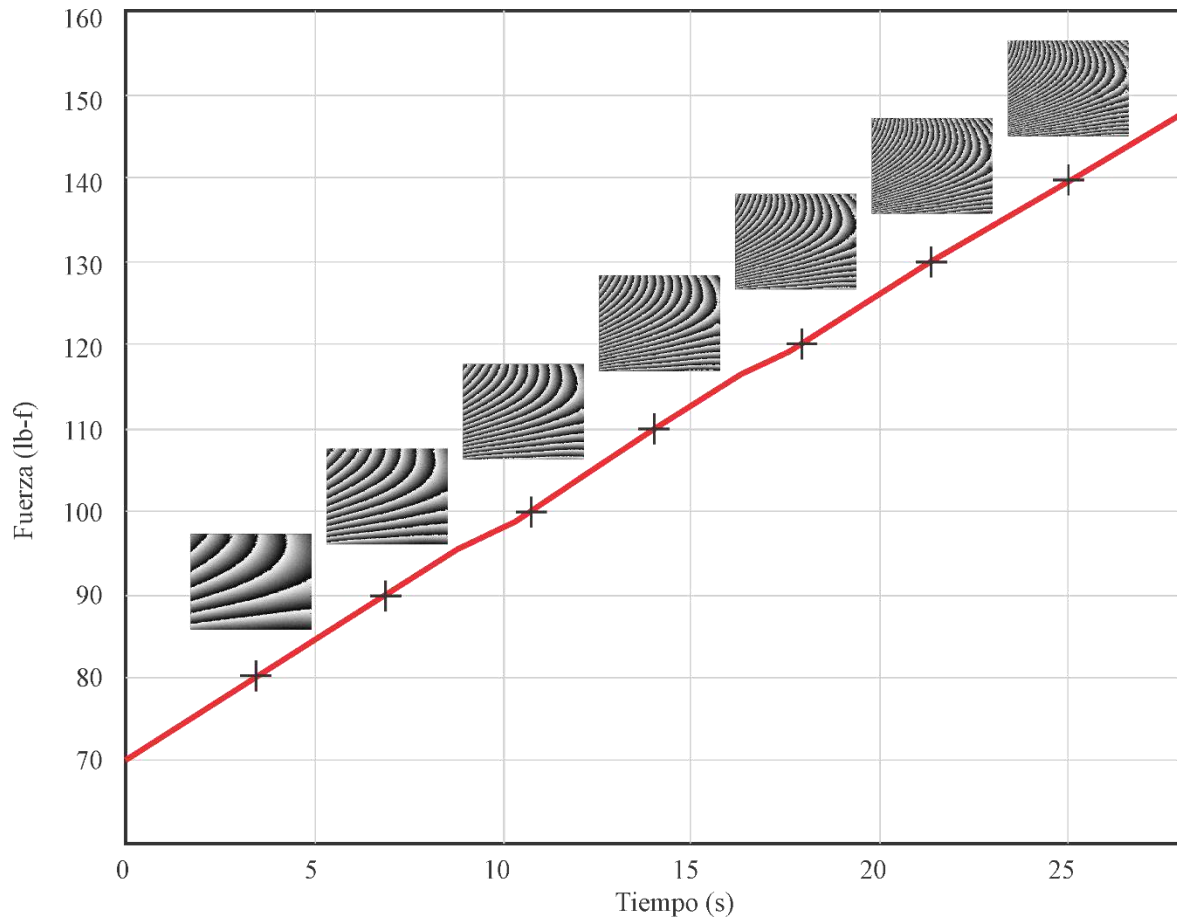
#### **4.3.2.2 Medida del desplazamiento relativo en la probeta 9.**

Para finalizar con las mediciones de desplazamiento relativo utilizando DHI, se analizara el efecto de perforar la probeta de aluminio con un agujero circular en la mitad de la probeta a modo de hole-drilling, en donde el agujero sirve como fuga o zona de relajamiento de los esfuerzos superficiales. Se utilizó la probeta 9 que tenía un agujero circular en el centro de 13 mm de diámetro. De nuevo, la probeta fue sometida a una fuerza incremental desde 70 lb-f hasta 270 lb-f y se registraron los hologramas con una cámara digital rápida.

