

**ESTUDIO DE DEFORMACIONES EN SUPERFICIES SOMETIDAS A
ESFUERZOS MECÁNICOS UTILIZANDO INTERFEROMETRIA *SPECKLE***

**JOSE LUIS GALLEGO SOTELO
EDWARD FABIÁN MOSSO SOLANO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2005**

**ESTUDIO DE DEFORMACIONES EN SUPERFICIES SOMETIDAS A
ESFUERZOS MECÁNICOS UTILIZANDO INTERFEROMETRIA *SPECKLE***

**JOSE LUIS GALLEGO SOTELO
EDWARD FABIÁN MOSSO SOLANO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
Ingeniero Físico**

**Director
MSc. JAURY LEÓN TÉLLEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2005**

Nota de aceptación

Director

Jurado

Jurado

Popayán, 29 de abril de 2005

*Lo que sabemos es una gota de agua;
lo que ignoramos es el océano*

Isaac Newton

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. METROLOGÍA <i>SPECKLE</i>	3
1.1 PRINCIPIOS DE INTERFERENCIA.....	3
1.1.1 Intensidad.....	4
1.1.2 Interferómetros convencionales.....	5
1.1.2.1 Interferómetro de división de frente de onda.....	5
1.1.2.2 Interferómetro de división de amplitud.....	5
1.2 FENÓMENO <i>SPECKLE</i>	8
1.2.1 Aspectos generales.....	8
1.2.2 Formación del <i>speckle</i>	8
1.2.3 Medida de una superficie rugosa.....	9
1.2.4 Estadística del patrón de <i>speckle</i>	10
1.2.5 Contraste del patrón de <i>speckle</i>	12
1.3 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE PATRONES DE <i>SPECKLE</i>	13
1.3.1 Placas fotográficas.....	13
1.3.2 Cámaras CCD.....	13
1.4 INTERFEROMETRÍA DE PATRONES DE <i>SPECKLE</i>	14
1.4.1 ESPI y DSPI.....	14
1.4.2 Formación de franjas de correlación.....	16
1.4.3 Vector de sensibilidad.....	17
1.4.4 Interferómetro sensible a desplazamientos fuera del plano.....	18
1.4.5 Interferómetro sensible a desplazamientos en el plano.....	20
1.4.6 Interferómetro de iluminación asimétrica desde ambos lados de la normal.....	21
1.5 RELACIÓN ENTRE INTERFEROMETRÍA ELECTRÓNICA DE PATRONES DE <i>SPECKLE</i> E INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA.....	21
2 MÉTODOS DE CORRIMIENTO DE FASE.....	23
2.1 INTERFEROMETRÍA POR CORRIMIENTO DE FASE.....	23
2.2 ALGORITMOS DE CORRIMIENTO DE FASE.....	26
2.2.1 Algoritmo de tres pasos.....	26
2.2.2 Algoritmo de cuatro pasos.....	27
2.2.3 Algoritmo de Carré.....	27
2.2.4 Algoritmo de cinco pasos.....	27
2.3 CORRECCIÓN DE LAS AMBIGÜEDADES EN LA FASE MÓDULO 2π	28
2.4 DESENVOLVIMIENTO DE FASE	31
2.4.1 Algoritmos para el desenvolvimiento de la fase.....	32

2.4.1.1	Algoritmo dependiente de la trayectoria.....	33
2.4.1.2	Algoritmo independiente de la trayectoria.....	34
3	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.....	36
3.1	POLÍMEROS.....	36
3.1.1	Elastómeros.....	37
3.1.1.1	Caucho natural.....	38
3.1.1.2	Cauchos sintéticos.....	38
3.1.2	Plásticos.....	39
3.1.2.1	Polietileno.....	39
3.1.2.2	Policloruro de vinilo (PVC).....	39
3.2	ESFUERZO Y TENSIÓN.....	40
3.3	DEFORMACIÓN O ALRGAMIENTO.....	41
3.4	MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	41
3.5	COEFICIENTE DE POISSON.....	42
3.6	MÓDULO DE RIGIDEZ.....	42
3.7	TENSIÓN REAL – DEFORMACIÓN REAL.....	42
4.	SISTEMA IMPLEMENTADO Y METODOLOGÍA EMPLEADA..	44
4.1	SISTEMA ÓPTICO.....	44
4.2	SISTEMA DE CORRIMIENTO DE FASE.....	46
4.2.1	Control.....	46
4.2.2	Caracterización.....	48
4.3	SISTEMA ELECTROMECAÁNICO DE TRACCIÓN.....	50
4.3.1	Control del motor paso a paso.....	51
4.3.2	Caracterización.....	52
4.4	ADQUISICIÓN DE LOS PATRONES DE SPECKLE.....	56
4.5	SOFTWARE.....	56
4.6	MUESTRA BAJO ESTUDIO.....	57
4.7	METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE FASE	57
4.7.1	Filtro trigonométrico.....	59
5.	RESULTADOS.....	62
5.1	CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS UTILIZANDO UN MÉTODO CONVENCIONAL.....	62
5.1.1	Muestra #1 hule látex natural (0.63 mm de espesor).....	62
5.1.2	Muestra #2 hule látex natural (0.29 mm de espesor).....	64
5.2	CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS UTILIZANDO DSPI.....	66
5.2.1	Muestra #1 hule látex natural (0.63 mm de espesor).....	70
5.2.2	Muestra #2 hule látex natural (0.29 mm de espesor).....	90
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	102
6.	CONCLUSIONES.....	103
	RECOMENDACIONES.....	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	106
	ANEXOS.....	108

LISTA DE GRÁFICAS

Figura 1.1	Interferencia de dos fuentes puntuales.....	3
Figura 1.2	Interferómetro de Michelson.....	6
Figura 1.3	Interferómetro de Mach-Zehnder.....	7
Figura 1.4	Modelo típico del patrón de <i>speckle</i>	9
Figura 1.5	Diagrama de interferencia de ondas coherentes.....	9
Figura 1.6	Ilustración del proceso de lectura en una cámara CCD.....	14
Figura 1.7	Patrón de <i>speckle</i>	15
Figura 1.8	Franjas de correlación.....	15
Figura 1.9	Mapas de fase.....	15
Figura 1.10	Dirección del vector de sensibilidad.....	18
Figura 1.11	Interferómetro sensible a desplazamientos <i>fuera del plano</i>	19
Figura 1.12	Interferómetro sensible a desplazamientos en el plano.....	20
Figura 1.13	Interferómetro sensible a movimientos <i>en y fuera del plano</i>	21
Figura 2.1	Cambio en la fase de una haz luminoso mediante el uso de una lámina de vidrio.....	24
Figura 2.2	Cambio en la fase de una haz luminoso usando un actuador piezoeléctrico.....	25
Figura 2.3	Corrección en ambigüedades en la fase de módulo 2π	28
Figura 2.4	Fase de módulo π	29
Figura 2.5	Fase de módulo 2π	29

Figura 2.6	Fase de módulo 2π	30
Figura 2.7	Desdoblamiento de la fase.....	32
Figura 2.8	Camino para el desenvolvimiento de la fase.....	33
Figura 2.9	Estructura de un grafo para el desenvolvimiento de la fase.....	34
Figura 3.1	Curvas típicas de esfuerzo contra deformación para tres tipos de materiales.....	37
Figura 3.2	Unidad estructural repetitiva del caucho natural.....	38
Figura 3.3	Unidad estructural del estireno-butadieno.....	38
Figura 3.4	Unidad estructural química repetitiva del polietileno.....	39
Figura 3.5	Unidad estructural repetitiva del PVC.....	39
Figura 4.1	Sistema interferométrico implementado.....	45
Figura 4.2	Esquema de la tarjeta de control para el sistema de corrimiento de fase.....	47
Figura 4.3	Configuración utilizada para caracterizar el sistema de corrimiento de fase.....	48
Figura 4.4	Franjas de interferencia generadas con saltos de fase de 90°	49
Figura 4.5	Relación entre la fase introducida y el voltaje aplicado.....	50
Figura 4.6	Sistema electromecánico de tracción.....	51
Figura 4.7	Esquema de la tarjeta para el control de un motor paso a paso unipolar.....	52
Figura 4.8	Gráficas que representan la linealidad existente entre los pasos del motor y el desplazamiento lineal de la mordaza móvil.....	53
Figura 4.9	Mapa de fase filtrado con cuatro filtros diferentes.....	60
Figura 4.10	Mapa de fase filtrado con filtro trigonométrico.....	61
Figura 5.1	Diagrama esfuerzo-deformación para una muestra de hule látex...	63

Figura 5.2	Diagrama esfuerzo-deformación para una muestra de hule látex..	65
Figura 5.3	Mapas de fase y representación gráfica de las deformaciones.....	69
Figura 5.4	Datos experimentales de desplazamientos <i>en el plano</i> para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 3×10^{-3} N.....	73
Figura 5.5	Datos experimentales de desplazamientos <i>en el plano</i> y <i>fuera del plano</i> para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 3×10^{-3} N.....	74
Figura 5.6	Datos experimentales del módulo de Young y el coeficiente de Poisson para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 3×10^{-3} N.....	75
Figura 5.7	Datos experimentales de desplazamientos <i>en el plano</i> para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 6×10^{-3} N.....	78
Figura 5.8	Datos experimentales de desplazamientos <i>en el plano</i> y <i>fuera del plano</i> para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 6×10^{-3} N.....	79
Figura 5.9	Datos experimentales del módulo de Young y el coeficiente de Poisson para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 6×10^{-3} N.....	80
Figura 5.10	Datos experimentales de desplazamientos <i>en el plano</i> para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 9×10^{-3} N.....	83
Figura 5.11	Datos experimentales de desplazamientos <i>en el plano</i> y <i>fuera del plano</i> para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 9×10^{-3} N.....	84
Figura 5.12	Datos experimentales del módulo de Young y el coeficiente de Poisson para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 9×10^{-3} N.....	85
Figura 5.13	Diagrama esfuerzo-deformación para una muestra de hule látex de 0.63 mm de espesor.....	89
Figura 5.14	Datos experimentales de desplazamientos <i>en el plano</i> para una muestra hule látex sometida a una tensión de 1×10^{-3} N.....	92
Figura 5.15	Datos experimentales del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 1×10^{-3} N.....	93

Figura 5.16	Datos experimentales obtenidos de desplazamientos <i>en el plano</i> para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 2×10^{-3} N.....	95
Figura 5.17	Datos experimentales del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 2×10^{-3} N.....	96
Figura 5.18	Datos experimentales de desplazamientos <i>en el plano</i> para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 3×10^{-3} N.....	98
Figura 5.19	Datos experimentales del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de 3×10^{-3} N.....	99
Figura 5.20	Diagrama esfuerzo-deformación para una muestra de hule látex de 0.29 mm de espesor.....	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Corrección de la fase módulo π	31
Tabla 4.1	Fase introducida y voltaje aplicado.....	50
Tabla 4.2	Secuencia paso completo del motor.....	52
Tabla 4.3	Tablas de datos experimentales del sistema de tracción.....	53
Tabla 4.4	Datos experimentales de fuerza y deformación para una muestra de hule látex de 0.63 mm de espesor.....	54
Tabla 4.5	Datos de fuerza y deformación obtenidos por interpolación para una muestra de hule látex de 0.63 mm de espesor.....	55
Tabla 4.6	Datos experimentales de fuerza y deformación para una muestra de hule látex de 0.29 mm de espesor.....	55
Tabla 4.7	Datos de fuerza y deformación obtenidos por interpolación para una muestra de hule látex de 0.29 mm de espesor.....	55
Tabla 5.1	Datos experimentales para los valores de esfuerzo, deformación para una muestra de hule látex.....	62
Tabla 5.2	Datos experimentales para los valores del módulo de Young para una muestra de hule látex.....	64
Tabla 5.3	Datos experimentales obtenidos de esfuerzo, deformación para una muestra de hule Látex.....	65
Tabla 5.4	Datos experimentales para los valores del módulo de Young para una muestra de hule látex.....	66
Tabla 5.5	Valores medios del módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para una muestra sometida a una tensión de 3×10^{-3} N.....	71
Tabla 5.6	Valores medios del módulo de Young, coeficiente de Poisson para una muestra sometida a una tensión de 3×10^{-3} N.....	72

Tabla 5.7	Valores medios del módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 6×10^{-3} N.....	76
Tabla 5.8	Valores del módulo de Young y coeficiente de Poisson para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 6×10^{-3} N.....	77
Tabla 5.9	Valores medios del módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 9×10^{-3} N.....	81
Tabla 5.10	Valores del módulo de Young y coeficiente de Poisson para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 9×10^{-3} N.....	82
Tabla 5.11	Datos experimentales del esfuerzo, deformación y módulo de Young para el ensayo de tracción #1.....	86
Tabla 5.12	Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #1.....	86
Tabla 5.13	Datos experimentales del esfuerzo, deformación y módulo de Young para el ensayo de tracción #2.....	87
Tabla 5.14	Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #2.....	87
Tabla 5.15	Datos experimentales del esfuerzo, deformación y módulo de Young para el ensayo de tracción #3.....	88
Tabla 5.16	Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #3.....	88
Tabla 5.17	Valor del módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para una muestra de hule látex de 0.63 mm de espesor.....	89
Tabla 5.18	Valor medio del módulo de Young de una muestra de hule látex.	90
Tabla 5.19	Valores medios del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de 1×10^{-3} N.....	91
Tabla 5.20	Valor medio del módulo de Young del material, cada valor con su respectivo máximo, mínimo y desviación estándar.....	93
Tabla 5.21	Valores medios del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de 2×10^{-3} N.....	94

Tabla 5.22	Valor medio del módulo de Young del material, cada valor con su respectivo máximo, mínimo y desviación estándar.....	96
Tabla 5.23	Valores medios del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de 3×10^{-3} N.....	97
Tabla 5.24	Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #1.....	100
Tabla 5.25	Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #2.....	100
Tabla 5.26	Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #3.....	101
Tabla 5.27	Valor del módulo de Young para una muestra de hule látex de 0.29 mm de espesor.....	102

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los materiales, cuando se utilizan para un fin específico, están sujetos a fuerzas o cargas externas que pueden llegar a alterar su óptimo desempeño o incluso podrían llegar a destruirlos. En tales condiciones es necesario conocer las características propias del material para de esta forma restringir su uso y evitar que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido no sean excesivos y el material no se fracture; así, un material con poca deformación plástica, por ejemplo el vidrio, difícilmente se podrá emplear como protector, como es el caso de los parachoques de autos, y en lugar de eso, se preferirá el uso de un material del tipo elastomérico el cual posee una alta capacidad de absorción de energía.

El comportamiento mecánico de un material está ligado directamente con la relación existente entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada. Existen muchos tipos de ensayo, entre los cuales encontramos los ensayos de fatiga, fluencia, relajación, compresión y tracción; siendo este último el más empleado, pues entrega la mayoría de los datos necesarios a la hora de caracterizar un material. Dentro de las propiedades mecánicas que se pueden obtener a partir de la aplicación de un ensayo de tracción tenemos el módulo de elasticidad o módulo de Young, el coeficiente de Poisson, el módulo de rigidez, entre otros.

El ensayo de tracción consiste fundamentalmente en someter el material a una deformación mediante la aplicación de una fuerza, para luego establecer una curva que relacione la deformación producida con la fuerza aplicada.

En la actualidad los ensayos de tracción se realizan de forma automatizada [1], en donde las tensiones que se aplican sobre la muestra son controladas por medio de un computador, el registro de las cargas aplicadas se realiza utilizando celdas de carga y la medida de las deformaciones, generadas por la aplicación de dichas cargas, se lleva a cabo mediante el uso de instrumentos llamados extensómetros, que basan su funcionamiento en principios mecánicos, eléctricos u ópticos.

La interferometría digital de patrones de *speckle* (DSPI), la cual basa su funcionamiento en el principio de interferencia de ondas luminosas, empleada como técnica de detección proporciona una poderosa herramienta para la cuantificación de las deformaciones producidas sobre un material.

La utilización de esta técnica trae ventajas tales como: una alta precisión en las medidas, que en muchos casos supera la precisión de los métodos tradicionales pues su resolución está determinada por la longitud de onda de la fuente de iluminación usada; elimina la necesidad de palpar el objeto de prueba, convirtiéndola en una técnica no destructiva, lo

que significa que puede ser utilizada sobre cualquier material ya que no se genera un contacto *físico* directo sobre el objeto de prueba, por lo que no modifica su forma al intentar medirlo, y finalmente la velocidad con la que se puede procesar grandes cantidades de información.

En este trabajo se desarrolló un sistema basado en la técnica DSPI para medir las deformaciones que sufre un material elastomérico cuando es sometido a cargas externas. Para ello se implementó un interferómetro de iluminación dual, capaz de medir desplazamientos producidos en el plano de la superficie y fuera del él.

Luego de obtener el mapa de desplazamientos, a partir de las deformaciones producidas sobre la muestra, se hizo posible el cálculo del módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el módulo de rigidez, los cuales fueron posteriormente comparados con valores obtenidos utilizando técnicas puramente mecánicas.

Como material de prueba se utilizó el caucho natural, ya que al ser un material elastomérico posee un bajo módulo de elasticidad (no necesita una potencia extremada de la máquina como el en caso de ensayos sobre metales) y dada la gran importancia que ha tomado en la fabricación de diversos productos industriales y la poca información que se encuentra sobre este material en comparación con otros como el acero y el concreto.

1 METROLOGÍA SPECKLE

1.1 PRINCIPIOS DE INTERFERENCIA

Una característica importante del movimiento ondulatorio es el fenómeno de interferencia que ocurre cuando dos o más ondas coinciden en el espacio y en el tiempo.

Dos fuentes S_1 y S_2 que oscilan en fase con la misma frecuencia angular ω y amplitudes E_{01} y E_{02} producen ondas esféricas armónicas monocromáticas, ecuación (1.1),

$$E_1(t) = E_{01} \cos(\omega t + kr_1) \text{ y } E_2(t) = E_{02} \cos(\omega t + kr_2) \quad (1.1)$$

donde r_1 y r_2 son respectivamente las distancias desde el punto P a las fuentes S_1 y S_2 , k es el número de onda y t es el tiempo en un instante determinado.

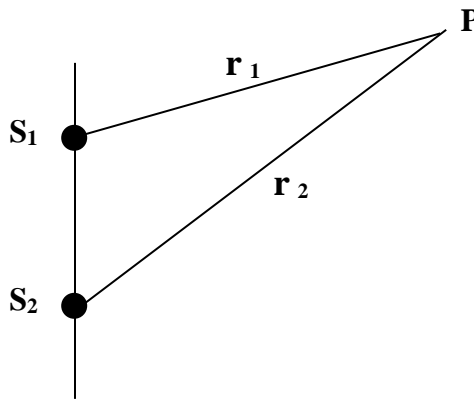


Figura 1.1 Interferencia de dos fuentes puntuales

Si comparamos las ondas con la ecuación del movimiento armónico simple, ecuación (1.2),

$$y = A \cos(\omega t + \alpha), \quad (1.2)$$

las cantidades kr_1 y kr_2 juegan el mismo papel que las fases iniciales, entonces el desfase entre los dos movimientos ondulatorios en cualquier punto P es:

$$\Delta\phi = kr_1 - kr_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2). \quad (1.3)$$

Si las ondas $E_1(t)$ y $E_2(t)$ tienen la misma polarización en P, la amplitud resultante es la suma vectorial de las amplitudes, ecuación (1.4).

$$E = \sqrt{E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(kr_1 - kr_2)}. \quad (1.4)$$

Esta amplitud toma su máximo valor cuando la diferencia de fase $\Delta\phi = kr_1 - kr_2$ es cero o un múltiplo par de π .

$$\Delta\phi = 2n\pi, \quad (1.5)$$

$$kr_1 - kr_2 = 2n\pi. \quad (1.6)$$

Teniendo en cuenta que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, se obtiene:

$$r_1 - r_2 = n\lambda. \quad (1.7)$$

La amplitud resultante es la suma aritmética de las amplitudes y en este caso se habla de interferencia constructiva.

Cuando la diferencia de fase $\Delta\phi = kr_1 - kr_2$ es un múltiplo impar de π

$$\Delta\phi = (2n+1)\pi, \quad (1.8)$$

$$kr_1 - kr_2 = (2n+1)\pi \quad (1.9)$$

y dado que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, se tiene que:

$$r_1 - r_2 = \frac{(2n+1)\lambda}{2}. \quad (1.10)$$

La amplitud resultante es la diferencia de las amplitudes y en este caso tenemos interferencia destructiva.

1.1.1 Intensidad La intensidad de una onda dentro del mismo medio se puede expresar como:

$$I = \langle E^2 \rangle, \quad (1.11)$$

donde el símbolo $\langle E^2 \rangle$ denota el promedio en el tiempo de la magnitud del campo eléctrico al cuadrado. Entonces en el punto donde las dos ondas interfieren, la intensidad está dada por la ecuación (1.12)

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}, \quad (1.12)$$

siempre que

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle \quad I_2 = \langle E_2^2 \rangle \quad I_{12} = 2\langle E_1 \cdot E_2 \rangle. \quad (1.13)$$

Este último es llamado término de interferencia y puede ser reescrito como:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi, \quad (1.14)$$

de esta forma la intensidad total es

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi. \quad (1.15)$$

La intensidad del patrón de interferencia varía de forma sinusoidal entre los valores $I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ y $I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ máximo y mínimo respectivamente.

1.1.2 Interferómetros convencionales Existen sistemas o arreglos de componentes ópticos capaces de hacer interferir dos o más ondas, este tipo de dispositivos se conoce con el nombre de interferómetros y se pueden clasificar en interferómetros de división de frente de onda, los cuales emplean elementos tales como rendijas o redes de difracción para producir dos o más fuentes puntuales perfectamente coherentes, e interferómetros de división de amplitud, los cuales utilizan espejos semireflectantes para dividir el haz.

1.1.2.1 Interferómetro de división de frente de onda Cuando un frente de onda se limita por una apertura, se pone de manifiesto una propiedad fundamental de las ondas llamada principio de Huygens-Fresnel [2], el cual establece que cada punto en un frente de onda en propagación sirve como fuente de trenes de ondas esféricas secundarias de tal modo que, al cabo de cierto tiempo, el frente de onda será la envolvente de estos trenes de ondas. Entre los interferómetros de división de frente de onda más conocidos tenemos el interferómetro de Young y el biprisma de Fresnel.

1.1.2.2 Interferómetro de división de amplitud Supóngase que una onda luminosa incide sobre una superficie semitransparente (divisor de haz). Parte de la onda será transmitida y parte de la onda será reflejada. Tanto la onda transmitida como la reflejada tendrán amplitudes menores que la original. Se puede decir en forma figurada que la amplitud ha sido dividida. Si las dos ondas producidas por división pueden ser reunidas de alguna manera sobre un detector, habrá interferencia en tanto que exista algún grado de coherencia entre ellas.

Existe una gran cantidad de interferómetros de división de amplitud, el más conocido de todos, e históricamente el más importante, es el interferómetro de Michelson. Su configuración es ilustrada en la figura 1.2.

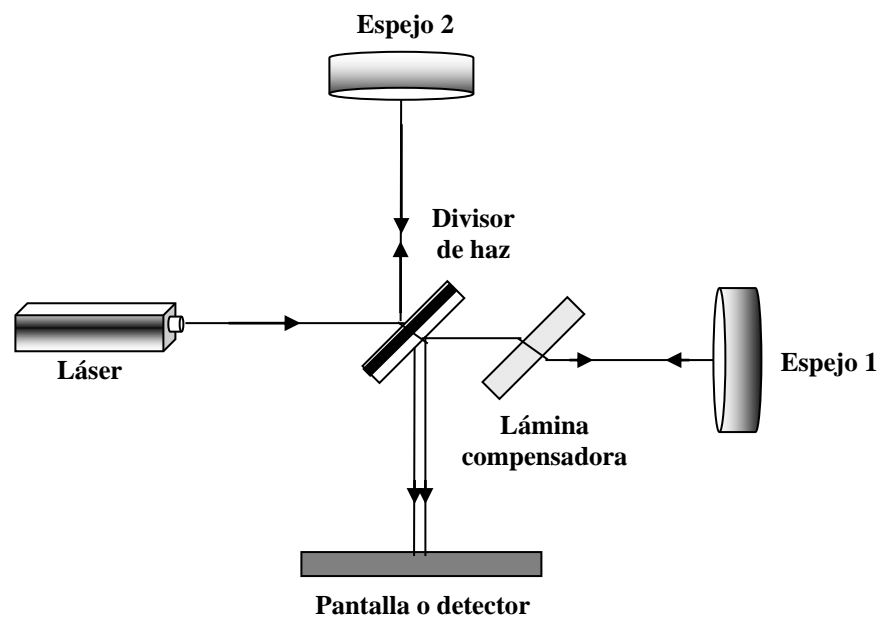


Figura 1.2 Interferómetro de Michelson

Una fuente de luz emite una onda. El divisor de haz divide la onda en dos, una porción se transmite y continúa su trayectoria y la otra porción se refleja sobre el divisor. Las dos ondas serán reflejadas posteriormente por los espejos 1 y 2 y regresadas al divisor de haz. Parte de la onda que viene del espejo 2 pasa a través del divisor y parte de la onda proveniente del espejo 1 es desviada por el divisor; por lo tanto, las dos ondas se unen, son recogidas por el detector y es posible que se produzca interferencia. A veces es necesario la inclusión de una lámina compensadora en uno de los brazos, esto debido a que un haz pasa tres veces a través del divisor mientras que el otro pasa solo una vez, de esta forma se garantiza que cualquier diferencia de camino óptico aparece de la diferencia de camino real. El interferómetro sin lámina compensadora puede ser usado con una fuente cuasi-monocromática como por ejemplo una fuente láser.