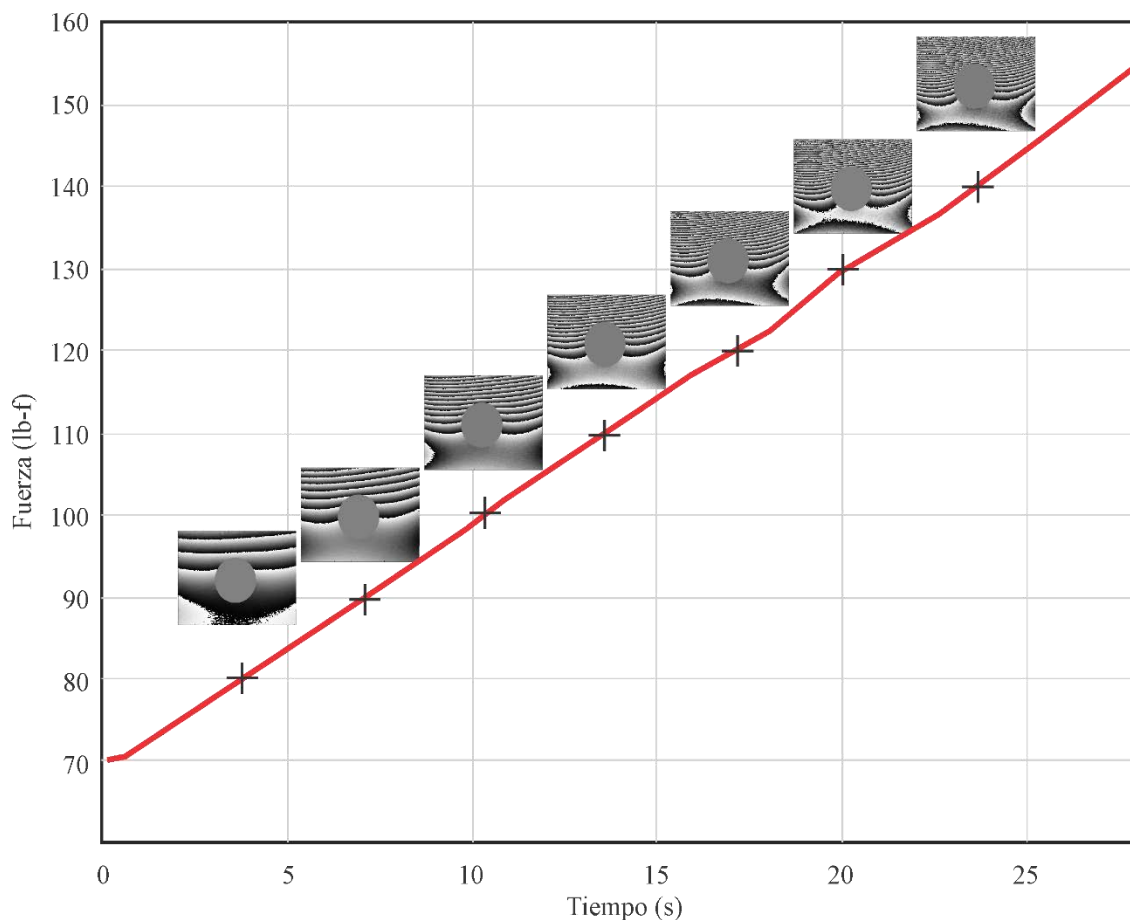
Para fines de comparación, en la figura 68 se observan los mapas de fase envuelta de la probeta 8 sometida a una fuerza que va desde 70 lb-f a 270 lb-f, sin embargo por simplicidad solo se observa el segmento para un rango de



fuerzas entre 70 lb-f y 140 lb-f. Todos los mapas de fase estuvieron referenciados a una fuerza de 70 lb-f. En la fase envuelta se puede observar que el incremento del desplazamiento para cada aumento 10 lb-f en la fuerza aplicada fue de  $1.5 \mu\text{m}$  aproximadamente. De la misma forma en la figura 68 se observan los mapas de fase envuelta para la probeta 9 sometida a la misma fuerza.