El interferómetro de Mach-Zehnder es otro dispositivo de división de amplitud. Como se muestra en la figura 1.3, consta de dos divisores de haz y dos espejos totalmente reflectores. Las dos ondas dentro del aparato viajan a lo largo de caminos separados. Una pequeña diferencia de los caminos puede ser producida por un ligero giro de uno de los divisores de haz. Dado que los caminos están separados, este interferómetro es relativamente difícil de alinear; por la misma razón, sin embargo, el interferómetro encuentra diversidad de aplicaciones. Incluso se ha usado, en una forma alternada aunque conceptualmente es la misma, para obtener franjas de interferencia de electrones.

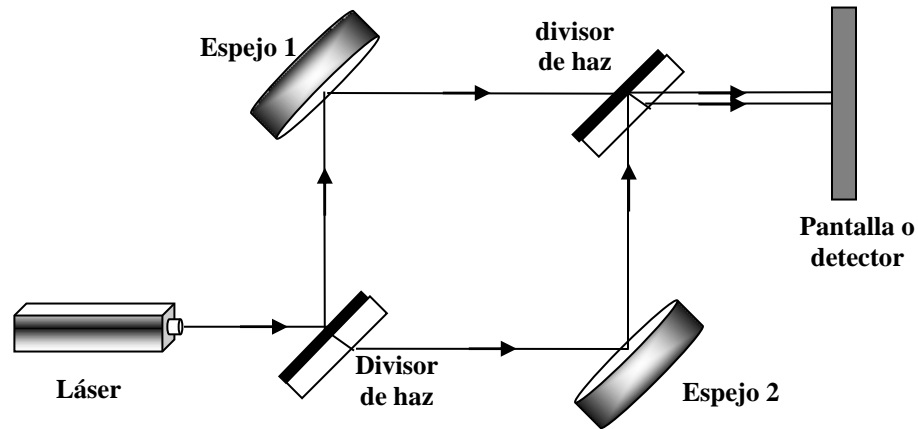


Figura 1.3 Interferómetro de Mach-Zehnder

La formación de franjas de interferencia para este tipo de dispositivos obedece al principio de superposición de ondas. Cuando se recogen los dos haces provenientes de cada brazo del interferómetro, estos interfieren formando un patrón que se conoce como *interferograma*, el cual consta de una serie de franjas brillantes y oscuras alternadas, las cuales pueden ser anillos o líneas.

El contraste de las franjas, llamado visibilidad C_f , está dado por la ecuación (1.16)

$$C_f = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1.16)$$

donde I_{\max} e I_{\min} son los valores de intensidad máxima y mínima respectivamente dentro del interferograma. Dado que

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{y} \quad I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}, \quad (1.17)$$

la expresión para la visibilidad tiene su valor máximo cuando I_1 es igual a I_2 , lo cual significa que los patrones mas claros existirán cuando las ondas que interfieren tienen

amplitudes iguales, es decir, cuando el divisor de haz presenta un 50% de reflectancia y un 50% de transmitancia (para el caso ideal de 0% de absorción) o valores cercanos a estos. Las franjas brillantes se producen en aquellas zonas del espacio donde la interferencia de las ondas es constructiva, en cuyo caso intensidad es representada en la ecuación (1.18)

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} , \quad (1.18)$$

mientras que las franjas oscuras se producen cuando los frentes de onda que interfieren se encuentran en contrafase, para tal caso la intensidad toma un valor igual a:

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} . \quad (1.19)$$

1.2 FENÓMENO *SPECKLE*

1.2.1 Aspectos generales En los años 60's, cuando los láseres de onda continua estuvieron disponibles comercialmente, los investigadores que trabajaron con estos instrumentos encontraron algo que en ese momento se consideró un fenómeno extraño. Cuando el haz láser era reflejado por una superficie como una hoja de papel, o la pared del laboratorio, la superficie iluminada aparecía cubierta por un patrón de aspecto granular. Esta granularidad es la que se conoce comúnmente con el nombre de *speckle* o patrón de moteado [3]. El origen de estas fluctuaciones fue pronto atribuido a las rugosidades presentes en la superficie del material que era iluminado. De hecho, la mayoría de los materiales que encontramos en el mundo real, presentan rugosidades del orden, o mayores, a la longitud de onda de un rayo láser (como excepción tenemos los espejos). El *speckle* es también observado cuando la luz láser es transmitida a través de difusores estacionarios, básicamente la razón es la misma: los caminos ópticos de diferentes rayos de luz pasando a través del objeto transmisivo varían significativamente con respecto a una longitud de onda. El fenómeno *speckle* aparece así frecuentemente en óptica, es de hecho la regla en lugar de la excepción.

1.2.2 Formación del *speckle* Cuando una superficie rugosa (con una rugosidad comparable a la longitud de onda de la radiación incidente), es iluminada por una fuente coherente, aparece cubierta por un patrón formado por puntos claros y oscuros con aspecto granular que se le llama patrón de *speckle*, figura 1.4, y se distribuye aleatoriamente en el espacio.

La formación del patrón de *speckle* está relacionado con un fenómeno de interferencia aleatoria cuya descripción requiere de un análisis puramente estadístico. Esta distribución aleatoria de intensidad deriva de la interferencia entre las ondas difundidas en todas las direcciones de la superficie, figura 1.5, y recogidas en un punto de observación. Si la

interferencia es constructiva se obtiene una pequeña zona luminosa, y si es destructiva una zona oscura.



Figura 1.4 Modelo típico del patrón de *speckle*.

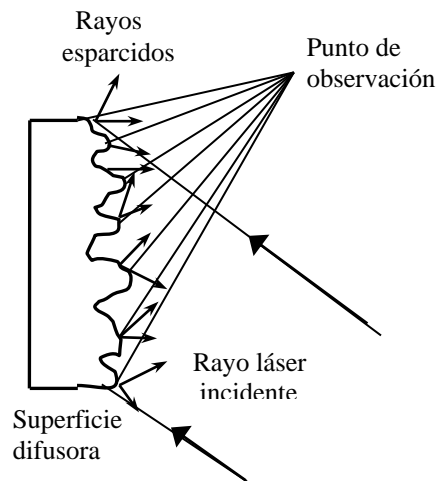


Figura 1.5 Diagrama de interferencia de ondas coherentes.

1.2.3 Medida de una superficie rugosa Una rugosidad puede ser considerada como resultado de una variación en la altura de la superficie. Ya que el *speckle* es un fenómeno aleatorio, solamente rugosidades isotrópicas serán consideradas. Así que la rugosidad debe ser estudiada desde un punto de vista estadístico.

Existe un gran número de parámetros que sirven para caracterizar una superficie rugosa, de los cuales el parámetro más destacado es la rugosidad media R_a (promedio de rugosidades) también llamado promedio de ancho de línea de la rugosidad, ecuación (1.20), que

relaciona el promedio de las variaciones de altura de la superficie Δr_i de N puntos y es a menudo usado en la industria manufacturera.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta r_i|, \quad (1.20)$$

El RMS (*root mean square*) que es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados (σ_r), y representada en la ecuación (1.21) es comúnmente usada en la industria óptica.

$$\sigma_r = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta r_i)^2 \right)^{1/2}. \quad (1.21)$$

Otros parámetros, como por ejemplo la asimetría y la curtosis, nos indican mas detalles acerca de las distribuciones de altura de la superficie. La asimetría indica si la distribución de las alturas tiene una inclinación hacia una desviación positiva o negativa, comparada con la distribución Gaussiana. Estos parámetros (promedio, asimetría, curtosis) describen las propiedades de la distribución de alturas de la superficie punto por punto.

La estadística de primer orden describe la distribución de alturas de la superficie, mientras la estadística de segundo orden describe que tan rápidamente la altura de la superficie varía de un punto a otro. De esta manera es posible analizar la estructura espacial de la superficie rugosa.

Los parámetros más importantes, a tener en cuenta, son la autocovarianza y el poder espectral. La autocovarianza es una medida de que tan bien puede predecirse la altura de un punto de la superficie en un instante de tiempo dado, teniendo como referencia la altura de un segundo punto. Las alturas de los dos puntos presentan una alta correlación cuando estos están ubicados a distancias muy cercanas, y la correlación decrece cuando la distancia entre los dos puntos se incrementa hasta llegar a un límite en el que no hay ninguna correlación entre la altura de estos puntos. La longitud de correlación es la distancia sobre la cual ocurre la correlación y es una medida del promedio de la escala lateral de las variaciones de la altura de la superficie. El poder espectral, está dado por la transformada de Fourier de la autocovarianza y describe las frecuencias espaciales de la rugosidad.

1.2.4 Estadística del patrón de *speckle* La estadística del patrón de *speckle* fue derivada en detalle por J.W. Goodman [4], y se realizó asumiendo que:

- La luz láser es totalmente monocromática y perfectamente polarizada.
- La superficie posee rugosidades comparables con la longitud de onda de la luz láser.
- Las áreas de los elementos dispersores no se relacionan unas con otras.

A partir de estos supuestos se pueden derivar las siguientes propiedades estadísticas: ya que la distribución de las alturas de la superficie consta de un gran número de variables aleatorias independientes, el teorema del límite central predice que las amplitudes complejas de las ondas reflejadas obedecen a una estadística Gaussiana circular, mientras la fase obedece a una estadística uniforme.

La función densidad de probabilidad $P(I)$ de la intensidad I sigue una ley exponencial negativa, ecuación (1.22).

$$P(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left[-\frac{I}{\langle I \rangle}\right]. \quad (1.22)$$

Los corchetes angulares indican el valor promedio sobre todo el conjunto macroscópicamente similar, pero con rugosidades microscópicamente diferentes. La intensidad más probable es cero y causa un alto contraste en el patrón de *speckle*. La intensidad puede llegar a ser infinita, pero en realidad esto es limitado por la cantidad total de energía reflejada por la superficie y por el tamaño mínimo de un *speckle*, el cual se limita por la teoría de difracción.

La estadística de segundo orden de un patrón de *speckle* describe la estructura espacial correspondiente a la estadística de la superficie rugosa. La autocovarianza o la autocorrelación puede ser usada como una medida del tamaño promedio de un *speckle*. La transformada de Fourier de la autocovarianza, el poder espectral, describe la distribución de los tamaños de *speckle* en el patrón. En el caso de *speckles* en el campo lejano, por ejemplo geometría de propagación en el espacio libre, el ancho de la función de autocorrelación de la distribución de intensidad proporciona una medida razonable del promedio de ancho de un *speckle*.

El tamaño promedio de un *speckle* (l), puede ser tomado proporcional a la longitud de onda del haz de iluminación (λ) y a la distancia z entre la superficie y el plano de observación, e inversamente proporcional a la superficie iluminada cuyo diámetro es q , ver ecuación (1.23), donde el plano de observación se considera paralelo a la superficie iluminada.

$$l \approx \frac{\lambda z}{q}, \quad (1.23)$$

Esta ecuación explica porque el tamaño del *speckle* aumenta cuando el área de iluminación decrece.

El tamaño tridimensional de los *speckles* se puede derivar del esparcimiento provocado por un área cuya sección cruzada del *speckle* es una elipse, donde el diámetro está dado por la ecuación (1.23), mientras que la longitud del *speckle* se deriva de la ecuación (1.24), [5].

$$l_z \approx \frac{\lambda z^2}{q^2}, \quad (1.24)$$

En el caso de las imágenes *speckle*, por ejemplo patrones grabados por un sistema de imágenes, el diámetro de *speckle* esta dado por la ecuación (1.25), para la cual q_{AP} es el radio de apertura de las lentes, explicando de esta manera porque el tamaño de los *speckles* incrementa cuando la apertura decrece, [6].

$$l \approx \frac{\lambda z}{2q_{AP}}, \quad (1.25)$$

1.2.5 Contraste del patrón de *speckle* El análisis de los patrones de *speckle* discutido anteriormente se realiza teniendo en cuenta que las rugosidades de la superficie son comparables con la longitud de onda de la luz incidente y que esta es perfectamente coherente, de manera que la desviación estándar σ_I es igual a la intensidad media $\langle I \rangle$ y el contraste de *speckle*, dado por la ecuación (1.26), es igual a la unidad.

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}. \quad (1.26)$$

La reducción del contraste de *speckle* puede ser causada, por ejemplo, por una reducción de las rugosidades de la superficie, por la reducción de la coherencia de la luz, o por la superposición de cualquier luz coherente o incoherente de fondo al patrón de *speckle*.

Si la rugosidad de la superficie es muy pequeña comparada con la longitud de onda de la luz que incide (superficies lisas), el patrón de *speckle* se desarrolla de forma parcial, y el contraste de *speckle* es menor que la unidad. Si las rugosidades de la superficie se incrementan, el contraste del patrón de *speckle* también se incrementa, hasta acercarse a la unidad, cuando las rugosidades de la superficie se acercan a 1/4 de la longitud de onda de la luz. Así que es posible medir rugosidades de una superficie cuya raíz cuadrática media σ_r se encuentre en el rango de 0.02λ a 0.25λ , aproximadamente. Esto implica valores de σ_r entre 10 nm y 130 nm cuando se usa un láser de Argón (λ entre 458 nm – 514 nm). Para extender el rango a valores más grandes de σ_r , puede usarse un láser de Helio-Neón o uno infrarrojo. Para el láser de He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm) los valores de σ_r deben estar entre 13 nm y 158 nm aproximadamente. El rango puede ser también extendido a valores más grandes si el ángulo de incidencia es variado, por ejemplo si se ilumina la superficie de forma oblicua.

Si la coherencia espacial o temporal de la luz es reducida, el contraste de *speckle* depende de las rugosidades de la superficie, aún si estas son más grandes que 1/4 de la longitud de onda de la luz. El uso de luz parcialmente coherente en el dominio espacial, tiene el efecto de limitar el rango de rugosidades de la superficie que pueden ser analizadas, por lo cual el

contraste varía. Así que no es una ventaja usar luz con una coherencia espacial parcial. Si la coherencia temporal de la luz es reducida mientras la coherencia espacial se mantiene, el contraste decrece.

1.3 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE PATRONES DE *SPECKLE*

1.3.1 Placas fotográficas Las placas fotográficas han sido por bastante tiempo el detector clásico en espectroscopía. El principio del registro fotográfico se basa en propiedades químicas de algunas sustancias, como por ejemplo el nitrato de plata. Cuando esta emulsión se deposita sobre una hoja de papel y se expone a la luz, la zona sobre la cual se ha iluminado la hoja de papel aparece ennegrecida, lo que quiere decir que la emulsión es fotosensible.

El progreso que han sufrido las distintas emulsiones disponibles en el mercado en cuanto a rapidez y sensibilidad ha sido realmente enorme [7], inclusive se han mejorado algunos problemas intrínsecos de la placa fotográfica, como el problema de la reciprocidad que es crucial en astronomía. Este problema reside en que la sensibilidad de la placa fotográfica disminuye para exposiciones largas con respecto a la sensibilidad para exposiciones cortas. En este sentido las emulsiones tipo II mostraban ese efecto a partir de exposiciones del orden del minuto. Posteriormente surgen nuevas emulsiones tipo IIa que mejoran en gran medida este problema, llevando el tiempo de exposición a una hora sin una pérdida muy grande de sensibilidad.

En los últimos años, nuevas emulsiones de grano más fino, conocidas como de tipo III, han mejorado notablemente la eficiencia cuántica de la placa fotográfica, es decir la relación entre señal/ruido de salida y señal/ruido de entrada, siendo la señal el cociente entre la señal/ruido de entrada y la raíz cuadrada del número de fotones que llegan al área de muestreo de la placa fotográfica. Esta mejora, que por supuesto se manifiesta en una eficiencia cuántica mayor, se ha logrado también a través de una serie de procesos de hipersensibilización, que en las placas IIIa ha permitido llegar a valores del 2 al 4% para la eficiencia cuántica. Son avances enormes sobre la eficiencia cuántica original de las placas fotográficas, pero muy lejos de la eficiencia que se logra hoy con los detectores CCD.

1.3.2 Cámaras CCD Las cámaras CCD (*Charge Coupled Device*) son sensores de estado sólido cuyo principal componente es el Silicio. En una cámara CCD los píxeles no se forman de manera aislada si no que están definidos dentro de una columna de salida por tres electrodos a diferente potencial. El proceso de captura se fundamenta en el efecto fotoeléctrico y que se describe a continuación: la luz incidente en el sensor CCD libera electrones los cuales tienden hacia la región de agotamiento donde son recogidos. La compuerta central tiene el potencial de mayor valor y es por consiguiente donde se recolecta la carga. El voltaje aplicado a través de estas compuertas se sincroniza con el fin de mover la carga almacenada en los píxeles hasta un registro serial. El proceso de lectura

se realiza en dos pasos, primero se realiza la transferencia de una fila completa hasta el registro y después se realiza el desplazamiento de la señal en dirección horizontal para llevarla al amplificador de salida. Este proceso se ilustra en la figura 1.6.

Las cámaras CCD permiten visualizar la información en tiempo real y poseen mecanismos de disparo que permiten obtener fotografías con exposiciones de hasta una diezmilésima de segundo; sin embargo, no presentan la resolución espacial que presentan las películas fotográficas, debido a que el tamaño de los pixeles es mucho más grande en comparación con el tamaño de grano de las emulsiones.

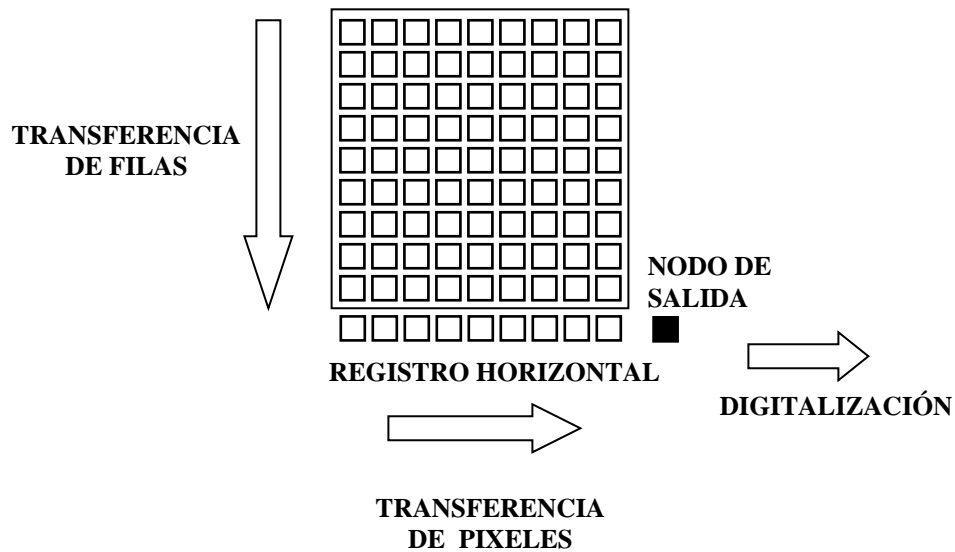


Figura 1.6 Ilustración del proceso de lectura en una cámara CCD.

1.4 INTERFEROMETRÍA DE PATRONES DE *SPECKLE*

1.4.1 ESPI y DSPI Se habla de interferometría *speckle* cuando los patrones de *speckle* son obtenidos a partir de sistemas interferométricos. La interferometría *speckle* es comúnmente usada para el estudio de deformaciones de materiales, análisis de vibraciones, determinación de fisuras en superficies, etc.

Un patrón de *speckle*, figura 1.7, puede ser almacenado en películas fotográficas u holográficas, pero cuando se utilizan sistemas electrónicos, como cámaras digitales o CCD para el registro y posterior lectura de los patrones de *speckle*, la técnica se denomina ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*). Los patrones obtenidos utilizando la técnica ESPI se pueden traducir digitalmente y pueden ser procesados en un computador, en este caso, cuando se realiza un procesamiento digital de los patrones de *speckle*, hablamos de DSPI (*Digital Speckle Pattern Interferometry*), [8].

Las principales ventajas que presenta la interferometría digital de patrones de *speckle* radican en el hecho que: es un eficiente sistema para realizar ensayos no destructivos, puede realizarse análisis en tiempo real (limitado por el tiempo de respuesta del detector) y presenta una alta resolución.

La interferometría digital de patrones de *speckle* se basa en la determinación del mapa de fase que está codificado en las franjas de correlación, figura 1.8, generadas a partir de la sustracción de dos patrones de *speckle*. En el caso de un único sistema de franjas cerradas, similar a los producidos por fenómenos transitorios de alta velocidad, el mapa de fase, figura 1.9, sólo se puede determinar usando el método de la transformada de Fourier con franjas portadoras. A partir de los mapas de fase es posible determinar características del material como, por ejemplo, modos de vibración y deformaciones.

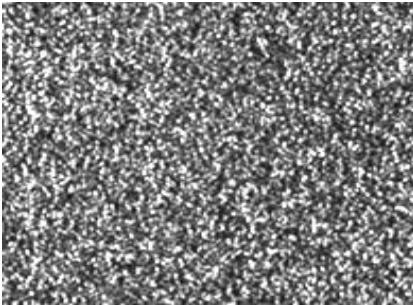


Figura 1.7 Patrón de *speckle*.

La granularidad óptica conocida como *speckle* es un fenómeno enteramente estadístico, que tiene lugar siempre que la luz coherente este sometida a fluctuaciones aleatorias de fase producidas, por ejemplo, por la dispersión de una superficie rugosa.

[Fotografía tomada de la página:

<http://barlai.udea.edu.co/optica/> de la Universidad de Antioquia]

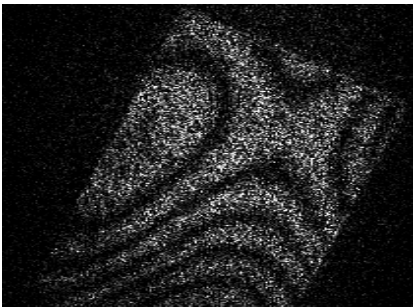


Figura 1.8 Franjas de correlación.

Estas son generadas mediante interferometría digital de patrones de *speckle* (DSPI: *Digital Speckle Pattern Interferometry*). A través de un proceso de resta punto a punto entre dos patrones de *speckle*.

[Fotografía tomada de la página:

<http://barlai.udea.edu.co/optica/> de la Universidad de Antioquia]

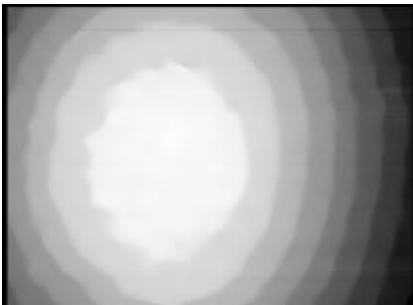


Figura 1.9 Mapas de fase.

Es obtenido mediante la técnica de pasos de fase y la demodulación del sistema de franjas resultante a través del uso de algoritmos computacionales. Mediante el mapa de fase se pueden medir con alta precisión deformaciones, desplazamientos, etc.

[Fotografía tomada de la página:

<http://barlai.udea.edu.co/optica/> de la Universidad de Antioquia]

1.4.2 Formación de franjas de correlación El patrón de franjas de interferencia ocurre después de procesar dos patrones de *speckle*, uno antes de deformar la muestra y el otro después de la deformación. Esta correlación se puede llevar a cabo por la adición o sustracción de los dos patrones. Cuando las intensidades de dos patrones *speckle* están dadas por las ecuaciones (1.27) y (1.28) antes y después del cambio de fase $\Delta\phi$, respectivamente

$$I_{antes} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \phi, \quad (1.27)$$

$$I_{despues} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\phi + \Delta\phi), \quad (1.28)$$

la adición de estas intensidades resulta en:

$$I_+ = 2I_1 + 2I_2 + 4(I_1 I_2)^{1/2} \cos\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right). \quad (1.29)$$

Las áreas de máxima correlación entre dos patrones de *speckle* tienen un máximo en el contraste de las franjas, pero el valor mínimo de contraste de franjas no es cero en los puntos donde los dos patrones de *speckle* no son correlacionados.