*Figura 68: Mapa de fase envuelta que experimenta la probeta 8 (sin agujero) a una fuerza desde 70 lb-f a 140 lb-f.*



*Figura 69: Mapa de fase envuelta que experimenta la probeta 9 (hole-drilling) a una fuerza desde 70 lb-f a 140 lb-f.*

Al comparar la figura 68 y la figura 69 se observa como el hole-drilling en la probeta ha cambiado los mapas de fase y la fuga de la deformación es evidente. En esta comparación es solo posible una vez que el prototipo ha sido caracterizado y validado en estos rangos de compresión.

# CAPITULO V

## 5 Discusión y conclusiones.

En el presente trabajo se logró realizar el diseño mecánico, electrónico y de software para la fabricación y puesta en marcha de una máquina de ensayo en compresión, a nivel prototipo para pruebas ópticas no destructivas. El rango de aplicaciones abarca desde materiales de ingeniería hasta biológicos. Las características finales 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.

La tasa de crecimiento máxima estuvo limitada por la velocidad de la comunicación entre la computadora y el microcontrolador, y el procesamiento de la información como se demostró con el arreglo de DHI de alta velocidad. La resolución en la lectura de la fuerza fue establecida por el sistema electrónico que se diseñó para el acondicionamiento de la señal de la celda de carga, obteniendo una resolución de  $\sim 0,2$  lb-f. El consumo de energía de la máquina es de 70 mW/h y su peso es de  $\sim 3$  Kg sin el sistema eléctrico y electrónico, lo que le otorga un alto grado de portabilidad.

Se comprobó la repetitividad de la aplicación de fuerza en la máquina mediante la medición de la deformación unitaria en probetas de aluminio 6061 utilizando galgas extensiométricas. Esta medición basada en el estándar de la industria de la transformación por medio de un instrumento indicador y registrador de esfuerzo modelo P3. Se garantizó la repetitividad por medio de guías en las placas de compresión a modo de tenazas en las versiones comerciales.

Al utilizar una cámara rápida se descubrió que los engranes impresos en 3D no son los más adecuados para transferencias de carga rápida ya que se observó cómo los mapas de fase entre estados de deformación cambian drásticamente cuando la fuerza es aplicada y cómo cambia la fase óptica después de que se relajan los engranes. Esta caracterización de los transitorios permite establecer los rangos en donde la maquina entrega la compresión de forma lineal y controlada, como se pudo observar con las pruebas de DHI.

## **Trabajo a futuro**

El tener esta máquina de ensayos caracterizada en esta versión prototipo, permitirá realizar pruebas de distintos objetos que se analizan dentro del grupo de metrología óptica. En esta línea ya se tienen contempladas dos aplicaciones a corto plazo en huesos y polímeros.

Para mejorar el desempeño de la máquina se propone remplazar algunas piezas mecánicas que son fundamentales para transmitir la potencia entre el motor y la cruceta como son los tornillos y los engranes. Se busca sustituir los tornillos (M10) por husillos de bolas, que tienen pocas pérdidas de energía por fricción y además agregan estabilidad a la cruceta, evitando desplazamientos de cuerpo rígido a la probeta cuando la máquina la está comprimiendo.

También se propone maquinar los engranes en acero pero de tipo recto o helicoidal. Se puede contemplar en una siguiente versión la inclusión de un sistema de mordazas que asegure que la probeta tenga la misma posición entre ensayos y que la fuerza aplicada a la probeta sea sobre el eje axial de esta.