El resultado de la sustracción entre las dos intensidades esta dado por:

$$I_- = 4(I_1 I_2)^{1/2} \operatorname{sen}\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right), \quad (1.30)$$

la cual tiene valores positivos y negativos. Puesto que para desplegar la imagen de intensidades en un monitor es necesario tener valores positivos entonces se usa el valor absoluto. Ecuación. (1.31)

$$I_- = |I|. \quad (1.31)$$

La franja máxima obtenida por adición, corresponde a la franja mínima obtenida por sustracción de intensidades. El valor mínimo de intensidad obtenido por sustracción es igual a cero, mientras que el valor mínimo de intensidad obtenido por adición no lo es, por lo que las franjas obtenidas por sustracción tienen un mejor contraste que las obtenidas por adición.

1.4.3 Vector de sensibilidad La relación general entre la diferencia de fase medida $\phi(P)$ y el vector de desplazamiento $\mathbf{d} = \mathbf{d}(u, v, w)$ en un punto $P = P(x, y, z)$ en un interferómetro ESPI está dado por la ecuación (1.32) [9],

$$\phi(P) = s(P)\mathbf{d}(P), \quad (1.32)$$

para el cual $s = (2\pi/\lambda)(\mathbf{k}_o - \mathbf{k}_i) = (s_1, s_2, s_3)$ es el vector de sensibilidad, donde λ es la longitud de onda de la luz empleada y $\mathbf{k}_o, \mathbf{k}_i$ son los vectores unitarios en las direcciones de observación e iluminación, respectivamente. Usando la geometría presentada en la figura 1.10, los vectores posición $\mathbf{r}_o = (x_o, y_o, z_o)$, $\mathbf{r} = (x, y, z)$, $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$, representan la ubicación del punto de observación, el punto de ubicación del objeto y el punto de ubicación de la fuente luminosa, respecto a un sistema de referencia. Definiendo $l_o = |\mathbf{r}_o - \mathbf{r}|$ y $l_i = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|$, los vectores unitarios son $\mathbf{k}_o = (\mathbf{r}_o - \mathbf{r})/l_o$ y $\mathbf{k}_i = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)/l_i$. Entonces las componentes del vector de sensibilidad pueden ser escritas como:

$$\begin{aligned} s_1(x, y, z) &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_o - x}{l_o} - \frac{x - x_i}{l_i} \right), \\ s_2(x, y, z) &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{y_o - y}{l_o} - \frac{y - y_i}{l_i} \right), \\ s_3(x, y, z) &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{z_o - z}{l_o} - \frac{z - z_i}{l_i} \right), \end{aligned} \quad (1.33)$$

donde (x_o, y_o, z_o) es el punto de observación (posición de la cámara CCD), (x_i, y_i, z_i) es la posición de la fuente de iluminación y l_o, l_i , ecuación (1.34), son las distancias entre P y el punto de observación y desde P hasta el punto de fuente de luz, respectivamente.

$$\begin{aligned} l_o &= \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2}, \\ l_i &= \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}. \end{aligned} \quad (1.34)$$

Si en la ecuación (1.33) se considera que $(x_o, y_o, z_o) = (0, 0, l_o)$, $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ y $(x_i, y_i, z_i) = (x_i, 0, z_i)$, es decir, la ubicación del objeto coincide con el origen del sistema de referencia, el punto de observación estará a lo largo del eje z a una distancia l_o y la iluminación se encontrará en el plano xz, figura 1.10.

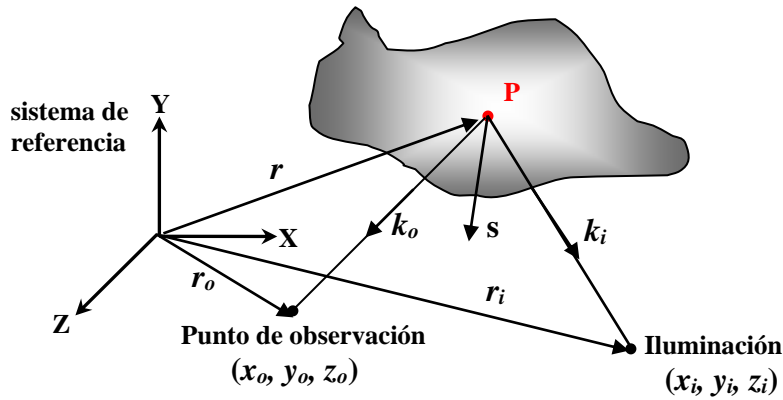


Figura 1.10 Dirección del vector de sensibilidad cuando la iluminación esta en el plano xz y la observación a lo largo de z .

Reemplazando en las ecuaciones (1.33) se obtiene:

$$s_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_i}{l_i} \right), \quad s_2 = 0, \quad s_3 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(1 + \frac{z_i}{l_i} \right), \quad (1.35)$$

lo que es igual a:

$$s_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \text{sen}\theta \quad \text{y} \quad s_3 = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \text{cos}\theta), \quad (1.36)$$

donde θ es el ángulo entre el eje óptico del detector (CCD) y la fuente de iluminación. En este caso, la ecuación que relaciona la fase $\phi(P)$ y el desplazamiento, en un interferómetro ESPI esta dada por:

$$\phi(P) = \frac{2\pi}{\lambda} (\text{sen}\theta)u + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \text{cos}\theta)w, \quad (1.37)$$

donde u y w son las componentes de desplazamientos *en el plano* y *fuera del plano*, respectivamente.

1.4.4 Interferómetro sensible a desplazamientos fuera del plano Probablemente es el concepto más simple de un interferómetro *speckle*, propuesto por Leendertz [10], el cual está basado en el interferómetro de Michelson, en el cual uno de los espejos es reemplazado por la superficie rugosa en estudio. Esta configuración se muestra en la figura 1.11. La superficie es enfocada en el plano imagen junto con un haz de referencia (haz que sale directamente de la fuente de iluminación y posteriormente es reflejado por un espejo y por el divisor de haz)

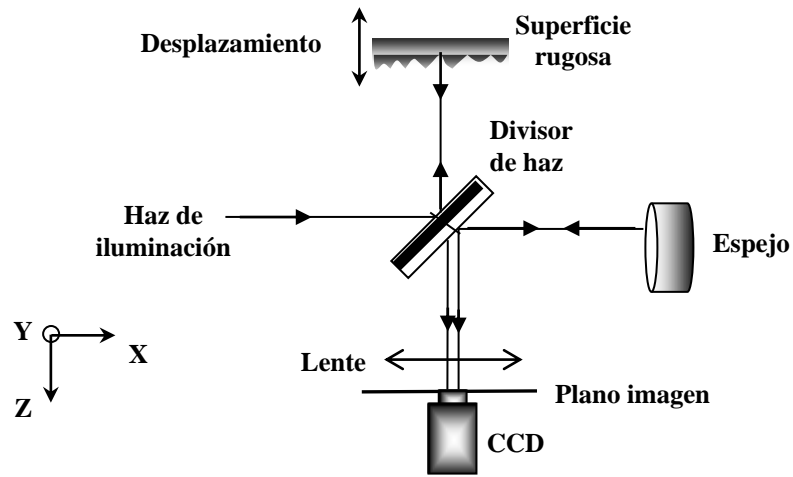


Figura 1.11 Interferómetro sensible a desplazamientos *fuera del plano*

La intensidad de un elemento de área en el plano imagen, correspondiente en tamaño a un *speckle*, esta dado por:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi, \quad (1.38)$$

donde ϕ es la diferencia de fase entre las dos ondas.

Si el objeto en estudio es movido una distancia z_d paralela a la normal de la superficie, el cambio de fase resultante estará dado por:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} z_d, \quad (1.39)$$

la relación dada en (1.39) se puede apreciar a partir de le ecuación (1.37) y basados en el hecho que la iluminación y la dirección de observación son paralelas a la normal de la superficie ($\theta = 0$).

Después del desplazamiento, la intensidad de este elemento de área cambiará a:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + \Delta\phi). \quad (1.40)$$

Si la geometría del interferómetro es cambiada, esto quiere decir que la iluminación y/o la dirección de observación ya no son paralelas a la normal de la superficie, el cambio de la fase estará dado por la ecuación (1.41) donde k_i es la dirección de iluminación, k_o es la

dirección de observación y z_d es el desplazamiento de la superficie. En ese caso el cambio de fase depende de los desplazamientos *en el plano* y *fuera del plano*.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(k_i - k_0)z_d, \quad (1.41)$$

1.4.5 Interferómetro sensible a desplazamientos *en el plano* [11] El esquema mostrado en la figura (1.12), permite medir el desplazamiento de la componente *en el plano* del objeto bajo prueba. Para simplificar la medida del cambio de fase que depende del desplazamiento, los dos haces coherentes de iluminación deben tener frentes de onda preferiblemente planos, luz colimada, incidiendo con ángulos iguales (θ) a ambos lados de la normal a la superficie, y la superficie debe ser enfocada por una lente en el plano imagen.

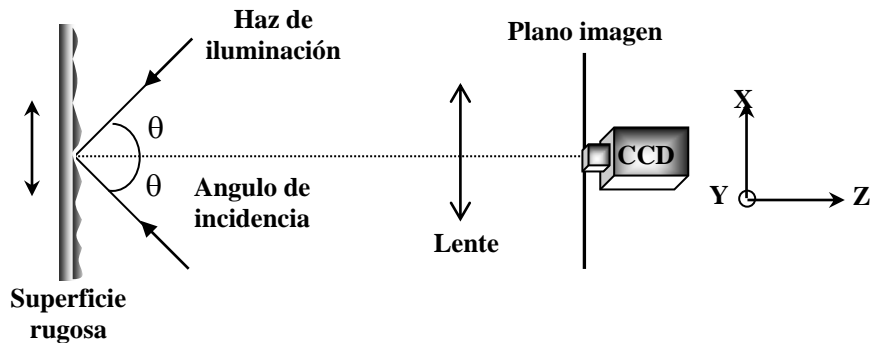


Figura 1.12 Interferómetro sensible a desplazamientos en el plano.

Cada haz de iluminación genera su propio patrón de *speckle*, que se superponen coherentemente en el plano de la imagen. Si la superficie es desplazada en la dirección *fuera del plano*, dirección z , en ambos haces son introducidos cambios iguales de longitud. Así el patrón de *speckle* resultante en el plano imagen permanecerá inalterado. Esta configuración es independiente de desplazamientos en la dirección *fuera del plano*. Los desplazamientos en la dirección x no produce ningún cambio en la longitud de camino. Si la superficie es desplazada distancias pequeñas x_d en la dirección x (*en el plano*), la longitud de camino de uno de los haces será incrementada por $x_d \text{ sen } \theta$, mientras que la longitud de camino del otro haz será disminuida en la misma cantidad, y la resultante total de diferencia de camino será $2 x_d \text{ sen } \theta$. El cambio de fase esta dado por:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(x_d \text{ sen } \theta). \quad (1.42)$$

Esta configuración permite medir desplazamientos *en el plano* independientemente de desplazamientos *fuera del plano*.

1.4.6 Interferómetro de iluminación asimétrica desde ambos lados de la normal Este interferómetro es similar al presentado en la figura 1.12 utilizado para medir desplazamientos *en el plano*, pero con la diferencia que para este caso los ángulos de iluminación no tienen el mismo valor.

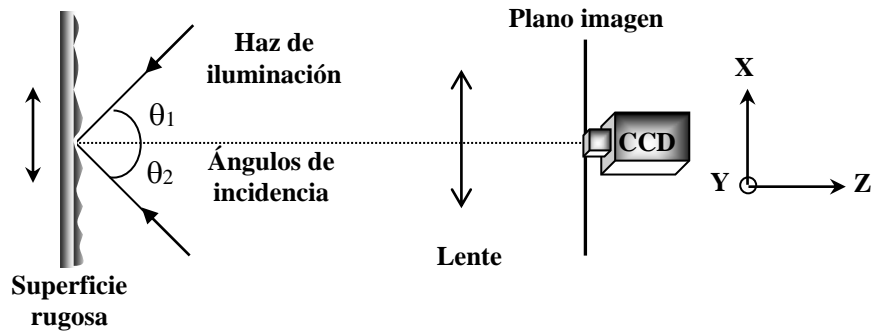


Figura 1.13 Interferómetro sensible a movimientos *en y fuera del plano*.

Con esta configuración es posible registrar desplazamientos *en el plano* y *fuera de él* simultáneamente. La sensibilidad a movimientos *en el plano* es mucho mayor a la de movimientos *fuera de él*. Se encuentra que

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\text{sen}\theta_1 + \text{sen}\theta_2)u + \frac{2\pi}{\lambda} (\text{cos}\theta_1 - \text{cos}\theta_2)w, \quad (1.43)$$

donde u es la componente del desplazamiento *en el plano* y w es la componente *fuera del plano*.

1.5 RELACIÓN ENTRE INTERFEROMETRÍA ELECTRÓNICA DE PATRONES DE *SPECKLE* E INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA

Antes del desarrollo en interferometría *speckle*, se había mostrado que desplazamientos, deformaciones y modos de vibración de una estructura podían ser medidos en tres dimensiones utilizando la interferometría holográfica. La esencia de la interferometría holográfica es que esta registra el patrón completo de las ondas que provienen del objeto, tanto en amplitud como en fase, combinando esta información con una onda de referencia

que proviene directamente de la fuente luminosa, [12]. Para realizar medida de deformaciones, dos patrones de onda similares son registrados, uno cuando la superficie del objeto está en su estado original y otro cuando la superficie del objeto es deformada. Estos patrones son combinados dando lugar a un patrón de franjas de interferencia relacionado con la deformación que sufrió el objeto. Aquí el proceso holográfico es solamente usado como un paso intermedio en la adquisición de los patrones de franjas, la cual también incluye abundante información acerca de la forma tridimensional y reflectancia de la superficie del objeto. El precio a pagar por dicha abundancia de información es que esta se encuentra codificada en variaciones de frecuencia muy altas, lo que corresponde a zonas oscuras en la placa fotográfica o en el registro de la CCD, debido a la necesidad de formar un ángulo grande entre el haz de referencia y el haz del objeto.

La interferometría de patrones de *speckle*, por otro lado, da información sobre desplazamientos producidos en una dirección en particular, sea en la dirección normal u ortogonal a la línea de visión, y de esta forma menos información necesita ser almacenada. El haz de referencia siempre debe estar alineado con la luz proveniente de cada punto de la superficie bajo estudio, de esta forma no son generadas variaciones de intensidad de alta frecuencia. La información acerca del desplazamiento de la superficie es almacenada en su totalidad en el patrón de *speckle* generado, cuya frecuencia máxima es regida por la apertura del sistema de lentes con el que se recoge el patrón. De esta forma es posible cambiar la frecuencia a voluntad, alterando la apertura de la lente, para hacerlo compatible con el poder de resolución del detector. La calidad del patrón de franjas obtenido es necesariamente limitada por la resolución del detector, sin embargo, las franjas son a menudo adecuadas para los propósitos de la medida.

2 MÉTODOS DE CORRIMIENTO DE FASE

En la interferometría digital de patrones de *speckle*, al igual que en otras técnicas ópticas de metrología [13], la información de las variables físicas que se desea conocer de un objeto bajo estudio, generalmente se encuentran codificadas en un patrón de franjas. Para el caso de interferometría *speckle*, dicha información se halla encriptada en las franjas generadas a partir de la correlación por sustracción de los patrones de *speckle*. Con el objetivo de poder cuantificar los resultados, se debe extraer del patrón de franjas dicha información. Esto es posible con la obtención del mapa de fase, que usualmente consiste en la detección y desenvolvimiento de la fase.

2.1 INTERFEROMETRÍA POR CORRIMIENTO DE FASE

La interferometría por corrimiento de fase PSI (*Phase Shifting Interferometry*) es una de las técnicas más comunes para la interpretación de las franjas de interferencia; provee de una poderosa herramienta para realizar ensayos no destructivos a partir de la obtención de los mapas de fase. El concepto fundamental de la interferometría por corrimiento de fase consiste en producir una serie de cambios conocidos de fase en uno de los rayos que intervienen en la formación del patrón de interferencia, con el objeto de reconstruir la fase. El frente de onda puede ser determinado, debido a que la fase se encuentra codificada en los patrones de variación de intensidades, de los interferogramas obtenidos.

El valor de la diferencia de fase es desconocido cuando los patrones de franjas son obtenidos a partir de la adición o sustracción de patrones de *speckle*. La fórmula de intensidad para el interferómetro de Michelson es:

$$I_g = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \Delta\phi, \quad (2.1)$$

la cual contiene las tres variables desconocidas I_1 , I_2 , y $\Delta\phi$. Si I_1 e I_2 son conocidos, entonces $\Delta\phi$ (que es la fase módulo π) puede ser obtenida. Asumiendo que las fases $\Delta\phi_1$ y $\Delta\phi_2$ de dos puntos adyacentes en la medición, por ejemplo, entre dos pixeles adyacentes de una cámara CCD, está dada por:

$$\Delta\phi_1 = \Delta\phi_{01} + n\pi, \quad (2.2)$$

y

$$\Delta\phi_2 = \Delta\phi_{02} + m\pi, \quad (2.3)$$

con

$$\Delta\phi_{01}, \Delta\phi_{02} \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right], \quad (2.4)$$

la fase módulo π puede ser calculada, es decir $\Delta\phi_{01}$ y $\Delta\phi_{02}$. En ausencia de perturbaciones, el resultado puede ser claramente determinado cuando:

$$|\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1| \leq \pi. \quad (2.5)$$

Este requerimiento puede ser cumplido por espejos, pero no por superficies ópticamente rugosas. La intensidad de un punto en el patrón de interferencia puede ser expresada como:

$$I = I_0(1 + \gamma \cos \Delta\phi), \quad (2.6)$$

donde las tres variables desconocidas son la intensidad I_0 , la visibilidad γ o modulación, y la diferencia de fase $\Delta\phi$. Al introducir un cambio de fase relativo entre los haces resulta un patrón de interferencia representado matemáticamente como:

$$I = I_0[1 + \gamma \cos(\Delta\phi + \beta)], \quad (2.7)$$

donde el término β representa la diferencia de fase adicional que se introdujo en uno de los rayos. Teniendo en cuenta la expresión para la fase:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Lambda, \quad (2.8)$$

donde λ es la longitud de onda del haz de iluminación y Λ es la diferencia de camino óptico relativo entre los dos haces, es fácil producir una diferencia de fase adicional a partir de una diferencia de camino óptico. Dos de los mecanismos más sencillos para generar esa diferencia de fase adicional se basan en :

1. La ubicación de una lámina de vidrio en uno de los brazos del interferómetro y su posterior rotación. En este caso la diferencia de camino óptico adicional depende del índice de refracción del material, el espesor de la lámina y del ángulo de rotación φ (figura 2.1).

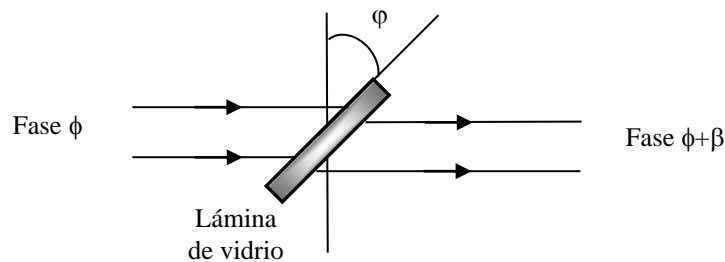


Figura 2.1 Cambio en la fase de una haz luminoso mediante el uso de una lámina de vidrio

2. La utilización de actuadores piezoeléctricos colocados en uno de los espejos del interferómetro (para mas detalle del comportamiento y propiedades de los materiales piezoeléctricos ver Anexo 1).

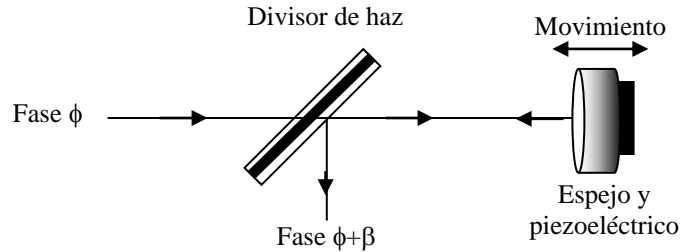


Figura 2.2 Cambio en la fase de una haz luminoso usando un actuador piezoeléctrico.

Para este caso, figura 2.2, cuando uno de los dos espejos en el interferómetro de Michelson es movido una distancia x_d en dirección paralela a la normal de la superficie, el cambio de fase adicional será

$$\beta = \frac{4\pi}{\lambda} x_d. \quad (2.9)$$

Un mínimo de tres saltos de fase es necesario para determinar la fase, esto es debido a las tres incógnitas (I_0 , γ , $\Delta\phi$) en la ecuación de interferencia (2.6).

Cuando la fase cambia en cantidades $\Delta\beta$ y puede ser alterada durante el tiempo de integración del detector, la intensidad está dada por:

$$I_i = \frac{1}{\Delta\beta} \int_{\beta_i - \Delta\beta/2}^{\beta_i + \Delta\beta/2} I_0 (1 + \gamma_0 \cos[\phi + \beta(t)]) d\beta(t), \quad (2.10)$$

$$I_i = I_0 (1 + \gamma \cos(\phi + \beta_i)), \quad (2.11)$$

con

$$\gamma = \gamma_0 \frac{\text{sen}\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)}{\frac{\Delta\beta}{2}}, \quad (2.12)$$

donde $\beta(t)$ es el desfase relativo entre los rayos del interferómetro en función del tiempo, β_i el valor promedio del cambio de fase, γ y γ_0 la visibilidad de las franjas. El término $1/\Delta\beta$ normaliza el resultado. Un caso especial es el llamado salto de fase, en el cual la fase se mantiene constante durante el tiempo de captura de la imagen ($\Delta\beta = 0$) y este es cambiado en cada proceso de captura de la imágenes. El método de salto de fase tiene una visibilidad máxima $\gamma = \gamma_0$. Cuando la fase es integrada, es decir $\Delta\beta \neq 0$, la visibilidad γ se reduce. La integración de la intensidad durante el máximo periodo ($\Delta\beta = 2\pi$) de cambio de fase, reduce la visibilidad a cero. Para obtener una buena visibilidad, el periodo de integración debe ser restringido a

$$\Delta\beta \in [0, \pi]. \quad (2.13)$$

La integración de la fase reduce la visibilidad, pero esto tiene como ventaja que reduce el ruido durante el tiempo de integración.

Para conseguir medidas con una precisión de $\lambda/100$, el sistema interferométrico debe ser colocado sobre una mesa aislada de vibraciones, y el camino de los rayos deben ser encerrado con el fin de minimizar el efecto de turbulencia de aire.

2.2 ALGORITMOS DE CORRIMIENTO DE FASE [14]

La ecuación (2.11) es aplicable a cualquier método de corrimiento de fase. Al menos tres intensidades I_i con diferentes valores de cambio de fase promedio β_i son necesarias para determinar la fase ϕ módulo π o 2π . Se han desarrollado diferentes tipos de algoritmos para extraer la información que se encuentra codificada en las franjas de correlación, cada uno con características diferentes debido al número de cuadros que se utilizan. Las diferencias entre algoritmos se reflejan en la velocidad de ejecución, el margen de error que introducen en las medidas y su sensibilidad a factores externos, parámetros que determinan su utilidad dentro de una determinada aplicación.

2.2.1 Algoritmo de tres pasos Este caso es una manera particular de calcular la fase de la ecuación (2.11) utilizando saltos de fase de $\beta_1 = 0^\circ$, $\beta_2 = 90^\circ$, $\beta_3 = 180^\circ$, reemplazando y resolviendo, se obtiene:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_1 - 2I_2 + I_3}{I_1 - I_3} \right), \quad (2.14)$$

la visibilidad en cada punto es:

$$\gamma = \sqrt{\frac{(I_3 - I_2)^2 + (I_1 - I_2)^2}{2I_0^2}}. \quad (2.15)$$

2.2.2 Algoritmo de cuatro pasos El método de los cuatro pasos utiliza cuatro mediciones de intensidad donde $\beta_1 = 0^\circ$, $\beta_2 = 90^\circ$, $\beta_3 = 180^\circ$, $\beta_4 = 270^\circ$ La fase en cada punto esta dada por:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right), \quad (2.16)$$

y la visibilidad

$$\gamma = \sqrt{\frac{(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2}{4I_0^2}}. \quad (2.17)$$

Este algoritmo es muy utilizado ya que presenta una buena relación entre su velocidad de ejecución y el margen de error que introduce en las medidas.

2.2.3 Algoritmo de Carré El algoritmo de Carré es una variación de del algoritmo de cuatro cuadros descrito anteriormente, en el cual se emplea una paso de fase arbitrario α . Los saltos de fase que se introducen son $-3\alpha/2$, $-\alpha/2$, $\alpha/2$, $3\alpha/2$. La fase es entonces:

$$\phi = 2 \tan^{-1}\left(\frac{3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)}{(I_2 - I_3) + (I_1 - I_4)}\right), \quad (2.18)$$

mientras que la visibilidad de las franjas, para α cercano a $\frac{\pi}{2}$, se determina mediante

$$\gamma = \sqrt{\frac{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)]^2 + [(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)]^2}{8I_0^2}}. \quad (2.19)$$

Este algoritmo es independiente de la calibración del sistema y de la cantidad de fase involucrada en el desplazamiento, por lo que es útil cuando el desplazamiento de fase no se realiza de manera constante a lo largo del haz de referencia.

2.2.4 Algoritmo de cinco pasos Este algoritmo es conocido en la literatura como el algoritmo de Hariharan o algoritmo de Schwider. Este método utiliza cinco medidas de intensidad y saltos de fase correspondientes a: -2β , $-\beta$, 0 , $+\beta$, $+2\beta$. Dado estos valores

se obtiene:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{2(I_4 - I_2)}{I_1 - 2I_3 + I_5}\right), \quad (2.20)$$

y en cada punto la visibilidad toma un valor:

$$\gamma = \sqrt{\frac{4(I_2 - I_4)^2 + (2I_3 - I_1 - I_5)^2}{16I_0^2}}, \quad (2.21)$$

de la expresión matemática para la fase de este algoritmo se deduce que la posibilidad de que tanto el numerador como el denominador se hagan igual a cero simultáneamente se reduce; así, la incertidumbre en el cálculo es reducida. Este algoritmo puede tolerar errores grandes en los cambios de la fase.

2.3 CORRECCIÓN DE LAS AMBIGÜEDADES EN LA FASE MÓDULO 2π

Todos los algoritmos que se mencionaron anteriormente para hallar el valor de la fase utilizan la función arco tangente (\tan^{-1}), la cual tiene como rango el intervalo comprendido entre $-\pi/2$ y $\pi/2$. La fase obtenida directamente de esta función es conocida como fase módulo π . La fase módulo π limita la medición de diferencias de caminos ópticos mayores a media longitud de onda. Como la fase puede tomar rangos correspondientes a valores mayores de media longitud de onda, es necesario corregirla extendiendo su rango desde 0 a 2π o desde $-\pi$ a π .

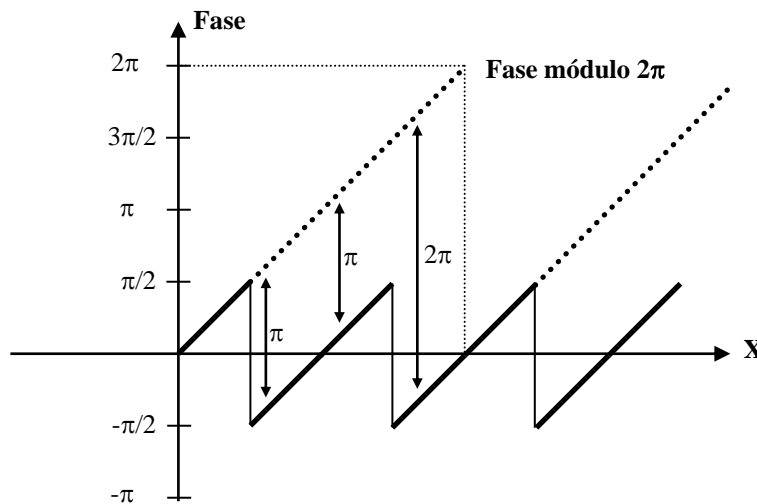


Figura 2.3 Corrección en ambigüedades en la fase de módulo 2π .

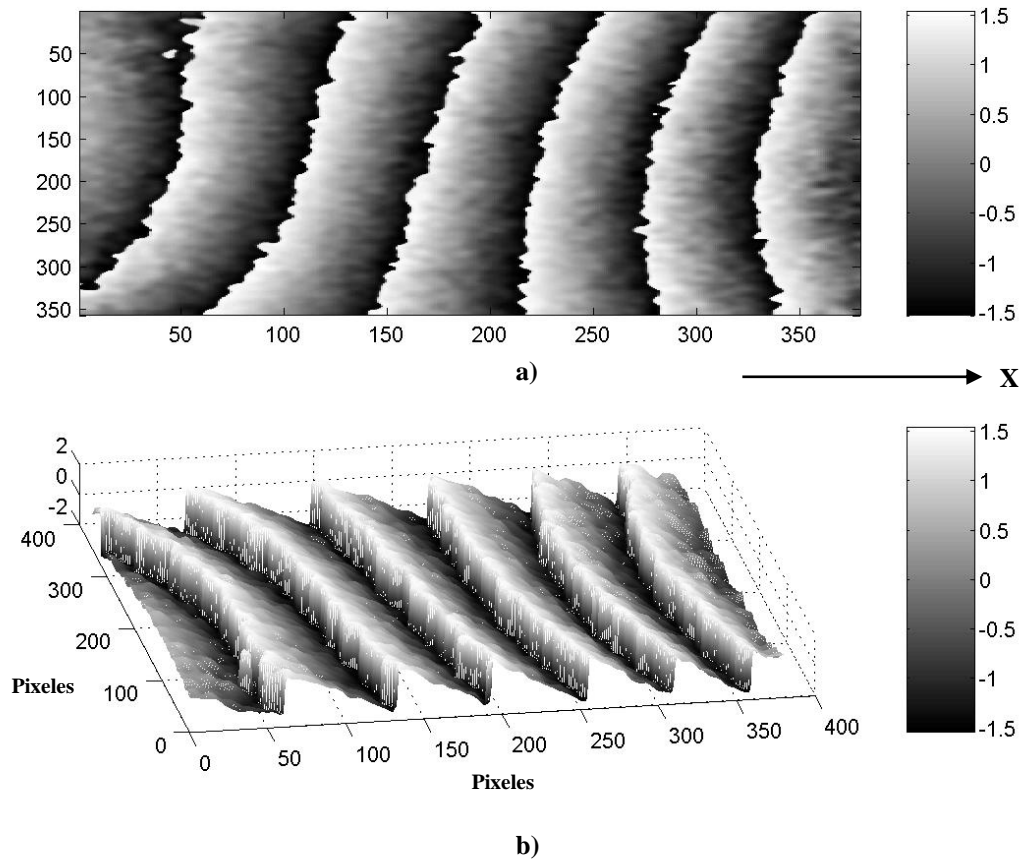


Figura 2.4 Fase de módulo π . a) Visualización del mapa de fase módulo π . b) Visualización de la fase módulo π como una superficie.

El resultado que se obtiene a partir de esta corrección se conoce como fase módulo 2π .

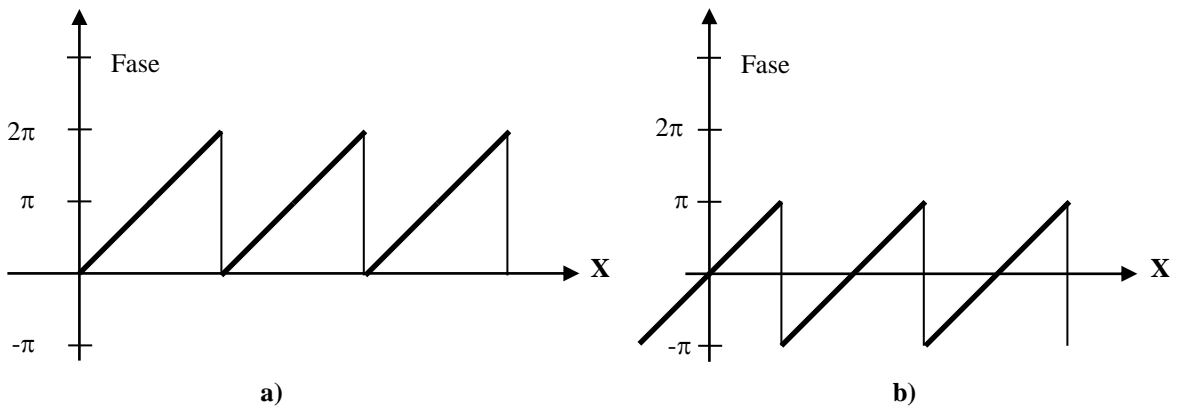


Figura 2.5 Fase de módulo 2π . a) Fase módulo 2π intervalo $[0$ a $2\pi]$. b) Fase módulo 2π intervalo $[-\pi$ a $\pi]$

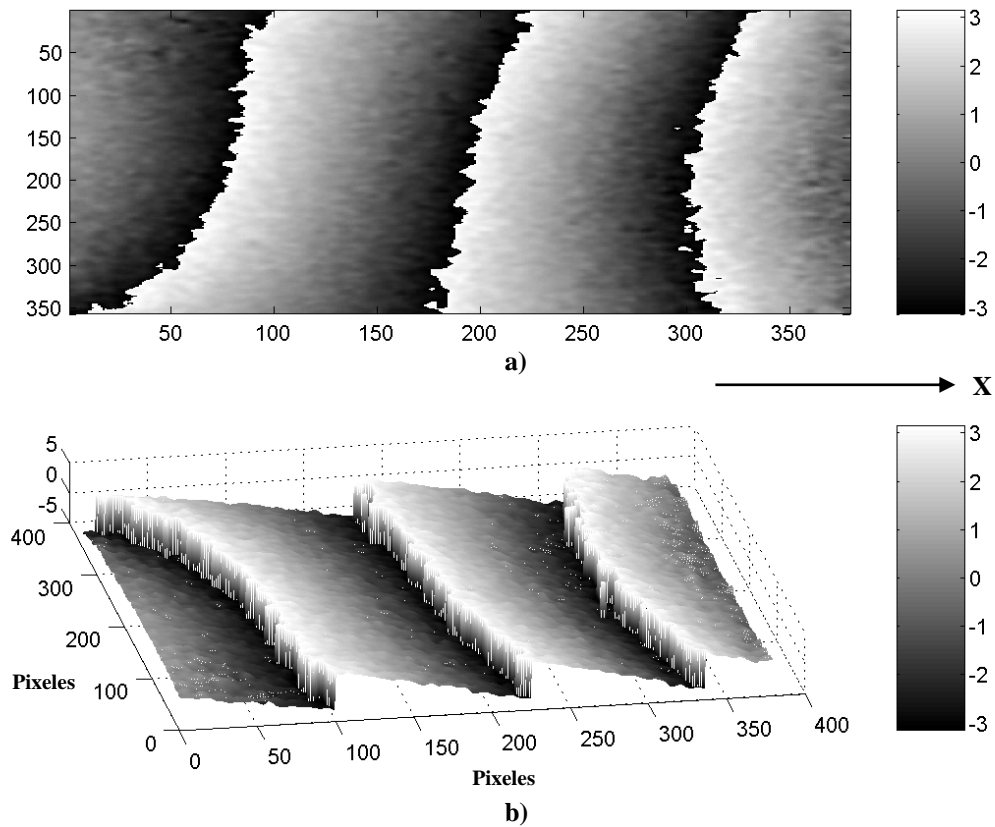


Figura 2.6 Fase de módulo 2π . a) Visualización del mapa de fase módulo 2π . b) Visualización de la fase módulo 2π como una superficie.

Debido a que se conocen los signos del numerador ($\sin\phi$) y el denominador ($\cos\phi$) en las expresiones que contienen la función arco tangente, es posible la corrección de la fase. La tabla 1.1 muestra las correcciones que se deben realizar para el cálculo de la fase, en las figuras 2.3 y 2.4 se ilustra la fase de módulo π y en las figuras 2.5 y 2.6, su corrección a módulo 2π .

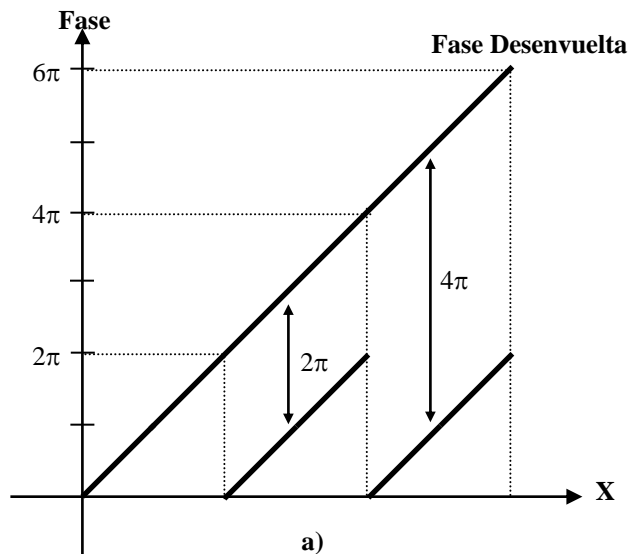
Luego de realizar este ajuste de fase, con el cual se obtiene la fase módulo 2π , se procede a realizar el desenvolvimiento de fase para eliminar las discontinuidades que se presentan en píxeles adyacentes.

SENO	COSENO	AJUSTE DE FASE	RANGO
0	>0	0	0
>0	>0	ϕ	0 a $\pi/2$
>0	0	$\pi/2$	$\pi/2$
>0	<0	$\phi + \pi$	$\pi/2$ a π
0	<0	π	π
<0	<0	$\phi + \pi$	π a $3\pi/2$
<0	0	$3\pi/2$	$3\pi/2$
<0	>0	$\phi + 2\pi$	$3\pi/2$ a 2π

Tabla 2.1 Corrección de la fase módulo π .

2.4 DESENVOLVIMIENTO DE FASE

Este es un paso muy importante a la hora de realizar la reconstrucción total de la fase del frente de onda. El desenvolvimiento de fase, integración de la fase, fase continua o en inglés *phase unwrapping*, como se le conoce comúnmente a este proceso, consiste en remover las discontinuidades de la fase módulo 2π . Estas discontinuidades se pueden remover comparando la diferencia de fase existente entre pixeles adyacentes y cuando encuentra una discontinuidad, múltiplos de 2π son sumados o restados a la fase para eliminarla. Este proceso permite obtener una distribución de fase continua en el espacio, de modo que se reconstruye la variación de fase registrada en el interferograma. Esto hace que el desenvolvimiento de la fase sea determinante para el análisis de un interferograma. En la figura 2.7 se muestra el proceso de desenvolvimiento de fase.



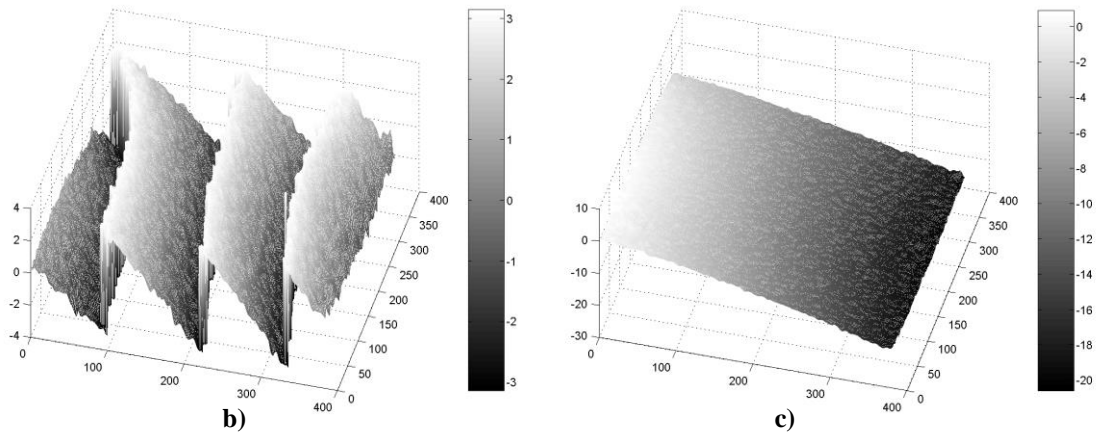


Figura 2.7 Desdoblamiento de la fase. a) Desdoblamiento de una fase de módulo 2π b) Fase de módulo 2π como una superficie. c) Fase desdoblada como una superficie.

La fase módulo 2π es obtenida a partir de la función arco tangente y la fase desenvuelta o fase real se obtuvo sumando el número correcto de múltiplos de 2π . Si un interferograma satisface el criterio Nyquist, es decir, es muestreado mediante al menos dos píxeles por periodo de franja, implica que la fase del frente de onda no cambia más de π entre píxeles adyacentes. Este criterio es usado para reconstruir el frente de onda, y cuando las diferencias entre dos píxeles adyacentes excede el valor de π , múltiplos de 2π son sumados o restados del valor calculado con el fin de que la diferencia sea menor que π . Es posible expresar el proceso de demodulación o desenvolvimiento de fase en una dimensión tal como se muestra a continuación. Consideremos $\phi(x)$ la distribución de fase módulo 2π , entonces la diferencia de fase entre píxeles adyacentes es $\phi(x+1) - \phi(x)$. Si esta diferencia es menor o igual que $-\pi$ se le adiciona 2π a la fase $\phi(x+1)$, por otro lado si la diferencia tiene valores mayores o iguales que π , entonces se le resta 2π al valor de $\phi(x+1)$; si la diferencia de fase entre píxeles adyacentes se encuentra contenido en el intervalo $(-\pi, \pi)$ no es necesario realizar ningún ajuste de fase.

2.4.1 Algoritmos para el desenvolvimiento de la fase Los algoritmos desarrollados para realizar desenvolvimiento de fase son extremadamente sensibles a comportamientos anómalos, cualquier error presente puede ser propagado a lo largo del proceso, lo cual llevaría a obtener resultados incorrectos. Por esta razón el desenvolvimiento de fase es la tarea más compleja y que presenta mayores dificultades en la reconstrucción del frente de onda. La inmunidad al ruido en un algoritmo es entonces una característica deseable, con el fin de desenvolver satisfactoriamente interferogramas con zonas de fase inválidas.

2.4.1.1 Algoritmo dependiente de la trayectoria Este algoritmo es uno de los mas sencillos de implementar y funciona correctamente en mapas de fase consistentes y libres de ruido, pero presenta deficiencias cuando se aplica a mapas de fase que contienen huecos. Por esta razón su aplicación es bastante limitada.

Si se tiene una imagen de tamaño $M \times N$, donde M es el número de filas y N es el número de columnas, el procedimiento para desenvolver dicha imagen es recorriéndola tal como se muestra en la figura 2.8 .El primer paso consiste en determinar el pixel origen $\phi(0,0)$, a partir del cual se empieza el proceso de desenvolvimiento, luego se realiza el desenvolvimiento del siguiente pixel a la derecha $\phi(0,1)$ y se continua así hasta terminar toda la fila $\phi(0,N)$. Esto es representado mediante la ecuación (2.22)

$$\phi_f(i, j+1) = \phi(i, j) + V[\phi_i(i, j+1) - \phi(i, j)] \quad 1 \leq j \leq N. \quad (2.22)$$

donde $\phi_i(i, j+1)$ es la fase inicial del pixel $(i, j+1)$, $\phi_f(i, j+1)$ es la fase luego de ser desdoblada, y $V[\phi_i(i, j+1) - \phi(i, j)]$ es el factor de fase que debe ser adicionado o restado a partir del valor de $\phi_i(i, j+1) - \phi(i, j)$. Luego que es desenvuelta toda la fila hacia la derecha, se toma el último valor de esta como punto de inicio para desenvolver la fila siguiente en dirección izquierda, ecuación (2.23), hasta que es desenvuelta toda la fila.

$$\phi_f(i, j-1) = \phi(i, j) + V[\phi_i(i, j-1) - \phi(i, j)] \quad 1 \leq j \leq N. \quad (2.23)$$

Una vez desenvuelta la fila en dirección izquierda, el último valor desenvuelto se toma como condición inicial para desenvolver la fila siguiente en dirección derecha y se repite este proceso hasta realizar el desenvolvimiento de todos los pixeles de la imagen.

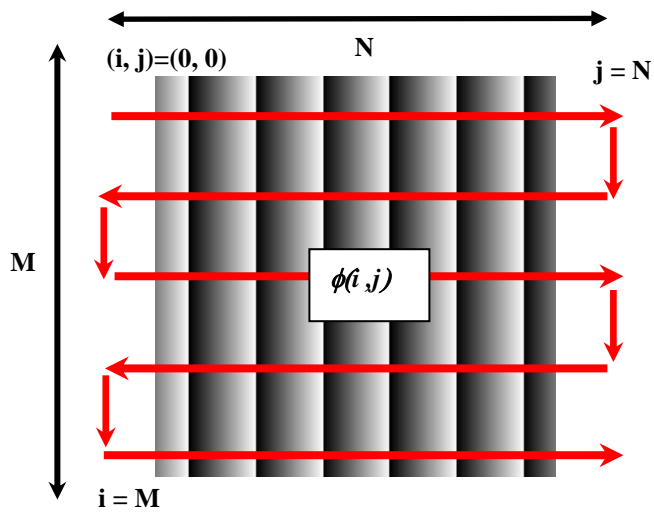


Figura 2.8 Camino para el desenvolvimiento de la fase.

2.4.1.2 Algoritmo independiente de la trayectoria Con el fin de evitar la propagación de errores a lo largo de la imagen desde pixeles inconsistentes a pixeles con valores de fase validos se recomienda la implementación de algoritmos independientes de la trayectoria seguida. A continuación se describe un algoritmo que realiza el desenvolvimiento de fase recorriendo primero los pixeles con menor diferencia en valores de fase, logrando de esta forma disminuir la probabilidad de desenvolver incorrectamente la fase, porque los pixeles erróneos son rodeados y desenvueltos al final.

Teniendo en cuenta la conectividad cuatro de un pixel en particular, es decir, la relación entre sus cuatro pixeles adyacentes (superior, inferior, izquierdo y derecho), consideremos el mapa de fase módulo 2π como un grafo conformado por nodos tal como se muestra en la figura 2.9.

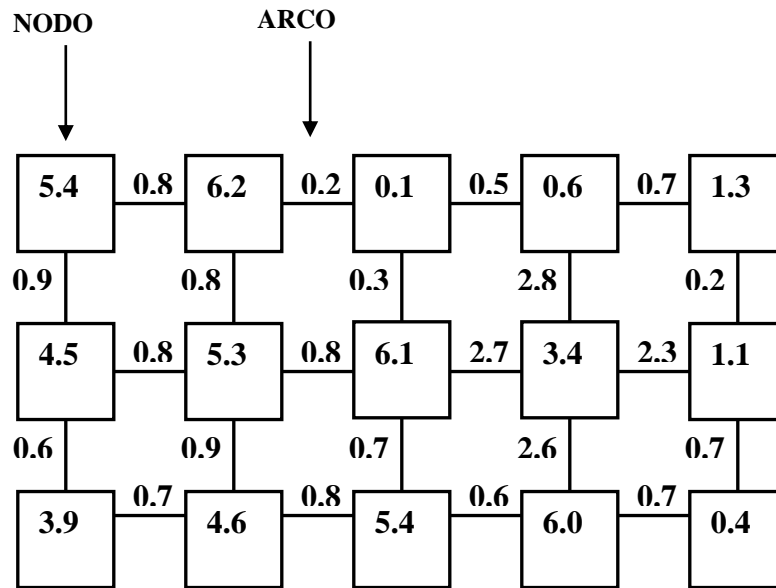


Figura 2.9 Estructura de un grafo para el desenvolvimiento de la fase

Cada nodo contiene la información de fase en un pixel determinado. La unión entre dos nodos se llama arco, los cuales guardan el valor de la diferencia de fase módulo 2π ($d_{2\pi}$) entre dos pixeles adyacentes. Dados dos nodos adyacentes ϕ_1 y ϕ_2 , se elige como arco $d_{2\pi}$ el menor valor entre $|\phi_1 - \phi_2|$, $|\phi_1 - \phi_2 + 2\pi|$ y $|\phi_1 - \phi_2 - 2\pi|$.

$$d_{2\pi}(\phi_1, \phi_2) = \min \left\{ \begin{array}{l} |\phi_1 - \phi_2| \\ |\phi_1 - \phi_2 + 2\pi| \\ |\phi_1 - \phi_2 - 2\pi| \end{array} \right\}. \quad (2.24)$$

El proceso de desenvolvimiento a través de las menores diferencias se realiza primero almacenando todos los arcos del grafo en un vector, luego se escoge entre estos el arco con menor diferencia $d_{2\pi}$, y uno de los nodos de este arco se elige como condición inicial $\phi(i,j)$ para el desenvolvimiento. Eliminar este arco del vector y marcarlo para evitar ser utilizado nuevamente. Después se busca entre los arcos vecinos de los nodos desenvueltos, el arco con menor diferencia $d_{2\pi}$. Desenvolver el nodo envuelto en uno de los extremos del arco y eliminar este arco del vector para evitar ser utilizado nuevamente. Buscar nuevamente el arco con menor diferencia entre los nodos vecinos ya desenvueltos, realizar el desenvolvimiento de uno de los nodos y continuar así hasta desenvolver todos los nodos del grafo.