Además estas mordazas podrían ser no solo de compresión sino de tensión con un nuevo desarrollo del software que permita controlar la máquina con mayor velocidad.

# CAPITULO VI

## Referencias.

- [1] C. Núñez, “Volumen 2 : Ensayos mecánicos . Ensayos no destructivos,” 2011.
- [2] A. society for testing and materials (ASTM), “ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”. 2000.
- [3] A. society for testing and materials (ASTM), “ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,”. 2016.
- [4] A. society for testing and materials (ASTM), “ASTM E9 Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature,”. 2000.
- [5] A. society for testing and materials (ASTM), “ASTM E290-14: Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility”. 2014.
- [6] P. E. Mix, Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide, 2 edition. 2005.
- [7] NDT Center Hashemite University, “Radiographic Testing,” Introduction to Non-Destructive Test. Tech., pp. 1–47, 2005.
- [8] A. society for testing and materials (ASTM), “ASTM E 94 – 00: Standard Guide for Radiographic Examination”. 2000.
- [9] L. Cartz, “CHAPTER 3 ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE TESTING FOR,” in Nondestructive Testing Methods And New Applications, M. Omar, Ed. croatia, 2012, pp. 19–33.
- [10] Jack Blitz, “Electrical and magnetic methods of nondestructive testing,” NDT E Int., vol. 31, no. 1, p. 69, Feb. 1998.
- [11] P. E. Mix, “Laser Testing Methods,” in Introduction to Nondestructive Testing, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005, pp. 131–178.
- [12] Š. František, K. Matúš, and O. Martin, “The Verification of Fixture for Shear Load with Optical Method ESPI,” Am. J. Mech. Eng., vol. 1, no. 7, pp. 180–184, 2013.
- [13] Y.-K. Zhu, G.-Y. Tian, R.-S. Lu, and H. Zhang, “A Review of Optical NDT Technologies,” Sensors, vol. 11, no. 12, pp. 7773–7798, Aug. 2011.

- [14] J. P. Waters, "HOLOGRAPHY," in *Holographic Nondestructive Testing*, Elsevier, 1974, pp. 5–59.
- [15] P. Approach et al., "Testing Machines and Strain Sensors," 1999.
- [16] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mecánica de Materiales*, 7a edición. 2009.
- [17] F. P. Beer, J. T. DeWold, and D. F. Mazurek, *Mecánica de Materiales*, 6ta ed. 2013.
- [18] S. Timoshenko, "9 RESISTENCIA DE MATERIALES Timoshenko 1.pdf." Madrid, 1957.
- [19] H. Bufler, "Theory of elasticity of a multilayered medium," *J. Elast.*, vol. 1, no. 2, pp. 125–143, Dec. 1971.
- [20] K. Akhtar and W. Xinwei, *Strain Measurements and Stress Analysis*, 1ra edición. Upper Saddle River, New Jersey, 2000.
- [21] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors*, vol. 53, no. 9. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [22] R. Pallás, *Sensores y acondicionadores de señal*, 4a edición. 2007.
- [23] C. A. Sciammarella and F. M. Sciammarella, "Strain Gages - Introduction to Electrical Strain Gages," in *Experimental Mechanics of Solids*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. 41–73.
- [24] A. Creus Solé, *Instrumentación Industrial*, 8a edición. Barcelona, España, 2010.
- [25] N. Premchand, "Mechatronics: Principles, Concepts and Applications," in *Mechatronics: Principles, Concepts and Applications*, First edit., Boston: Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd, 2003, pp. 186–195.
- [26] M.-M. Vishay, "Model P3 Strain Indicator And Recorder," 2005.
- [27] K. Anderson, M. Ayres, B. Sissom, and F. Askham, "Holographic data storage: rebirthing a commercialization effort," 2014, p. 90060C.
- [28] U. Schnars and W. Jueptner, "Digital Holography," in *Vasa*, 2008.
- [29] K. J. Gasvik, *Optical Metrology*, vol. C, no. July 1999. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
- [30] M. H. De la Torre. Ibarra, "Aplicación de la Interferometría de Patrones de Moteado y la Holografía Digital al Estudio de Deformaciones en 3D en Piezas Metálicas," Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., 2003.