3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Una de las grandes dificultades que presentan muchos materiales (en especial los polímeros) desde el punto de vista mecánico, es la gran dependencia que tienen sus propiedades con la temperatura y la velocidad de deformación [15], lo anterior debido a su comportamiento viscoelástico, que en primera aproximación, es producto de los altos tiempos de relajación de los procesos microscópicos debido al alto peso molecular de ellos.

3.1 POLÍMEROS

Los polímeros son compuestos químicos cuyas moléculas están formadas por la unión de otras moléculas más pequeñas llamadas monómeros, las cuales se enlazan entre sí como si fueran los eslabones de una cadena. Estas cadenas, que en ocasiones presentan también ramificaciones o entrecruzamientos, pueden llegar a alcanzar un gran tamaño, razón por la cual son también conocidas con el nombre de macromoléculas. Habitualmente los polímeros reciben, de forma incorrecta, el nombre de plásticos, que en realidad corresponde tan sólo a un tipo específico de polímeros [16].

Con el desarrollo de la tecnología y la industria química el hombre ha aprendido a imitar a la naturaleza, e incluso a mejorarla, sintetizando nuevos polímeros artificiales inexistentes en ella, normalmente a partir de derivados del petróleo. El primero en ser creado de forma totalmente artificial fue, en 1909, la baquelita, aunque con anterioridad se habían obtenido algunos, como el celuloide, mediante la modificación de polímeros naturales, celulosa en este caso.

En la actualidad la síntesis y el procesado de materiales poliméricos es una de las más importantes ramas de la industria química, y los polímeros están presentes de forma habitual en nuestra vida cotidiana. Podemos recordar algunos polímeros tan usuales y frecuentes como el polietileno y el polipropileno, utilizados para la elaboración de bolsas de plástico; el poliestireno, o corcho blanco, para embalajes; el PVC, o policloruro de vinilo, para envases y tuberías; el PET (polietilentereftalato), también para envases; el teflón, como aislante; las poliamidas (nylon) y los poliésteres (tergal), como fibras sintéticas; el metacrilato, como sustitutivo del vidrio; el caucho sintético, para neumáticos. También existen polímeros artificiales de naturaleza inorgánica, como las siliconas, donde el carbono ha sido sustituido por átomos de silicio encadenados con átomos de oxígeno.

Cualitativamente es posible clasificar los polímeros en dos grandes grupos: los materiales elastoméricos y los materiales plásticos, que serán descritos a continuación.

3.1.1 Elastómeros Cuando una pieza se somete a una fuerza de tensión uniaxial, se produce una deformación del material. Si el material vuelve a sus dimensiones originales cuando la fuerza deja de ser aplicada se dice que el material ha sufrido una deformación elástica. El número de deformaciones elásticas en un material es limitado ya que aquí los átomos son desplazados de su posición original, pero no hasta el extremo de que tomen nuevas posiciones fijas. Así cuando la fuerza cesa, los átomos vuelven a sus posiciones originales y el material adquiere su forma original.

Los elastómeros o cauchos son polímeros cuyas dimensiones pueden cambiar mucho cuando se les aplica una tensión y que vuelven a sus dimensiones originales (o casi) cuando se elimina la tensión. Hay muchos tipos de materiales elastoméricos, entre los cuales encontramos el caucho natural, poliisopreno sintético, caucho de nitrilo, policloropreno, siliconas, entre otros.

Los materiales elastoméricos presentan típicamente curvas de esfuerzo contra deformación tal como se muestra en la figura 3.1c.

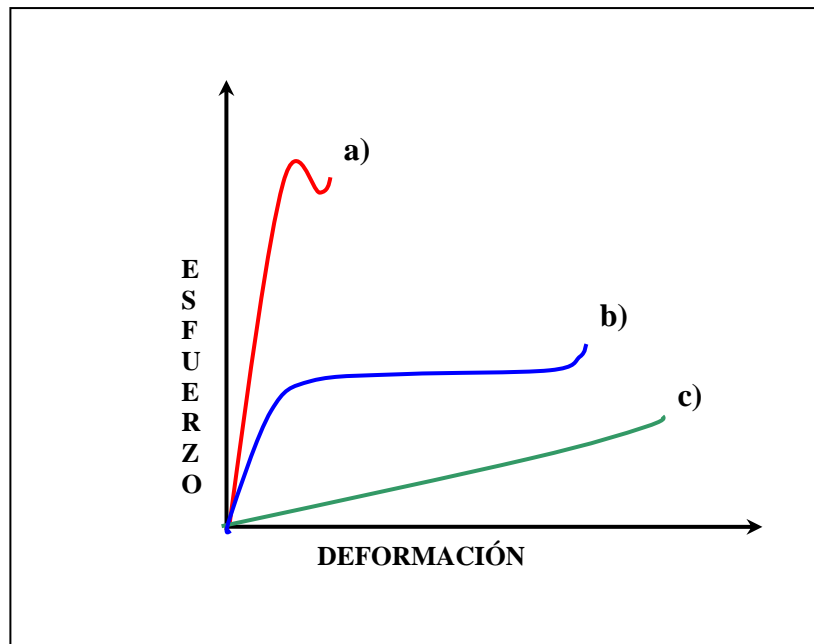


Figura 3.1 Curvas típicas de esfuerzo contra deformación para tres tipos de materiales:
a) Plásticos rígidos b) Plásticos flexibles c) Elastómeros.

Se puede observar de la figura 3.1 que los materiales elastoméricos sufren altas deformaciones del tipo elásticas cuando se le aplica cierta tensión (lo que no sucede en los

Puesto que los meros (unidades repetidas en la cadena de un polímero) de butadieno contienen dobles enlaces, el copolímero puede vulcanizarse con azufre por ligamento entrecruzado.

3.1.2 Plásticos Aquellos materiales que al ser deformados no pueden recuperar sus posiciones originales se denominan materiales plásticos. Dentro de los materiales plásticos encontramos el polietileno, policloruro de vinilo (PVC), nylon, nitrato de celulosa o celuloide, entre otros.

3.1.2.1 Polietileno El polietileno es, con mucho, el material plástico más extensamente utilizado, teniendo como principal ventaja su bajo costo, unido a que tiene muchas propiedades industrialmente importantes que incluyen su dureza a temperatura ambiente y a bajas temperaturas, suficiente resistencia para muchas aplicaciones, buena resistencia a la corrosión, buenas propiedades aislantes, inodoro e insípido y baja transmisión de vapor de agua.

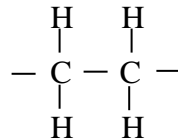


Figura 3.4 Unidad estructural química repetitiva del polietileno.

El polietileno es un plástico blanquecino, de transparente a translucido y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes. Las secciones gruesas son translucidas y tienen una apariencia de cera. Mediante el uso de colorantes pueden obtenerse una gran variedad de productos coloreados.

3.1.2.2 Policloruro de vinilo (PVC) El policloruro de vinilo es un plástico sintético ampliamente usado, que tiene el segundo puesto en ventas por peso en el mundo (el polietileno está en primer lugar). El extenso uso del PVC se atribuye principalmente a su alta resistencia química y su habilidad única para mezclarse con aditivos para producir un gran número de compuestos, con amplio rango de propiedades físicas y químicas.

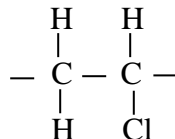


Figura 3.5 Unidad estructural repetitiva del PVC.

La presencia del átomo de cloro, el cual tiene gran tamaño, en la cadena principal del policloruro de vinilo produce un material polimérico que es esencialmente amorfo y no recristalizable.

Una de las características más importantes de los materiales en general, son aquellas relacionadas con su uso final. En este sentido el estudio de las propiedades mecánicas es muy interesante, pues restringe la aplicación específica de un material. El estudio de las propiedades mecánicas se refiere a la respuesta de un cuerpo cuando se le somete a una fuerza externa, la cual genera relaciones del tipo tensorial con la deformación que sufre este material (en general válidas para la zona elástica). De los diferentes ensayos existentes, el más empleado es el ensayo de tracción en una dimensión [17], el cual entrega la mayoría de los datos relevantes para un primer estudio mecánico de materiales. Este ensayo consiste en someter al material a una velocidad de deformación constante, y medir la fuerza necesaria para cada deformación, esto se realiza generalmente hasta que el material se fractura. Finalmente, se entrega una curva donde en el eje de las abscisas se muestra la deformación del material y en el eje de las ordenadas la tensión requerida.

3.2 ESFUERZO Y TENSIÓN

El esfuerzo es la consecuencia de las fuerzas internas que se producen en un cuerpo por la aplicación de cargas externas. El esfuerzo normal o tensión δ sobre una sección del material se define como la fuerza por unidad de área que se ejerce perpendicular a la sección transversal:

$$\delta = \frac{dF}{dA}. \quad (3.1)$$

Cuando la resultante de las fuerzas aplicadas pasa por el centroide de la sección considerada el esfuerzo normal es:

$$\delta = \frac{F}{A}, \quad (3.2)$$

donde el esfuerzo normal δ se expresa en (N/m^2), F es la fuerza aplicada (N) y A es el área sobre la cual actúa la fuerza (m^2).

3.3 DEFORMACIÓN O ALARGAMIENTO

Cuando se aplica a un cuerpo una fuerza de tensión uniaxial, la acción de tal fuerza hace que cada sección del material experimente un desplazamiento ξ paralelo al eje. Si este desplazamiento es el mismo en todos los puntos de la barra, no se produce deformación, sino, simplemente un desplazamiento rígido del material según su eje. Estamos interesados en el caso que haya deformación de modo que haya una variación de ξ a lo largo del material. Por definición, la deformación originada por la acción de una fuerza de tensión uniaxial sobre una muestra, es el cociente entre el cambio de longitud de la muestra en la dirección de la fuerza y la longitud original.

$$\xi = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (3.3)$$

donde l es la longitud después de la acción de la fuerza y l_0 es la longitud inicial de la muestra. Como puede deducirse de la ecuación, la deformación es una magnitud adimensional. En la práctica, es común convertir la deformación en un porcentaje de deformación o porcentaje de elongación

$$\% \text{ deformación} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% . \quad (3.4)$$

El porcentaje de deformación proporciona un valor de la ductilidad de un material. Esta cantidad es importante no solo porque es una medida de la ductilidad, sino también porque da una idea acerca de la calidad del mismo. En caso de que haya porosidad o inclusiones en el material o si ha ocurrido algún daño por un sobrecalentamiento del mismo, el porcentaje de elongación de la muestra puede decrecer por debajo de lo normal.

3.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Entre el esfuerzo normal o tensión δ y la deformación ξ del material hay una relación llamada ley de Hooke que establece que dentro del límite de elasticidad del material el esfuerzo δ es proporcional a la deformación ξ ,

$$\delta = E\xi, \quad (3.5)$$

donde E , la constante de proporcionalidad, es el módulo de Young (N/m^2).

$$E = \frac{\delta}{\xi}. \quad (3.6)$$

La ley de Hooke es una buena aproximación al comportamiento elástico del material siempre que las deformaciones sean pequeñas, en este caso el valor del módulo de Young (E) es igual a la pendiente del segmento esfuerzo-deformación correspondiente a las pequeñas deformaciones. El módulo de Young tiene una íntima relación con la fuerza de enlace entre los átomos en un material, es así como materiales con un módulo elástico alto son relativamente rígidos y no se deforman fácilmente.

3.5 COEFICIENTE DE POISSON

Una propiedad mecánica importante de los materiales, usada en el análisis elástico de sistemas, es el coeficiente de Poisson (ν). La aplicación de una fuerza sobre un material causa en este una deformación longitudinal en dirección de dicha fuerza, acompañada de una contracción lateral. La razón entre la contracción y la deformación longitudinal es lo que se conoce con el nombre de coeficiente de Poisson.

$$\nu = \frac{\xi(\text{transversal})}{\xi(\text{longitudinal})}. \quad (3.7)$$

En condiciones reales el coeficiente de Poisson varía de 0 a 0.5 (asumiendo que el volumen de la muestra no varía después de aplicar la carga). Generalmente, materiales más rígidos tendrán coeficientes de Poisson menores que los materiales más suaves.

3.6 MÓDULO DE RIGIDEZ

El módulo de rigidez transversal, también denominado módulo de deformación transversal, es una magnitud que relaciona el módulo de Young y el coeficiente de Poisson:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (3.8)$$

El módulo de rigidez corresponde cualitativamente a la capacidad de un material para resistir sin daños deformaciones transversales.

3.7 TENSIÓN REAL – DEFORMACIÓN REAL

La tensión se calcula dividiendo la fuerza aplicada F sobre una muestra, a la que se aplica un ensayo de tensión, por el área inicial A_0 . Puesto que el área de la sección de la muestra bajo estudio cambia continuamente durante el ensayo, el cálculo de esta no es preciso.

Durante el ensayo de tensión, después de que ocurra el estrangulamiento de la muestra, la tensión decrece al aumentar la deformación, llegando a una tensión máxima en la curva de tensión–deformación. Por ello, después que comienza el estrangulamiento durante el ensayo de tensión, la tensión real es mayor que la tensión en ingeniería, ecuación (3.9).

$$\text{Tensión real} = \frac{F}{A_i}, \quad (3.9)$$

donde F es la fuerza uniaxial media sobre la muestra de ensayo y A_i es el área de muestra de sección mínima en un instante. La deformación real viene dada por la ecuación (3.10)

$$\text{Deformación real } \xi_i = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0}, \quad (3.10)$$

donde l_0 es la longitud de calibración de la muestra y l_i es la longitud entre las calibraciones durante el ensayo.

Si asumimos constante el volumen de la muestra durante el ensayo, entonces

$$l_0 A_0 = i_i A_i \quad \text{ó} \quad \frac{l_i}{l_0} = \frac{A_0}{A_i} \quad \text{y} \quad \xi_i = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_i}. \quad (3.11)$$

En investigación de materiales, algunas veces puede ser útil conocer la curva de tensión real – deformación real.

4. SISTEMA IMPLEMENTADO Y METODOLOGÍA EMPLEADA

Para llevar a cabo el estudio de las deformaciones y propiedades mecánicas de un material elastomérico cuando se somete a tensiones externas fue necesario el diseño y construcción de una máquina de ensayo, la cual se utilizó para aplicar las tensiones sobre la muestra. Como técnica de detección se utilizó DSPI, para lo cual se implementó un arreglo interferométrico (sistema óptico) sensible a desplazamientos *en y fuera del plano*. En uno de los espejos del interferómetro se ubicó un actuador piezoeléctrico con el cual se produce de forma controlada desplazamientos en el espejo para introducir un desfase en uno de los rayos. A continuación se describen las componentes principales del sistema implementado.

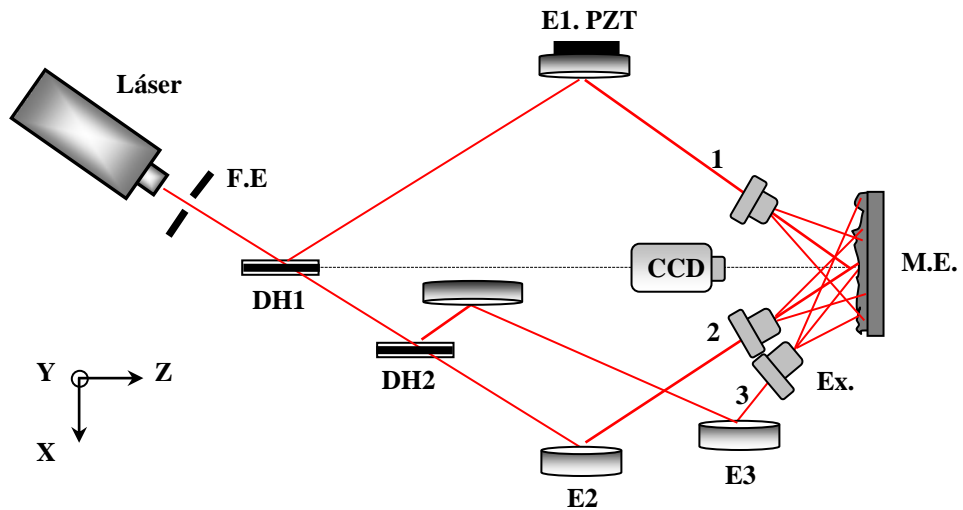
4.1 SISTEMA ÓPTICO

El montaje experimental implementado tal y como se ilustra en la figura 4.1, consiste en un interferómetro de iluminación dual, para el cual se utilizó como fuente de iluminación un láser de Helio-Neón marca JDS Uniphase modelo 1125P, linealmente polarizado, funcionando en el modo TEM₀₀, con longitud de onda de 632.8 nm, 5 mW de potencia y una longitud de coherencia de aproximadamente 60 cm.

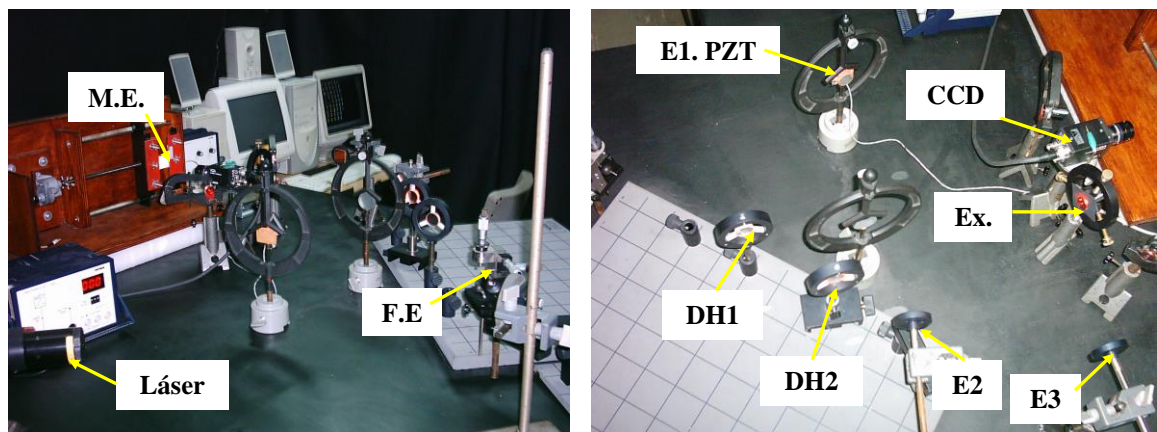
La obtención de un haz limpio incidiendo sobre la muestra resulta de realizar un filtrado espacial del haz láser, con el fin de eliminar algunos patrones de difracción que se producen en el frente de onda debido, principalmente, a la presencia de partículas en el ambiente o a irregularidades de los elementos ópticos utilizados.

El filtrado espacial se llevó a cabo mediante la utilización del filtro espacial modelo M-900 de la Newport, para el cual se hace pasar el haz a través de un expansor con un factor de aumento de 5 y luego el haz expandido pasa a través de un pinhole de 50 μm de diámetro.

Los haces de iluminación que inciden sobre la muestra son divergentes, por lo que se introducen diferencias de fase adicionales que dependerán de cada punto del material bajo estudio. Aunque el uso de luz divergente en lugar de luz colimada genera un error que depende de cada punto de la muestra, para efectos prácticos es conveniente usarla si se desea iluminar un área mayor de la muestra bajo estudio; ya que con luz colimada se logra un haz de aproximadamente 1 cm de radio. Un estudio detallado puede encontrarse en [18].



a)



b)

Figura 4.1 Sistema interferométrico implementado sensible a desplazamientos *en el plano* y *fuera del plano*. DH1,2: Divisores de haz, E1.PZT: Espejo con dispositivo piezoeléctrico, E2,3: Espejos, Ex: Expansores, M.E: Muestra bajo estudio, F.E: Filtro espacial. a) Esquema representativo del interferómetro de tres haces de iluminación implementado en el laboratorio de óptica. b) Toma lateral y superior del interferómetro de tres haces de iluminación implementado.

El sistema interferométrico implementado es sensible a desplazamientos *en el plano* y *fuera del plano*, es decir, se pueden registrar medidas de desplazamientos producidos en los ejes x y z . Cuando se habilitan los rayos 1 y 2 del sistema interferométrico los cuales se

encuentran a ángulos iguales de 18° medidos a partir de la normal a la superficie, figura 4.1a, es posible registrar la medida de los desplazamientos producidos *en el plano* (ver Sección 1.4.5). Por otro lado, cuando los rayos 1 y 3 son habilitados, los cuales se encuentran a 18° y 45° respectivamente, es posible registrar medidas de desplazamientos producidos *en el plano y fuera de él*, simultáneamente (Sección 1.4.6).

4.2 SISTEMA DE CORRIMIENTO DE FASE

El sistema desarrollado para generar las diferencias de fase necesarias en aplicación de la técnica de corrimiento de fase se basa en la utilización de actuadores piezoeléctricos tipo PZT (Anexo 1) colocados en uno de los espejos del interferómetro. Los dispositivos piezoeléctricos utilizados tienen forma de disco y fueron obtenidos de bocinas de sonido. El diámetro de estos discos es de 2.1 cm y un espesor de aproximadamente 0.1 mm. Dadas estas dimensiones fue necesaria la utilización de tres discos conectados eléctricamente en paralelo y mecánicamente en serie, esto con el fin de fijar un voltaje máximo de 10 V para que el sistema piezoeléctrico introduzca en el interferómetro un desfase relativo de 2π . El voltaje máximo que puede soportar el sistema de tres discos con estas dimensiones es de aproximadamente 300 V, 1 kilovoltio por cada milímetro de espesor del cerámico, con lo que se garantiza que el sistema no será dañado por la aplicación de 10 V.

4.2.1 Control El control de movimiento del sistema piezoeléctrico se llevó a cabo a través del puerto paralelo de la PC, el cual se interfazó utilizando una tarjeta de control tal como se muestra en la figura 4.2. El puerto paralelo de la PC entrega a través de los pines 2-9 señales TTL, las cuales deben ser convertidas a señales análogas para que el actuador piezoeléctrico pueda responder de forma correcta, esta es la función de la tarjeta de control implementada, convertir una señal digital en su señal análoga correspondiente. Dado que el hardware del puerto paralelo está muy limitado en cuanto a su capacidad de manejo de corriente, es conveniente utilizar un circuito integrado 74LS245 como etapa separadora en las líneas de salida, para disminuir el riesgo de daños al puerto por cortocircuito. El circuito integrado 74LS245 es un transceptor bidireccional.

Los 8 pines de salida del 74LS245 (pines 2-9) se conectan luego a los pines 5-12 de un DAC0808, el cual es un convertidor digital-análogo de 8 bits. Posteriormente la salida del convertidor (pin 4) se conecta a la entrada inversora del amplificador operacional LF351 (pin 2), el cual se encarga de transformar la salida de corriente del DAC en voltaje, el que posteriormente llega al sistema piezoeléctrico.

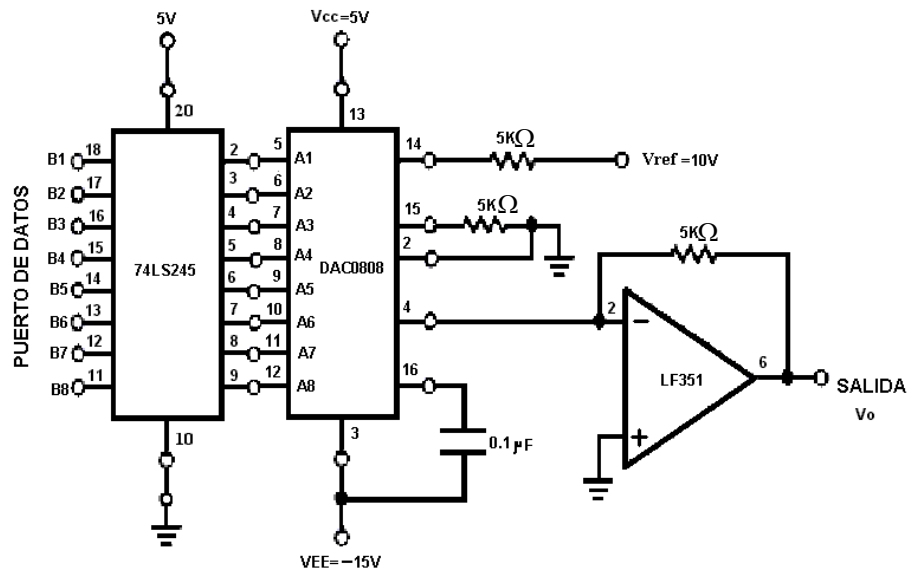


Figura 4.2 Esquema de la tarjeta de control para el sistema de corrimiento de fase.

El valor máximo de corriente que sale del convertor digital-análogo depende exclusivamente de los valores de voltaje y resistencia de referencia

$$I_{o\ max} = \frac{V_{ref}}{R_{ref}}, \quad (4.1)$$

$$I_{o\ max} = \frac{10V}{5K\Omega}. \quad (4.2)$$

La corriente máxima que puede salir del convertor digital-análogo es de 2 mA.

El voltaje máximo que sale del amplificador operacional depende de la resistencia que se conecta entre la entrada inversora (pin 2) y la salida (pin 6)

$$V_{o\ max} = I_{o\ max} R_{ref}, \quad (4.3)$$

$$V_{o\ max} = (2mA)(5K\Omega). \quad (4.4)$$

Es decir, el voltaje máximo que puede salir del amplificador operacional es de 10 V.

El voltaje de salida V_o es:

$$V_o = 10V \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \dots + \frac{A_8}{256} \right), \quad (4.5)$$

donde A_1, A_2, \dots, A_8 corresponde al estado de los pines 2, 3, ..., 9 del puerto paralelo del PC, esto significa que el voltaje de salida puede tomar valores de 0 V a 10 V dependiendo de la señal enviada desde el PC.

4.2.2 Caracterización Para el propósito de este trabajo es necesario conocer la respuesta del sistema de corrimiento de fase, es decir, la fase relativa que se introduce en el sistema en función del voltaje aplicado. La caracterización del sistema piezoeléctrico debe realizarse en el sitio de operación, dado que los coeficientes que caracterizan el comportamiento de los dispositivos piezoeléctricos dependen de factores ambientales, lo que hace imposible generalizar el comportamiento de este tipo de materiales. De igual manera la caracterización se debe llevar a cabo en el mismo interferómetro que va a ser usado para realizar las pruebas experimentales, ya que un desplazamiento del actuador puede generar diferentes desfases en dos configuraciones interferométricas distintas.

Para caracterizar el sistema de fase se utilizó como medio de detección un luxómetro LX-102 marca Lutron. Para tal fin se obtuvieron las franjas propias del interferómetro (interferómetro tipo Mach-Zender) y estas se hacen incidir sobre el área efectiva del luxómetro, ver figura 4.3.

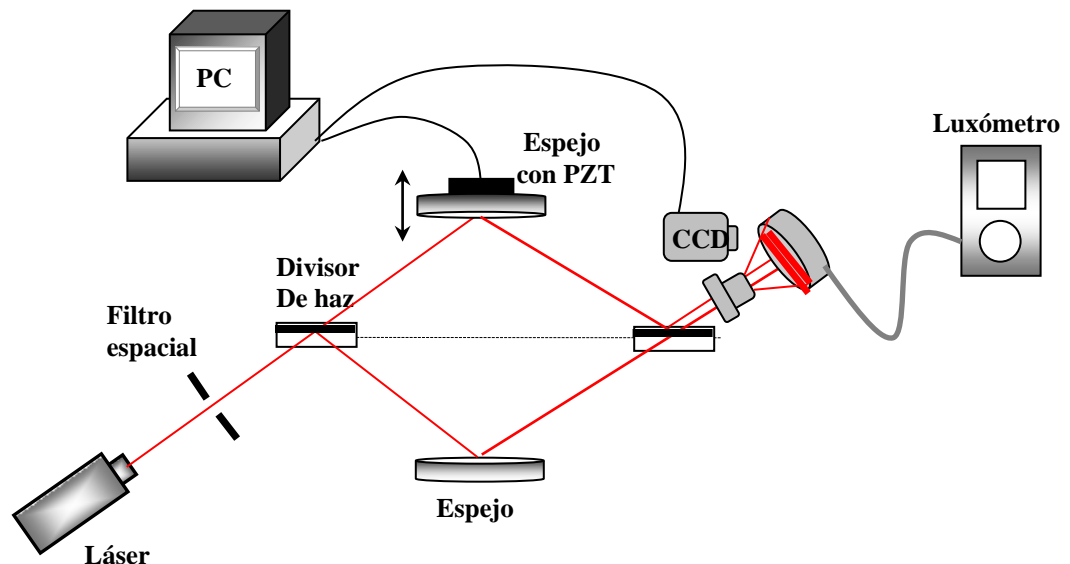


Figura 4.3 Configuración utilizada para caracterizar el sistema de corrimiento de fase.

Usando un posicionador vertical se ubica el luxómetro en el punto para el cual su registro de intensidad luminosa es máximo, en este punto hay una franja brillante en el centro del detector. A partir de esta posición se empieza a aplicar voltaje de forma controlada sobre el sistema piezoeléctrico, generando un desplazamiento en uno de los espejos del interferómetro, lo que provoca un corrimiento en las franjas de interferencia. En el momento en que el luxómetro registre un mínimo de intensidad, significa que hay una franja oscura en el centro del detector, es decir, se ha adicionado un desfase de π o está en contrafase con la condición inicial.

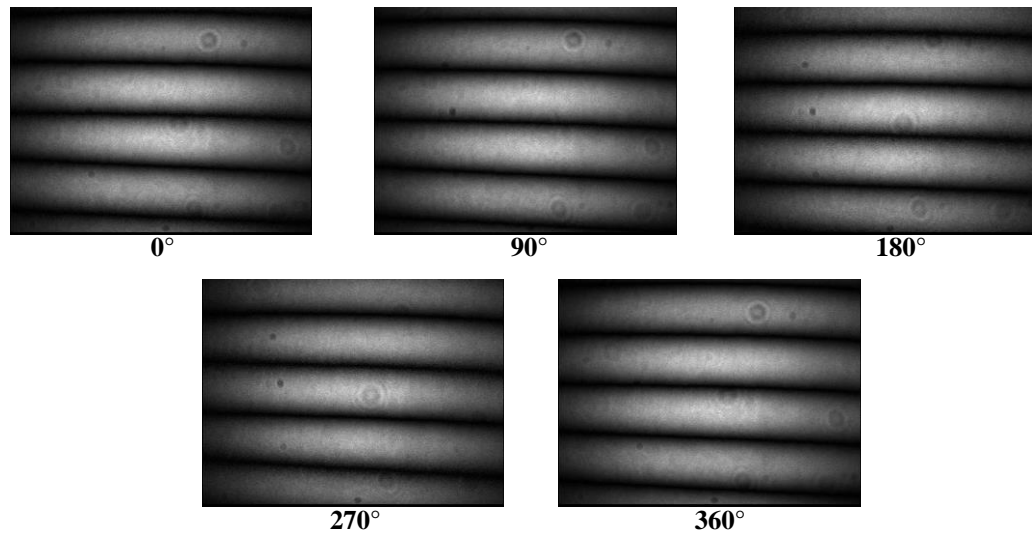
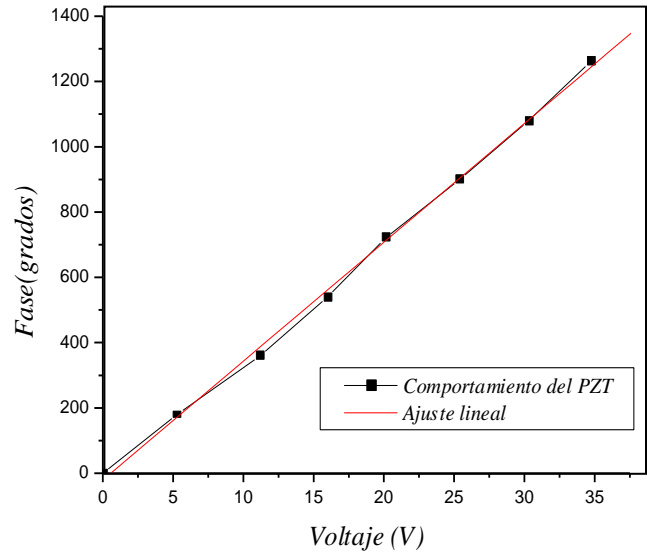


Figura 4.4 Franjas de interferencia generadas con saltos de fase de 90° .

Cuando el registro del luxómetro luego de aumentar el voltaje aplicado sobre el sistema piezoeléctrico es igual al valor inicial (valor máximo de intensidad) entonces se encuentra nuevamente una franja brillante en el centro del detector, lo que significa que se ha adicionado un desfase de 2π o está en fase con la condición inicial, figura 4.4. Se repite este procedimiento para desfases de 3π , 4π y 5π , obteniendo una relación de voltaje aplicado contra fase introducida tal como se muestra en la figura 4.5.

A partir del análisis de la gráfica de fase vs. voltaje es posible suponer un comportamiento lineal del sistema piezoeléctrico, lo que permite por interpolación encontrar el valor del voltaje necesario para generar desfases de $\pi/2$ y $3\pi/2$, usado en la técnica de corrimiento de fase de cuatro pasos. El cálculo de la interpolación [19] se llevó a cabo utilizando el comando interno de MatLab relacionado con la interpolación lineal. Los valores de voltaje para 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$ (0° , 90° , 180° y 270° , respectivamente) a partir de la gráfica de fase vs. voltaje para el sistema piezoeléctrico implementado se presentan en la tabla 4.1.

Voltaje (V)	Fase (grados)
0.0	0
5.3	180
11.2	360
16.0	540
20.1	720
25.4	900
30.3	1080
34.7	1260



a)

b)

Figura 4.5 Relación entre la fase introducida y el voltaje aplicado. a) Tabla de datos obtenida para la fase y el voltaje b) Representación gráfica.

Voltaje (V)	Fase (grados)
0	0
2.6	90
5.3	180
8.2	270

Tabla 4.1 Fase introducida y voltaje aplicado.

La diferencia de camino óptico introducida en uno de los brazos del interferómetro, respecto al otro, se debe principalmente a la incertidumbre del sistema usado en la medición (± 0.001 m), y al movimiento del espejo mediante el PZT, que es del orden de 10^{-7} m. Esta diferencia de camino es muy inferior a la longitud de coherencia del láser utilizado como fuente de iluminación (longitud de coherencia 0.6 m). A partir de esto es posible garantizar que los haces que llegan a la muestra bajo estudio son altamente coherentes.

4.3 SISTEMA ELECTROMECAÁNICO DE TRACCIÓN

Se implementó un sistema electromecánico de tracción para aplicarle cargas externas o tensiones mecánicas a un material elastómero (látex de hule natural), el sistema fue construido con los siguientes elementos:

- Un motor paso a paso unipolar, 1.8° de resolución, características eléctricas: 5 V y 1 A.
- Un reductor de velocidad con una relación de entrada-salida de 5 a 1.
- Un tornillo (26 hilos por pulgada) con un desplazamiento lineal de 1mm por revolución.
- Dos mordazas (1 fija, 1 móvil).

El sistema mecánico construido es mostrado en la figura 4.6

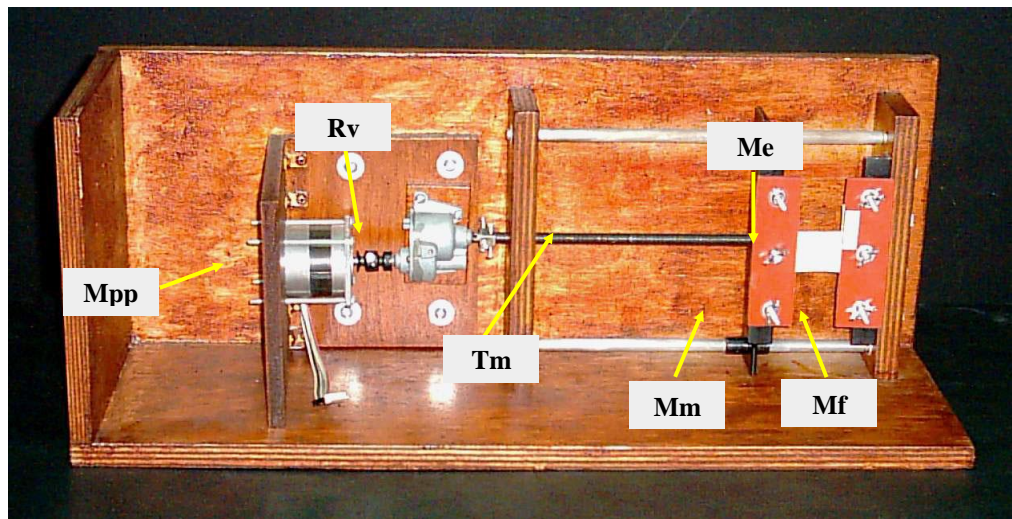


Figura 4.6 Sistema electromecánico de tracción. Mpp: motor paso a paso, RV: reductor de velocidad, Mf: mordaza fija, Mm: mordaza móvil, Tm: tornillo milimétrico, Me: muestra bajo estudio.

Cuando se sujeta una muestra a las mordazas del sistema de tracción, la mordaza móvil siempre realiza un desplazamiento lineal de $1\mu\text{m}$ por cada paso del motor, en teoría la muestra se deforma el mismo micrómetro por cada paso, siempre y cuando el motor tenga el torque suficiente para deformar la muestra; por lo tanto, sería un error considerar que el torque ejercido por el motor es la fuerza aplicada a la muestra bajo estudio.

4.3.1 Control del motor paso a paso El control de la carga mecánica aplicada por la máquina de ensayos se llevó a cabo por medio del control de movimiento del motor paso a paso unipolar que se incorporó en el sistema. Para controlar el paso del motor se utilizó un circuito integrado ULN2803, el cual es una arreglo de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar corrientes eléctricas de hasta 500 mA.

La señal enviada por el computador a través de los pines 2-5 del puerto paralelo son llevadas a los pines 1-4 del circuito integrado y la salida de este (pines 15-18) se conectan directamente a las bobinas del motor paso a paso, tal como se muestra en la figura 4.7.

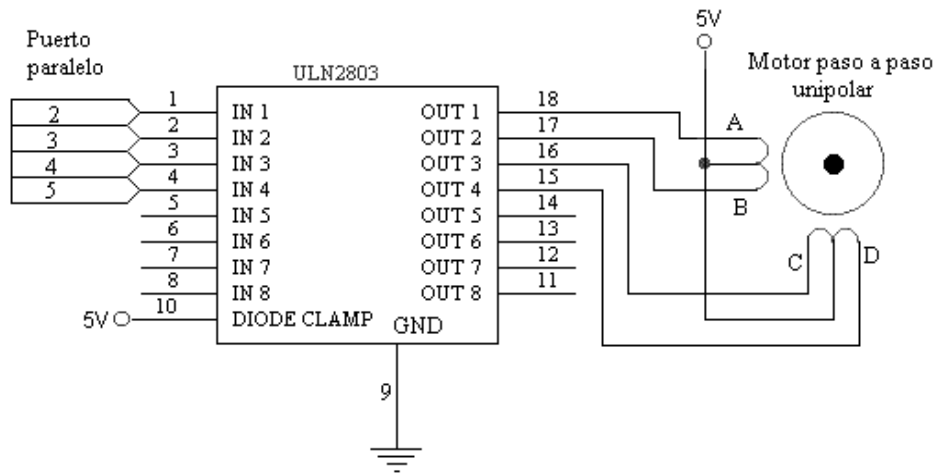


Figura 4.7 Esquema de la tarjeta para el control de un motor paso a paso unipolar.

Para el control del paso del motor se implementó la secuencia de paso completo doble. Consiste en tener activas dos bobinas consecutivas, simultáneamente, de modo que el eje del motor se oriente hacia el punto medio de ambas bobinas. Esta es la secuencia más usada y la que generalmente recomienda el fabricante. Con esta secuencia el motor avanza un paso cada vez y, debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención. Para el motor utilizado en la máquina de ensayo construida, la implementación de la secuencia de paso completo logra una resolución de 200 pasos por revolución. En la tabla 4.2 se muestra la secuencia utilizada para una vuelta completa del motor en configuración de paso completo doble.

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D
1	ON	ON	OFF	OFF
2	OFF	ON	ON	OFF
3	OFF	OFF	ON	ON
4	ON	OFF	OFF	ON

Tabla 4.2 Secuencia paso completo del motor.

4.3.2 Caracterización El desplazamiento del sistema fue caracterizado con un calibrador digital de 10 μm de resolución. Según los datos obtenidos, tabla 4.3, por cada 10 pasos del motor se obtiene, en promedio, un desplazamiento lineal de 10 μm . Se comprobó por interpolación que por cada paso del motor la mordaza móvil se desplaza 1 μm , estando libre de muestra o con la muestra bajo estudio, figura 4.8. Por lo tanto, se logró construir un robusto sistema de tracción de alta sensibilidad, cuya aplicación se ve restringida por el torque del motor, pero para el caso que nos ocupa, el sistema presenta un buen desempeño para analizar las deformaciones producidas cuando un material es sometido a tensiones.

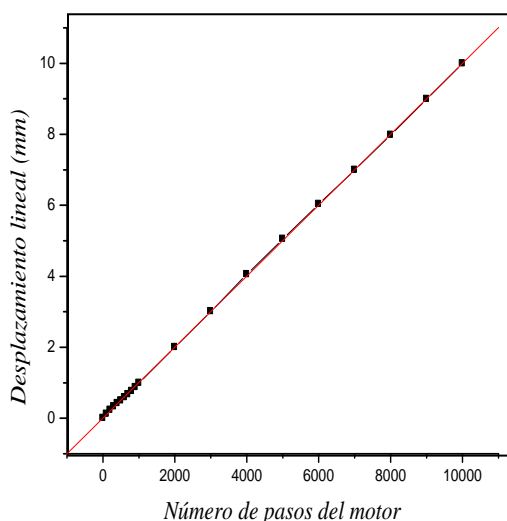
Numero de pasos del motor	Desplazamiento Lineal (mm)
0	0.00
100	0.12
200	0.23
300	0.33
400	0.42
500	0.50
600	0.59
700	0.67
800	0.76
900	0.87
1000	0.99
2000	2.00
3000	3.01
4000	4.05
5000	5.05
6000	6.03
7000	6.99
8000	7.98
9000	8.99
10000	9.99

a)

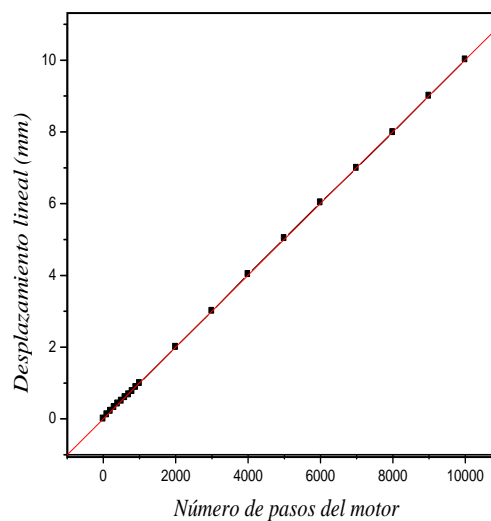
Numero de pasos del motor	Desplazamiento Lineal (mm)
0	0.00
100	0.12
200	0.22
300	0.32
400	0.42
500	0.50
600	0.60
700	0.68
800	0.77
900	0.88
1000	0.99
2000	2.00
3000	3.00
4000	4.03
5000	5.03
6000	6.03
7000	6.99
8000	7.99
9000	9.00
10000	10.01

b)

Tabla 4.3 Tablas de datos experimentales del sistema de tracción. a) Libre de muestra. b) Con la muestra de hule látex.



a)



b)

Figura 4.8 Gráficas que representan la linealidad existente entre los pasos del motor y el desplazamiento lineal de la mordaza móvil. a) Sistema sin muestra. b) Sistema con muestra.

Para la utilización de la técnica óptica DSPI en la medida de deformaciones producidas en un material elastomérico, es necesaria la aplicación de fuerzas del orden de 10^{-3} N; pero debido a que en el laboratorio de óptica no se cuenta con un instrumento capaz de registrar este tipo de cargas mecánicas con la precisión deseada, se hizo necesario para el desarrollo del trabajo realizar un montaje mecánico con el fin de estimar, a partir de la interpolación de datos, el valor de la fuerza necesaria para generar desplazamientos micrométricos de la muestra bajo estudio. Para tal fin se colgó la muestra de su extremo superior y sobre su extremo inferior se suspendieron diferentes pesos, de este modo la muestra de hule látex era deformada y dicha deformación fue medida utilizando un calibrador digital, el cual posee un intervalo de medición de 0 a 150 mm con una precisión del 1% y una resolución de 0.01 mm. Posteriormente el valor de la fuerza que se aplicaba sobre la muestra debido a cada peso fue medido con la ayuda de un sensor de fuerza marca Pasco modelo IC-6519, el cual posee una resolución de 0.0049 N y una precisión para aplicaciones estáticas del 1%.

Los datos experimentales de fuerza y deformación obtenidos para una muestra de hule látex, de dimensiones: 50.00 mm de largo, 39.80 mm de ancho y 0.63 mm de espesor, se presentan en la tabla 4.4.

Datos	Fuerza (N)	Deformación (m)
1	0.0000	0.00000
2	0.1960	0.00027
3	0.3920	0.00048
4	0.5880	0.00073
5	0.7840	0.00093
6	0.9800	0.00114
7	1.1760	0.00134
8	1.3720	0.00164
9	1.5680	0.00184
10	1.7640	0.00209

Tabla 4.4 Datos experimentales de fuerza y deformación para una muestra de hule látex de 50.00 mm de largo, 39.80 mm de ancho y 0.63 mm de espesor.

Para este caso, usando la función interna de MatLab relacionada con interpolación, se estimaron los datos de fuerza necesarios para que la muestra se deformara 4 μm , 8 μm y 12 μm (lo que en la máquina de tracción corresponde a 4, 8 y 12 pasos del motor, respectivamente). Estos datos son mostrados en la tabla 4.5.

Fuerza (N)	Deformación (μm)
3×10^{-3}	4
6×10^{-3}	8
9×10^{-3}	12

Tabla 4.5 Datos de fuerza y deformación obtenidos por interpolación para una muestra de hule látex de 50.00 mm de largo, 39.80 mm de ancho y 0.63 mm de espesor.

La tabla 4.6 representa los datos experimentales obtenidos de fuerza y deformación para una muestra de hule látex de 38.60 mm de largo, 34.50 mm de ancho y 0.29 mm de espesor, mientras que en la tabla 4.7 se presentan los datos de fuerza obtenidos por interpolación para deformaciones de 4 μm , 8 μm y 12 μm .

Datos	Fuerza (N)	Deformación (m)
1	0.0000	0.00000
2	0.1960	0.00077
3	0.3920	0.00204
4	0.5880	0.00290
5	0.7840	0.00366
6	0.9800	0.00502
7	1.1760	0.00652
8	1.3720	0.00745
9	1.5680	0.00809
10	1.7640	0.00988

Tabla 4.6 Datos experimentales de fuerza y deformación para una muestra de hule látex de 38.60 mm de largo, 34.50 mm de ancho y 0.29 mm de espesor.

Fuerza (N)	Deformación (μm)
1×10^{-3}	4
2×10^{-3}	8
3×10^{-3}	12

Tabla 4.7 Datos de fuerza y deformación obtenidos por interpolación para una muestra de hule látex de 38.60 mm de largo, 34.50 mm de ancho y 0.29 mm de espesor.

4.4 ADQUISICIÓN DE LOS PATRONES DE *SPECKLE*

La adquisición de los patrones de *speckle* se llevó a cabo utilizando una cámara CCD monocromática de alta resolución SONY XC-7500, la cual ofrece *scan* progresivo y obturación asíncrona por cuadro (1/4 a 1/100.000 s). Posee pixeles cuadrados con tamaño $9.9 \times 9.9 \mu\text{m}$, dispuestos en forma rectangular $648 \text{ (H)} \times 485 \text{ (V)}$ y su salida es modo no entrelazado, EIA, con resolución VGA.

La información obtenida por la CCD es luego transmitida a una tarjeta digitalizadora MATROX METEOR-II MULTI-CHANNEL de alto rendimiento, que posee 4 MB de memoria de imagen e incorpora un filtro pasa bajos de 10 MHz, ADC ajustables y tres 256×8 bits LUT's. La tarjeta digitalizadora se encuentra instalada en un bus PCI del computador personal. Las imágenes obtenidas consisten en arreglos de bits (8 bits por elemento) en 256 niveles de gris, las que son adquiridas a través de una aplicación software [20] bajo Visual C++ y con la ayuda de las librerías MIL suministradas con la tarjeta digitalizadora.

4.5 SOFTWARE

Uno de los paquetes computacionales más completos que ofrece adquisición de datos por puerto serial y paralelo, así como un *toolbox* de procesamiento digital de imágenes es MatLab, el cual fue utilizado durante el desarrollo de este trabajo para el control de los distintos dispositivos implementados y el procesamiento de la información.