- [31] J. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw Hill, Estados Unidos, 1968.
- [32] “Micro Tester - ADMET eXpert 4000.” [Online]. Available: <http://www.admet.com/products/micro-testers/expert-4000/>. [Accessed: 22-Dec-2016].
- [33] “1ST series of Universal Testing Machine from Tinius Olsen.” [Online]. Available: <https://www.tiniusolsen.com/list-of-products/model-1-st>. [Accessed: 22-Dec-2016].
- [34] “Instron - 5940 Single Column - Instron.” [Online]. Available: <http://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/5900/5940-single-column>. [Accessed: 22-Dec-2016].
- [35] R. C. Juvinall and K. M. Marshek, Machine Component Design, 5th Edition. 2005.
- [36] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica, 8a edición, México 2008.
- [37] Universidad de la Coruña, Laboratorio de Ingeniería Mecánica. [En línea]. Available: <http://lim.ii.udc.es/docencia/din-sismec/Tornillos.pdf>. [Último acceso: 15 3 2016].
- [38] B. B. C. Baker, S. A. Engineer, T. Instruments, and P Analog, “Tutorial : Basics of choosing and designing the best filter for an effective data-acquisition system,” 2006. [Online]. Available: [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1272322](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272322). [Accessed: 22-Dec-2016].
- [39] R. P-Areny and J. G. Webster, Sensors and Signal Conditioning, 2a edition, United States of America: Wiley, 2001.
- [40] B. Baker, A Baker’s dozen: real analog solutions for digital designers. Elsevier/Newes, 2005.
- [41] J. Karki, “Active Low-Pass Filter Design,” 2002.
- [42] J. Arrillaga y L. I. Eguíluz, Armónicos en sistemas de potencia, Universidad de Cantabria. España, 1994.
- [43] S. C. Mukhopadhyay, “Intelligent Sensing, Instrumentation and Measurements,” vol. 5, p. 21, 2013.

- [44] W. Kester, J. Bryant, and M. Byrne, "Grounding Data Converters and Solving the Mystery of 'AGND' and 'DGND,'" 2006.
- [45] Y. Ogushi and T. Takahashi, "[Analog-digital conversion].," *Kokyu To Junkan.*, vol. 21, no. 5, pp. 411–5, May 1973.
- [46] W. Kester, "MT-004: The Good, the Bad, and the Ugly Aspects of ADC Input Noise—Is No Noise Good Noise," 2005.
- [47] E. B. Albert, U. Polit, and E. B. Albert, "Eduard Bertran Albertí Señales y sistemas de tiempo discreto," 2015.
- [48] Modular Circuits, «Modular Circuits,» [En línea]. Available: <http://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>. [Último acceso: 28 2 2016].
- [49] R. Pallás Areny, *Adquisición y distribución de señales*, Primera ed. 2005.
- [50] B. Robert and N. Louis, *Electrónica: Teoría de Circuitos*, Sexta Edic. México, 1997.
- [51] D. Jones, "Printed Circuit Board ( Pcb ) Design Issues," 2008.
- [52] T. Instruments, "LMx37 3-Terminal Adjustable Regulators," Dallas, Texas, 2015.
- [53] M.-M. Vishay, "Micro Measurements," 2016.
- [54] M.-M. Vishay, "Strain Gage Selection: Criteria , Procedures , Recommendations TN-505-4," 2010.
- [55] M.-M. Vishay, "Instruction Surface Preparation for Strain Gage Bonding Surface Preparation for Strain Gage Bonding," 2014.
- [56] M.-M. Vishay, "Strain Gage Gage Adhesive Adhesive for Stress Stress Analysis Analysis and and Transducer Transducer Applications Applications," 2016.