Con este paquete se controló el motor paso a paso por medio del puerto paralelo utilizando la función *digitalio('adaptor',ID)* que pertenece a las librerías de MatLab y se utiliza para interfazar un dispositivo hardware del PC a una tarjeta de control por medio de un puerto que es especificado por los parámetros de la función, (*'adaptor'=parallel*) (*'ID'=LPT1*). Igualmente se empleó esta función para controlar el dispositivo piezoeléctrico por medio de un control de voltaje, descrito en los apartados correspondientes y cuyas líneas de secuencias lograban llegar a la tarjeta por medio del puerto paralelo con la función *putvalue(obj.Line(index),data)*. Para información más detallada se puede consultar las herramientas de adquisición de datos en la ayuda de MatLab.

Los algoritmos que se presentan en la sección 4.7 utilizados para el pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes obtenidas a partir de la interferometría *speckle*, por ejemplo: filtrado, cortado de las imágenes, correlación por sustracción de los patrones de *speckle*, algoritmo de corrimiento de fase, algoritmo para el desenvolvimiento de fase 2π y las gráficas correspondientes fueron también implementados utilizando MatLab como soporte.

4.6 MUESTRA BAJO ESTUDIO

La técnica de interferometría digital de patrones de *speckle* puede ser aplicada a una infinidad de materiales para determinar sus propiedades mecánicas y de esta forma decidir sobre sus posibles aplicaciones. Una de las limitantes a la hora de usar un material determinado está relacionada con la potencia de la máquina de ensayo. Una máquina de ensayos de tracción utilizada para medir las deformaciones que se producen en un metal, por ejemplo el acero, debe tener una potencia bastante grande debido a la alta resistencia que presenta el acero a ser deformado. La máquina de ensayos que se diseñó para cumplir con el propósito de este trabajo no posee una potencia tan alta como para ser utilizada en metales, por esta razón se optó por utilizar el caucho natural como material de prueba, ya que al ser un material tipo elastomérico presenta deformaciones significativas mediante la aplicación de tensiones relativamente bajas (Capítulo 3). Otra razón que impulsó la utilización de este material es la importancia que ha tomado actualmente en la fabricación de una gran variedad de productos y la poca información que se encuentra en la literatura alrededor de este material, en comparación con otros materiales (por ejemplo el acero).

Una de las grandes dificultades que presenta el uso de los elastómeros, en particular el caucho, es la alta dependencia que presentan las propiedades mecánicas con la temperatura. A bajas temperaturas el caucho se convierte en un material rígido, mientras que si se calienta se vuelve un material blando, hasta el punto de sufrir transformaciones irreversibles, por esta razón los ensayos fueron realizados a una temperatura de 22°C (temperatura ambiente).

Se analizaron dos materiales elastómeros, una muestra de hule látex natural extraída de un guante similar a los usados para proteger las manos cuando se manipulan químicos, detergentes, etc, y otra muestra de hule látex la cual se obtuvo de un globo como los que se usan en las fiestas infantiles.

4.7 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE FASE

Tenemos que la configuración del interferómetro de tres haces de iluminación es sensible a desplazamientos *en el plano* y a desplazamientos *fuera del plano*. Hay que recordar que el interferómetro es sensible solo a desplazamientos en la dirección del eje x cuando son usados dos haces de iluminación incidiendo en la muestra a ángulos iguales, y es sensible a desplazamientos en el eje x y en el eje z cuando se trabaja con dos ángulos de iluminación desiguales.

En interferometría *speckle* se registra el cambio de fase de cada *speckle* antes y después de la deformación de un material. Cuando la muestra es deformada, el cambio de fase depende del cambio en la longitud de camino óptico entre las exposiciones y brinda información del campo de deformaciones del material.

Nuestro objetivo es cuantificar dichas deformaciones producidas en la muestra en las direcciones del eje x y del eje z , por lo que primero se deben extraer los valores de la fase, para lo cual se recurre a la técnica de corrimiento de fase (Sección 1.6.1). Cuando se usa esta técnica se deben tomar varias imágenes antes y después de deformar el material; durante el tiempo en que se tarda en tomar y registrar las cuatro imágenes del interferómetro, en la configuración de ángulos iguales y en la configuración de ángulos desiguales, se asume que el material no sufre cambio alguno, de manera que el patrón de *speckle* sea el mismo durante ese intervalo de tiempo.

La metodología empleada para obtener las imágenes fue la siguiente.

1. Se habilita el interferómetro para que trabaje solamente en la configuración de ángulos iguales.
2. Se capturan las cuatro imágenes correspondientes al corrimiento de fase (0° , 90° , 180° , 270°).
3. Se deshabilita la configuración del interferómetro de ángulos iguales y se habilita la configuración de ángulos desiguales.
4. Se capturan las cuatro imágenes correspondientes al corrimiento de fase (0° , 90° , 180° , 270°).
5. Se aplica una carga mecánica externa al material.
6. Se capturan las cuatro imágenes correspondientes al corrimiento de fase (0° , 90° , 180° , 270°).
7. Se deshabilita la configuración del interferómetro de ángulos desiguales y se habilita la configuración de ángulos iguales.
8. Se capturan las cuatro imágenes correspondientes al corrimiento de fase (0° , 90° , 180° , 270°).
9. Se deforma nuevamente la muestra.
10. Se repite todo el procedimiento hasta aplicar todas las cargas externas.

Usando cualquier configuración del interferómetro (ángulos iguales o ángulos desiguales), las irradiancias de las 8 imágenes capturadas pueden ser escritas como [21]:

$$I_n = I_o + I_M \sqrt{\gamma} \cos(\phi + n\pi/2), \quad (4.6)$$

$$I'_n = I'_o + I'_M \sqrt{\gamma} \cos(\phi' + n\pi/2 + \Delta\phi), \quad (4.7)$$

donde, $n = 0, 1, 2, 3$, I_n es la irradiancia para las imágenes de la muestra antes de la deformación e I'_n es la irradiancia de las imágenes de la muestra después de la deformación, en este caso son tomadas cuatro imágenes ($n = 0, 1, 2$ y 3) antes de la deformación y después de la deformación para cada configuración del interferómetro, I_0 es una irradiancia de fondo que varía suavemente, I_M es la modulación de la irradiancia y ϕ es la fase aleatoria del *speckle*. El valor de correlación γ está relacionado con el contraste de las franjas y estará entre los valores cero y uno, dependiendo de la coherencia de los haces de iluminación que interfieren. $\Delta\phi$ es el cambio de fase que buscamos el cual es debido a la deformación de la muestra y puede ser obtenido combinando las ocho imágenes mencionadas anteriormente de la siguiente manera:

$$\Delta\phi = \arctan \left[\frac{(I'_3 - I'_1)(I_0 - I_2) - (I_3 - I_1)(I'_0 - I'_2)}{(I'_0 - I'_2)(I_0 - I_2) + (I'_3 - I'_1)(I_3 - I_1)} \right]. \quad (4.8)$$

Con la metodología y el algoritmo descrito se obtuvieron los mapas de fase de módulo 2π .

El algoritmo de la Ec. (4.8) permite encontrar la información de la fase, aún si el contraste de las franjas cae, el algoritmo es aplicable siempre y cuando γ no sea cero, ya que esto significaría que no se ha producido interferencia alguna.

Un mapa de fase de módulo 2π obtenido con la Ec. (4.8) es mostrado en la figura 4.10a. Para extraer el valor de la fase asociado al mapa de módulo 2π es necesario eliminar los saltos de fase mediante un algoritmo de desdoblamiento de fase, pero antes de aplicarlo es necesario realizar una selección de buenos datos, hay varias maneras de llevarlo a cabo, como la detección de bordes de las franjas y el rellenado con un degradado continuo según los valores de las mismas, o también mediante técnicas de filtrado para suavizar un poco las franjas y reducir el ruido. Se empleó un filtro trigonométrico diseñado especialmente para el análisis de mapas de fase de módulo 2π , este filtro es muy eficaz y es ampliamente usado antes de aplicar el algoritmo de desenvolvimiento de fase.

4.7.1 Filtro trigonométrico Con $\Delta\phi(i, j)$ como la fase envuelta de módulo 2π , e (i, j) las coordenadas de los pixeles, el filtro trigonométrico opera de la siguiente manera:

1. Calcula el seno de la fase envuelta. *Sen* ($\Delta\phi(i, j)$).
2. Aplica un filtro pasa bajas y el resultado es colocado en una variable $a(i, j)$.
3. Calcula el coseno de la fase envuelta. *Cos* ($\Delta\phi(i, j)$).
4. Aplica un filtro pasa bajas y el resultado es colocado en una variable $b(i, j)$.
5. El resultado de la fase de módulo 2π filtrada es obtenido como:

$$\Delta\phi(i, j)_{fil} = \arctan\left(\frac{a(i, j)}{b(i, j)}\right). \quad (4.9)$$

Considerando que los patrones de *speckle* obtenidos presentan un ruido llamado *speckle* o ruido sal y pimienta; al filtrar las imágenes con diferentes filtros como pasa bajas, pasa altas, medianos, etc, es posible que se pierdan datos de fase y que la imagen filtrada ya no sea un mapa de fase de módulo 2π , figura 4.9, sino que tenga valores menores a este rango. Al aplicarle el seno, el coseno y un filtro pasa bajas a la fase, la imagen filtrada queda restablecida en un rango de módulo 2π con la función arcotangente, figura 4.10b. La desventaja de este filtro es que los valores de ruido que no fueron eliminados con el filtro pasa bajas están superpuestos con valores de fase; por tal motivo, hay que ser muy crítico con los resultados aunque este filtro sea el más adecuado.

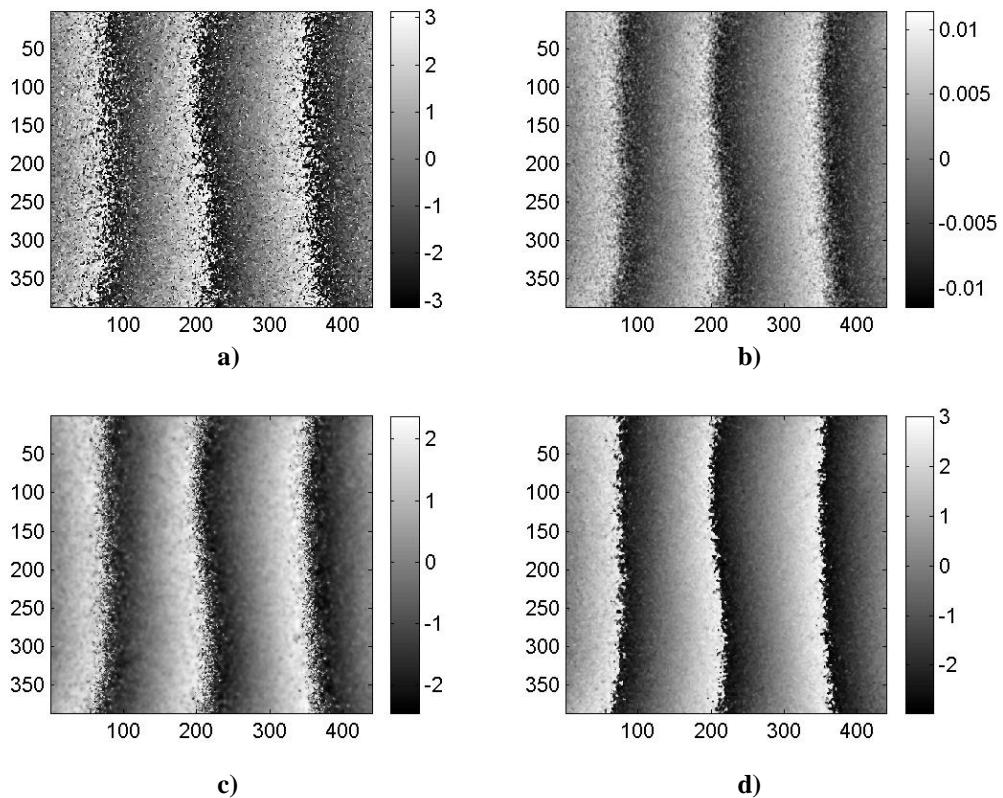


Figura 4.9 Mapa de fase módulo 2π , filtrado con cuatro filtros diferentes. a) Filtro pasa bajas (3×3) con factor de $(1/9)$. b) Filtro promedio 3×3 . c) Filtro lineal adaptativo. d) Filtro mediano (3×3). Para cada uno de los casos, la escala corresponde al valor de la fase módulo 2π .

Posteriormente, después de aplicar el filtro trigonométrico al mapa de fase, la imagen filtrada se recorta en el área de interés, figura 4.10c. Mediante la aplicación del algoritmo implementado de desdoblamiento de fase independiente de la trayectoria descrito en la sección 2.4.1.2. se eliminan los saltos de fase del mapa módulo 2π , obteniendo una distribución de fase continua, figura 4.10d.

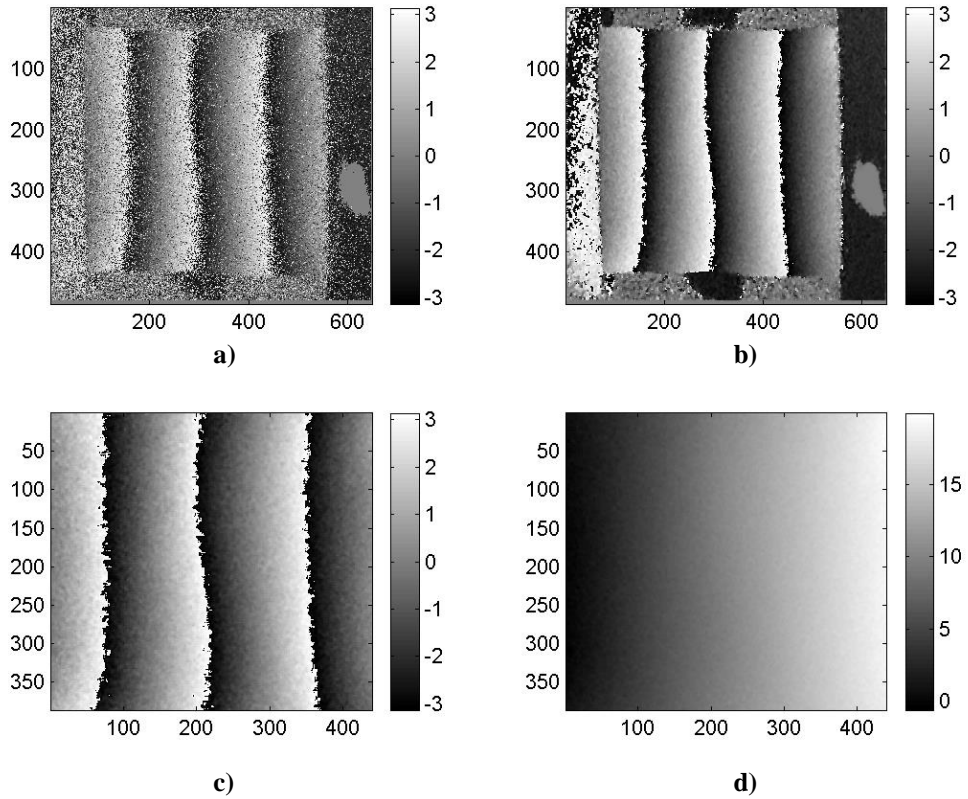


Figura 4.10 Mapa de fase filtrado con filtro trigonométrico. a) Mapa de fase de módulo 2π sin filtrar. b) Mapa de fase filtrado usando un filtro trigonométrico. c) Mapa de fase filtrado y cortado. d) Fase desdoblada usando un algoritmo independiente de la trayectoria.

5. RESULTADOS

5.1 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS UTILIZANDO UN MÉTODO CONVENCIONAL

Cada material fue sometido a pruebas mecánicas, encontrando una relación entre una carga aplicada (peso aplicado) y una deformación resultante para cada fuerza. Se encontraron valores de las propiedades mecánicas del material en el límite elástico [22] y se emplearon para compararlos con los resultados obtenidos con la técnica DSPI, ya que en la literatura no se encuentran valores específicos de estas propiedades para los materiales utilizados.

5.1.1 Muestra #1. Hule látex natural (0.63 mm de espesor) La muestra de hule látex fue extraída de un guante similar a los usados para proteger las manos cuando se manipulan químicos, detergentes, etc, y fue cortada en forma rectangular. La muestra preparada para someterla al ensayo de tracción tenía las siguientes dimensiones: 50.00 mm de largo (distancia entre mordazas), 39.80 mm de ancho y 0.63 mm de espesor. Se realizaron tres ensayos de tracción para poder obtener un promedio de los resultados y así reducir errores.

Los resultados de estos ensayos se muestran en la tabla 5.1, datos con los cuales se construyó el diagrama de esfuerzo-deformación mostrado en la figura 5.1.

Datos	Esfuerzo (N/m ²)	ENSAYO #1	ENSAYO #2	ENSAYO #3
		Deformación unitaria (m/m)	Deformación unitaria (m/m)	Deformación unitaria (m/m)
1	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
2	3932.3602	0.00325	0.00271	0.00298
3	7864.7204	0.00569	0.00623	0.00623
4	11797.0806	0.00867	0.00895	0.00895
5	15729.4409	0.01111	0.01030	0.01057
6	19661.8011	0.01355	0.01410	0.01382
7	23594.1613	0.01599	0.01626	0.01654
8	27526.5215	0.01952	0.01870	0.01843
9	31458.8882	0.02196	0.02277	0.02331
10	35391.2419	0.02494	0.02521	0.02548
11	39323.6021	0.02792	0.02657	0.02738
12	43255.9624	0.03036	0.03009	0.03036

Tabla 5.1 Datos experimentales para los valores de esfuerzo, deformación para una muestra de hule látex.

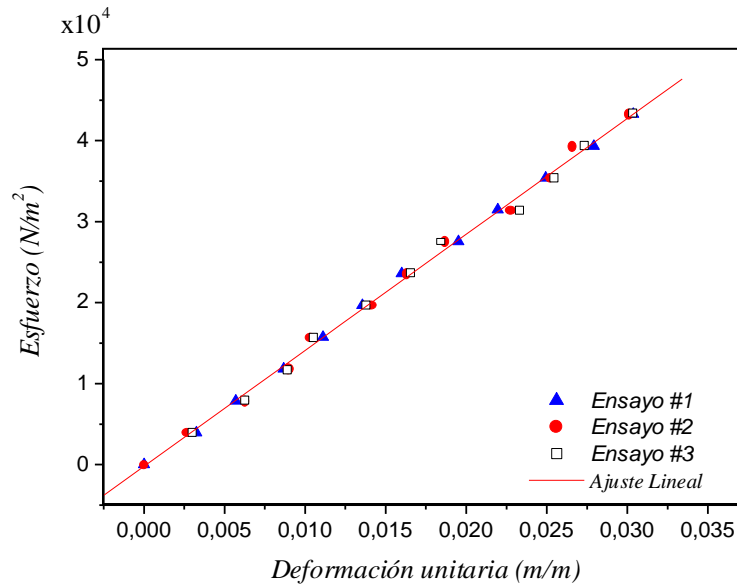


Figura 5.1 Diagrama esfuerzo-deformación para una muestra de hule látex.

Como se mencionó en la sección 3.4, el módulo de elasticidad o módulo de Young (E) corresponde a la pendiente de la línea esfuerzo-deformación en la región elástica. Para el cálculo de la pendiente se utilizó el método de mínimos cuadrados [23], [24], el cual está dado por la ecuación:

$$Pendiente = \frac{n \sum xy - (\sum x \sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, \quad (5.1)$$

donde n es el número de datos, x representa cada uno de los valores de la deformación unitaria y y cada uno de los valores del esfuerzo.

Para complementar el resultado, se estimó un margen de error que está dado por la desviación estándar (Ec. 5.2) de los valores de (E) mostrados en la tabla 5.2.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (5.2)$$

donde s es la desviación estándar, x_i es cada uno de los valores de la variable, \bar{x} es la media, y n es el número de datos.

Datos	ENSAYO #1	ENSAYO #2	ENSAYO #3
	Módulo de Young (N/m ²)	Módulo de Young (N/m ²)	Módulo de Young (N/m ²)
1	-	-	-
2	1209956.9846	1451055.4244	1319583.9597
3	1382200.4218	1262394.9278	1262394.9278
4	1360678.2699	1318109.5642	1318109.5642
5	1415791.2601	1527130.1845	1488121.1826
6	1451055.4317	1394453.9787	1422706.3025
7	1475557.3046	1451055.4305	1426491.0097
8	1410170.1588	1472006.4973	1493571.4324
9	1432554.1075	1381593.6847	1349587.6534
10	1419055.4090	1403857.2749	1388981.2363
11	1408438.4706	1480000.0790	1436216.2929
12	1424768.1950	1437552.7551	1424768.1950
Pendiente	1431751.9744	1446322.4978	1425270.6834
Desviación estándar	69818.7623	75813.2794	73481.5849

Tabla 5.2 Datos experimentales para los valores del módulo de Young para una muestra de hule látex.

De acuerdo con los resultados obtenidos para una muestra de hule látex de dimensiones 50.00 mm de largo (distancia entre mordazas), 39.80 mm de ancho y 0.63 mm de espesor, el valor estimado del módulo de Young a 22° C es **1434448.3852 ± 71432.3928 Pa**, lo que corresponde a ± 5 % de precisión en la medida.

Dado que el espesor de la muestra al final del ensayo de tracción es 0.62 mm, la deformación unitaria transversal es de **0.01587** (Sección 3.3) y la deformación unitaria longitudinal es **0.03027** en promedio al final de los tres ensayos de tracción. A partir de la ecuación 3.7 se encuentra que el coeficiente de Poisson de la muestra es de **0.52437 ± 0.00272** y el módulo de rigidez, ecuación 3.8, es **470505.3186 ± 3536.4847 Pa**.

El valor del coeficiente de Poisson en condiciones reales debe estar entre 0 y 0.5, por lo que el resultado obtenido mediante la técnica mecánica no es muy confiable

5.1.2 Muestra #2. Hule látex natural (0.29 mm de espesor) La muestra de hule látex utilizada para el ensayo de tracción tiene unas dimensiones de 34.50 mm de ancho, 38.60 mm de longitud y 0.29 mm de espesor. Los datos para los tres ensayos realizados sobre la muestra son presentados en las tablas 5.3 y 5.4.

Datos	Esfuerzo (N/m ²)	ENSAYO #1	ENSAYO #2	ENSAYO #3
		Deformación unitaria (m/m)	Deformación unitaria (m/m)	Deformación unitaria (m/m)
1	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
2	48975.5122	0.05661	0.05853	0.06208
3	58770.6147	0.07340	0.07484	0.07484
4	68565.7171	0.08396	0.08348	0.08156
5	78360.8196	0.09115	0.09259	0.09307
6	88155.9220	0.11130	0.11034	0.10938
7	97951.0245	0.11610	0.11418	0.11466
8	107746.1269	0.13241	0.13289	0.12522
9	117541.2294	0.14728	0.14872	0.14872
10	127336.3318	0.16120	0.16072	0.16168
11	137131.4343	0.17991	0.18135	0.17895
12	146926.5367	0.19670	0.19910	0.19718

Tabla 5.3 Datos experimentales obtenidos de esfuerzo, deformación para una muestra de hule látex.

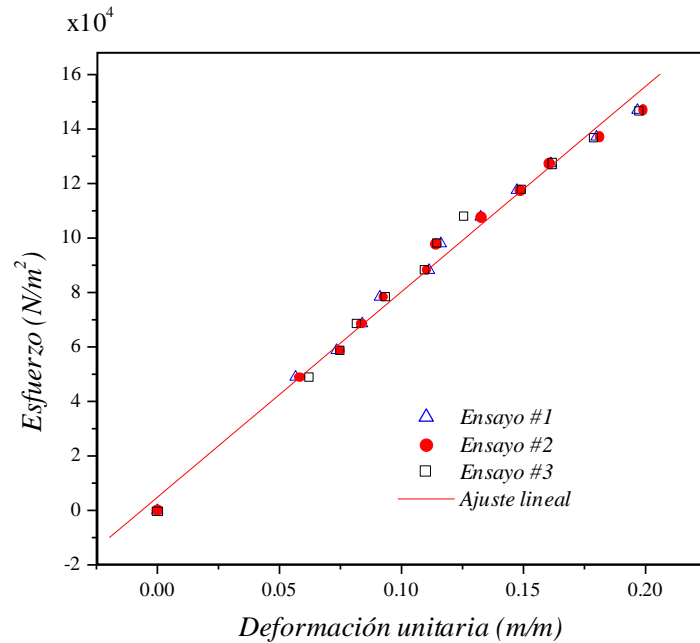


Figura 5.2 Diagrama esfuerzo-deformación para una muestra de hule látex.

Datos	ENSAYO #1	ENSAYO #2	ENSAYO #3
	Módulo de Young (N/m ²)	Módulo de Young (N/m ²)	Módulo de Young (N/m ²)
1	-	-	-
2	865138.8844	836759.1362	788909.6689
3	800689.5735	785283.4673	785283.4673
4	816647.4171	821343.0419	840678.2386
5	859690.8348	846320.5485	841955.7278
6	792056.8018	798947.9974	805960.1576
7	843678.0748	857864.9894	854273.7178
8	813731.0395	810791.8349	860454.6154
9	798080.0474	790352.5376	790352.5376
10	789927.6168	792286.7834	787582.4582
11	762222.4128	756170.0264	766311.4517
12	746957.4821	737953.4743	745139.1456
Pendiente	749300.7409	745093.3558	756283.7419
Desviación Estándar	37244.7337	36677.9414	37915.0456

Tabla 5.4 Datos experimentales para los valores del módulo de Young para una muestra de hule látex.

De acuerdo con los resultados obtenidos para una muestra de hule látex de dimensiones 34.50 mm de ancho, 38.60 mm de longitud y 0.29 mm de espesor, el valor estimado del módulo de Young a 22° C es **750225.9462 ± 36158.4880 Pa**, lo que corresponde a ± **4.8 %** de precisión en la medida.

5.2 CÁLCULO DE PROPIEDADES MECÁNICAS UTILIZANDO DSPI

Se determinaron y analizaron las deformaciones que sufre la superficie de un material elastómero cuando es sometido a la aplicación de cargas mecánicas externas, además se estimó el valor para diferentes propiedades mecánicas como el módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez del material.

Los siguientes resultados experimentales muestran mapas de fase envueltos de módulo 2π , con componentes solo *en el plano* y con componentes tanto *en el plano* como *fuera del plano*, la distribución de fase asociados a los mapas de módulo 2π hallada con un algoritmo de desdoblamiento de fase independiente de la trayectoria, representaciones 3D de los mapas de desplazamientos, representaciones 3D del módulo de Young y del coeficiente de Poisson del material y tablas donde se muestran los valores máximos, los valores mínimos, la media y la desviación estándar de cada una de estas medidas.

Los algoritmos empleados para la correlación de patrones de *speckle*, desdoblamiento de los mapas de fase de módulo 2π , además del pre-procesamiento y procesamiento digital de imágenes, fueron realizados en el software Matlab y las gráficas presentadas a continuación fueron obtenidas con este mismo paquete computacional.

El interferómetro de tres haces de iluminación implementado, figura 4.1, nos da la capacidad de registrar desplazamientos en las direcciones del eje x y del eje z , componentes del desplazamiento *en el plano* y *fuera del plano*, respectivamente.

Habilitando dos haces de iluminación de ángulos iguales ($\theta = 18^\circ$) respecto a la normal de la superficie del material bajo prueba, el interferómetro tiene la capacidad de detectar únicamente aquellos desplazamientos que se originan en la dirección del eje x , los valores experimentales para la fase son obtenidos y representados gráficamente en mapas similares al mapa de fase desenvuelto de la figura 5.3b, obtenida a partir del mapa de fase envuelto de módulo 2π de la figura 5.3a, esta fase desenvuelta es representada por la ecuación 1.42, la cual relaciona directamente la fase ($\Delta\phi_i$) con la componente del desplazamiento *en el plano* (u), por lo que la componente del desplazamiento *en el plano* (u) puede entonces ser determinada por:

$$u = \frac{\Delta\phi_i \lambda}{2\pi(2\text{sen}\theta_1)}, \quad (5.3)$$

por ser $\Delta\phi_i$ un mapa de fase desenvuelto que es representado por una matriz de m filas por n columnas ($m \times n$ *pixeles*), el mapa de desplazamientos con componentes únicamente *en el plano* estará determinado por la componente del desplazamiento *en el plano* (u) de tamaño $m \times n$, donde cada elemento de la matriz representa el valor de la deformación en el punto respectivo del material bajo prueba en la dirección del eje x .

Ahora, al deshabilitar uno de los haces de iluminación de ángulo ($\theta = 18^\circ$) a un lado de la normal y habilitando en este mismo lado un haz de iluminación de ángulo ($\theta = 45^\circ$), el interferómetro es capaz de detectar aquellos desplazamientos que se originan en la dirección del eje x y en la dirección del eje z simultáneamente; los valores experimentales para la fase son obtenidos y representados gráficamente en mapas de fase desenvueltos similares al de la figura 5.3d, obtenido a partir del mapa de fase de módulo 2π de la figura 5.3c. Esta fase desenvuelta, que presenta componentes tanto *en el plano* como *fuera del plano*, es representada por la ecuación 1.43, la cual relaciona la fase con componentes *en el plano* y *fuera del plano*, los dos ángulos de iluminación y las dos componentes del desplazamiento *en el plano* (u) y *fuera del plano* (w).

Es de saberse que los mapas de fase de módulo 2π obtenidos con la iluminación de ángulos desiguales, deben tener un número mayor de franjas ya que existe la presencia de las dos componentes, u y w ; por lo tanto, es de esperarse que el mapa de fase desenvuelto con

ambas componentes alcance valores mayores de fase que los obtenidos en el mapa de fase desenvuelto con componentes *en el plano*.

Las configuraciones del interferómetro con ángulos iguales y ángulos desiguales, al aplicar una carga determinada a la muestra, deben de registrar el mismo valor de la componente del desplazamiento *en el plano* (u), por lo que la ecuación 1.43 permite hallar la componente w .

$$w = \frac{\frac{\Delta\phi_{io}\lambda}{2\pi} - (\text{sen}\theta_1 + \text{sen}\theta_2)u}{(\text{cos}\theta_1 - \text{cos}\theta_2)}, \quad (5.4)$$

donde $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 18^\circ$ y u es la componente *en el plano* del desplazamiento. Por lo tanto, de la ecuación anterior se obtiene la componente del desplazamiento *fuera del plano* (w) o el mapa de desplazamientos *fuera del plano* (figura 5.3e) que representa la deformación, en dirección del eje z , en cada uno de los puntos del material, representados por cada elemento de matriz. (figura 5.3f)

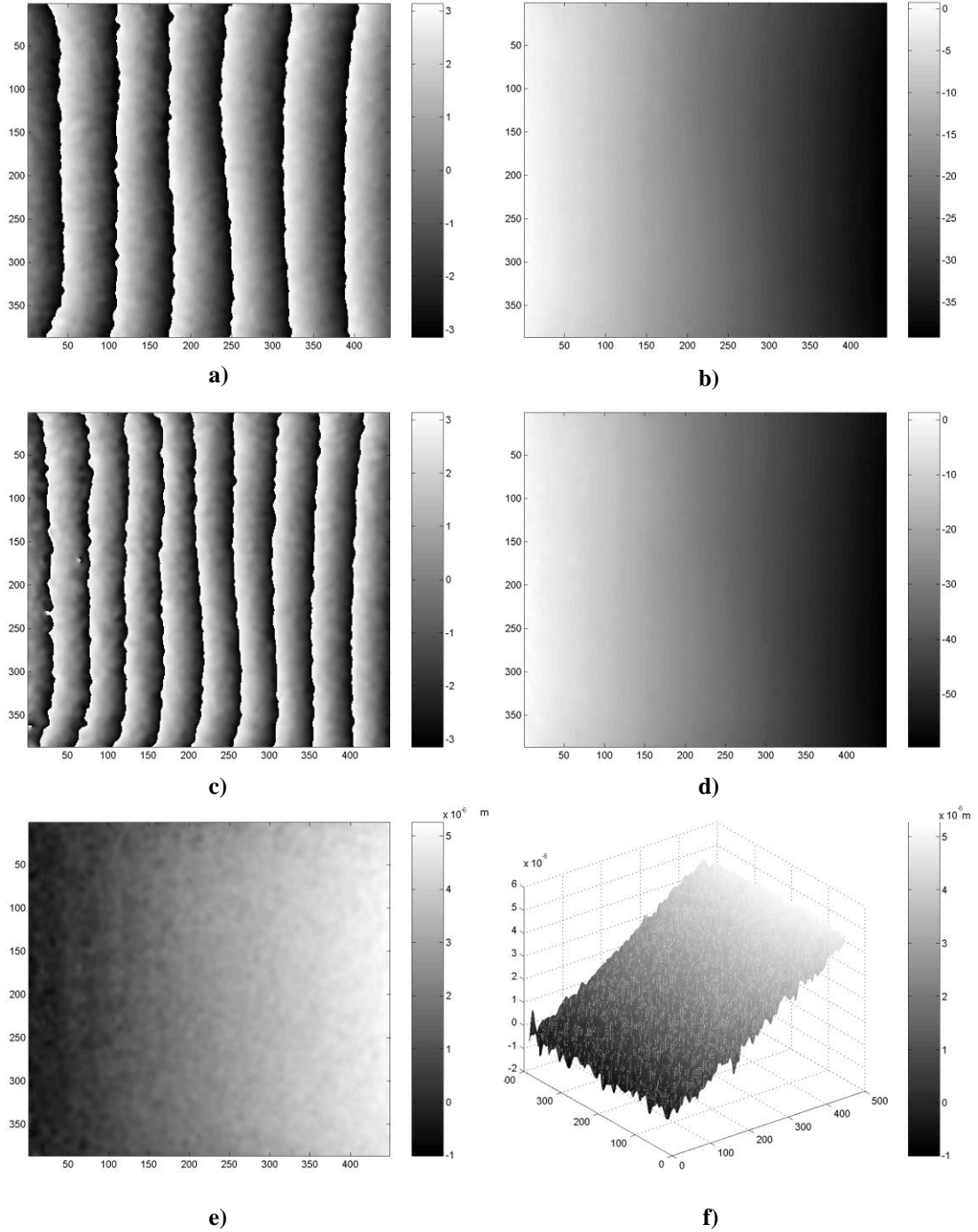


Figura 5.3 Mapas de fase y representación gráfica de las deformaciones a) Mapa de fase módulo 2π con componentes solo *en el plano* b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π con componentes solo *en el plano*. c) Mapa de fase módulo 2π con componentes *en el plano* y *fuera del plano*. d) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π con componentes *en el plano* y *fuera del plano*. e) Mapa de desplazamientos de cada punto del material en la dirección z . f) Representación gráfica de las deformaciones producidas *fuera del plano* (dirección del eje z). Las escalas representan los píxeles de la imagen.

Es de destacar que dependiendo del sistema de referencia que se tome, resultaran tanto valores positivos como negativos del desplazamiento, ya sean desplazamientos *en el plano* o desplazamientos *fuera del plano*.

Para los desplazamientos *en el plano*, se ha tomado la mordaza fija como sistema de referencia de manera tal que los mapas de desplazamientos presentan barras de colores que tienen valores negativos, el signo representa la dirección de aplicación de la fuerza o la dirección en que se deforma el material.

Para los desplazamientos *fuera del plano*, es posible tomar tres puntos de referencia donde los signos pueden ser positivos o negativos, o de ambos tipos; en el caso que nos ocupa, se sabe que en el ensayo de tracción el espesor de la muestra va en disminución a medida que se deforma el material en una dirección, por lo tanto, se ha optado por considerar simplemente que el valor de estos desplazamientos es la cantidad en que se ha disminuido el espesor en cada punto de la muestra.

5.2.1 Muestra #1. Hule látex natural (0.63 mm de espesor) La muestra de hule látex de dimensiones, 50.00 mm de longitud, 0.63 mm de espesor, 39.80 mm de ancho fue tomada de un guante de hule látex.

Los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos iguales ($\theta = 18^\circ$), para un material elastómero que fue sometido a una tensión de aproximadamente 3×10^{-3} Newton, son presentados en la figura 5.4. Aquí se muestran el mapa de fase de módulo 2π , el desdoblamiento realizado a la distribución de fase asociada con este mapa de fase y la representación tridimensional de la deformación *en el plano* con sus respectivos valores. Esta componente es obtenida a través de la ecuación 5.3.

Ahora, los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos desiguales ($\theta_1 = 45^\circ$ y $\theta_2 = 18^\circ$), para las mismas condiciones de carga y el mismo material elastómero, son presentados en la figura 5.5, aquí se muestran el mapa de fase de módulo 2π , el cual tiene componentes tanto *en el plano* como *fuera del plano*, el desdoblamiento realizado a la distribución de fase asociada con este mapa de fase y la representación tridimensional de la deformación *fuera del plano* con sus respectivos valores. Esta componente fue obtenida a través de la ecuación 5.4.

Bajo las condiciones de fuerza y dimensiones del material antes mencionadas se encontraron los valores de las siguientes propiedades mecánicas del material:

Módulo de Young: 1626717.1468 Pa.

Coefficiente de Poisson: 0.4221

Módulo de Rigidez: 574048.9819 Pa.

Es de notar que estos valores mostrados son el valor medio de cada una de las propiedades a través de todo el material.

El margen de error estará dado por la desviación estándar de los valores de cada una de las propiedades (ecuación 5.2).

Los valores de las propiedades mecánicas a temperatura ambiente (22°C) se muestran en la tabla 5.5.

Valores	Módulo de Young (E) (Pa) A. Transv. Variable	Coefficiente de Poisson (ν) (m/m). Imagen cortada	Módulo de rigidez (G) (Pa)
Media	1626717.1468	0.4221	574048.9819
Máximo	1727620.3979	0.6313	659928.8691
Mínimo	1505926.8212	0.2623	512161.5711
Des. Estándar	39213.3519	0.0370	24929.7692

Tabla 5.5 Valores medios del módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 3×10^{-3} N, cada valor con su respectivo máximo, mínimo y desviación estándar.

En la figura 5.6a y 5.6b se muestran las representaciones gráficas del módulo de Young y el coeficiente de Poisson, respectivamente, del material hule látex con dimensiones de 30.00 mm de ancho x 25.00 mm de longitud, con área transversal variable a medida que se le aplica la carga.

En la tabla 5.6 se muestran los valores del módulo de Young considerando un área transversal constante, bajo la suposición de que las variaciones del espesor de la muestra son muy pequeñas en comparación a las dimensiones del espesor; el módulo de Young considerando la variación del espesor, valor dado por la componente *fuera del plano* del desplazamiento, el coeficiente de Poisson de la imagen original sin cortar y el coeficiente de Poisson cortado a las mismas dimensiones que fue cortada la muestra para evitar los errores introducidos en los extremos de sujeción a las mordazas.

Si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del módulo de Young con área transversal constante y el módulo de Young con área transversal variable, se nota un aumento del 0.008% en la precisión de la medida cuando se considera el área transversal variable.

Aunque la precisión aumenta al considerar la variación del espesor a medida que la muestra es deformada, la variación en la precisión es muy baja, por lo que en diferentes tipos de ensayos, tal como lo es el ensayo de tracción, el espesor es considerado constante a través de todo el material, por lo que conlleva a un área transversal constante.

Valores	Módulo de Young (Pa) A. Transv. Cte.	Módulo de Young (Pa) A. Transv. Variable	Coefficiente de Poisson (m/m). Imag. Sin cortar	Coefficiente de Poisson (m/m). Imagen cortada
Media	1625921.9347	1626717.1468	0.3994	0.4221
Máximo	1727306.0382	1727620.3979	1.5524	0.6313
Mínimo	1505660.9365	1505926.8212	-0.4972	0.2623
Des. Estándar	39319.1805	39213.3520	0.1399	0.0370

Tabla 5.6 Valores medios del módulo de Young tomando el área transversal constante y área transversal variable, coeficiente de Poisson teniendo en cuenta los extremos de sujeción y sin tenerlos en cuenta, la muestra de hule látex fue sometida a una tensión de 3×10^{-3} N.

Ahora, si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del coeficiente de Poisson (imagen sin cortar e imagen cortada), se nota un aumento del 26 % en la precisión de la medida (de ~35 % a ~9 %) al realizar el análisis de las propiedades mecánicas sin tener en cuenta los extremos sujetos a las mordazas.

Por este tipo de errores introducidos en los extremos, entre otras razones, es que se considera solamente la parte central de la muestra bajo estudio para realizar la determinación de las diferentes propiedades mecánicas del material, que solo se pueden hallar en la parte elástica del mismo.

La barra de colores de la figura 5.4c representa el valor de la componente *en el plano* del desplazamiento, valor que esta comprendido entre $-3.47 \mu m$ y $-0.19 \mu m$ y la barra de colores de la figura 5.5c representa el valor de la componente *fuera del plano* del desplazamiento, valor que esta comprendido entre $-1.69 \mu m$ y $0.57 \mu m$.

El resultado de las deformaciones *en el plano*, obtenidas mediante la técnica de corrimiento de fase bajo las condiciones de fuerza y dimensiones del material antes mencionadas, son corroborados con el resultado obtenido mediante la técnica de conteo de franjas (véase el anexo 2). Cuando la muestra de hule látex es sometida a una tensión de 3×10^{-3} N, el valor de la deformación absoluta obtenida usando el conteo de franjas es de $3.35 \mu m$.

Los resultados obtenidos por medio de esta técnica no son tan precisos como los que se obtienen con la técnica de corrimiento de fase, pero generan una buena aproximación para cuantificar las deformaciones producidas sobre un material.

Para esta muestra de hule látex, redondeando los valores de cada pixel en las imágenes al numero de cifras significativas del instrumento de medida, calibrador, cada pixel tiene un valor aproximado de 0.10 mm x 0.10 mm.

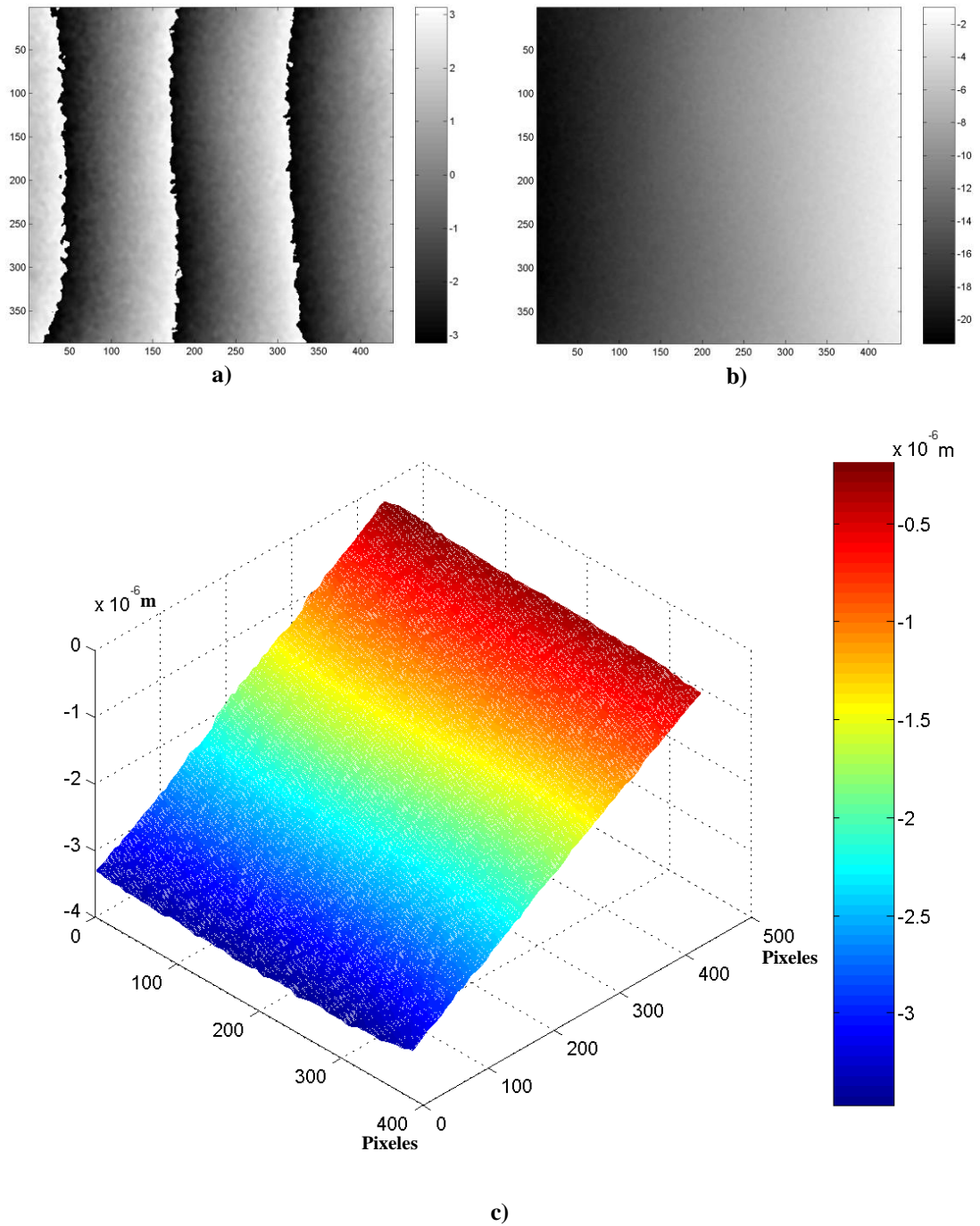


Figura 5.4 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos solo *en el plano*; la muestra de hule látex fue sometida a una fuerza de tensión de 3×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *en el plano* (eje x).

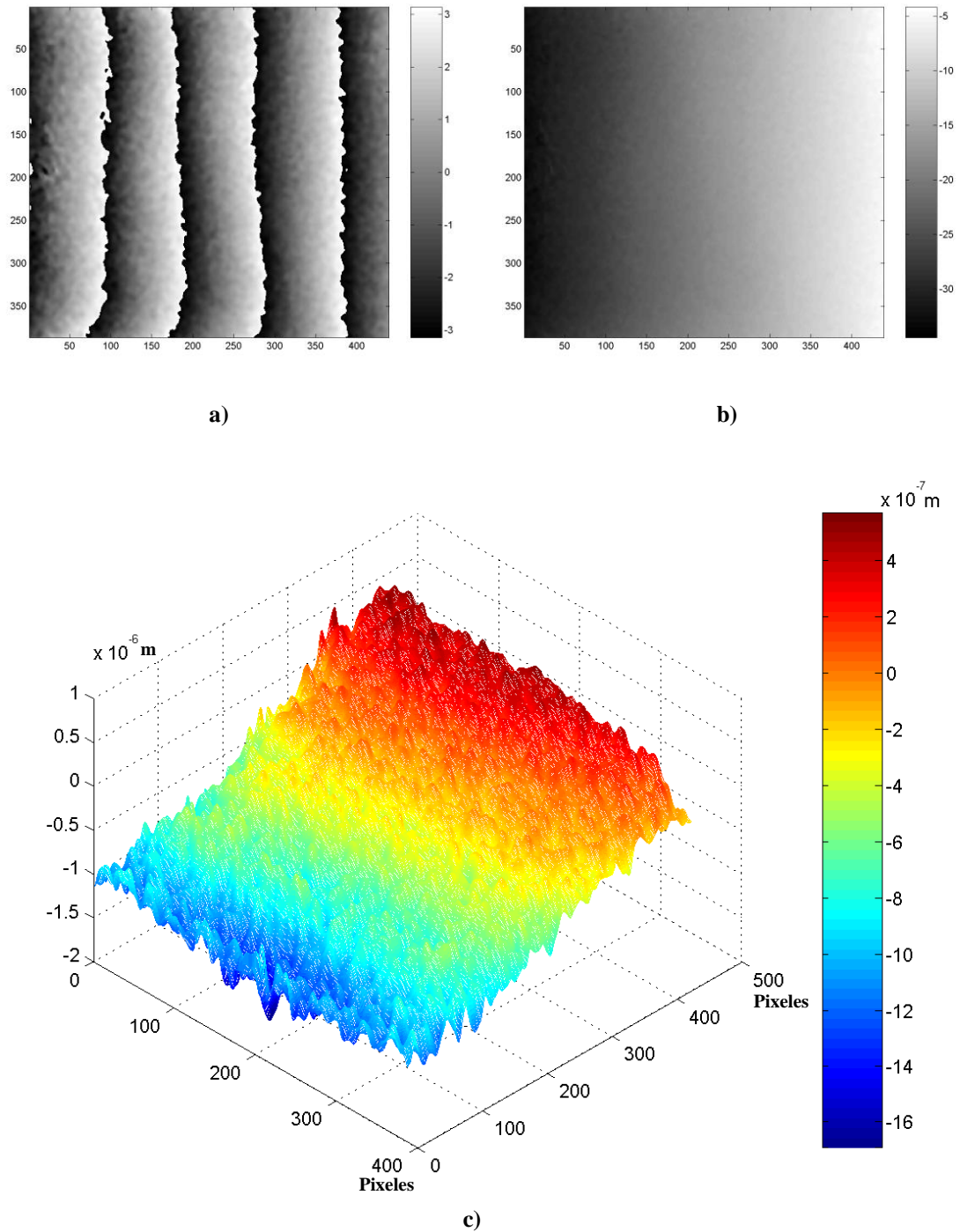


Figura 5.5 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos *en el plano* y *fuera del plano*; la muestra de hule látex fue sometida a una fuerza de tensión de 3×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *fuera del plano* (eje z).

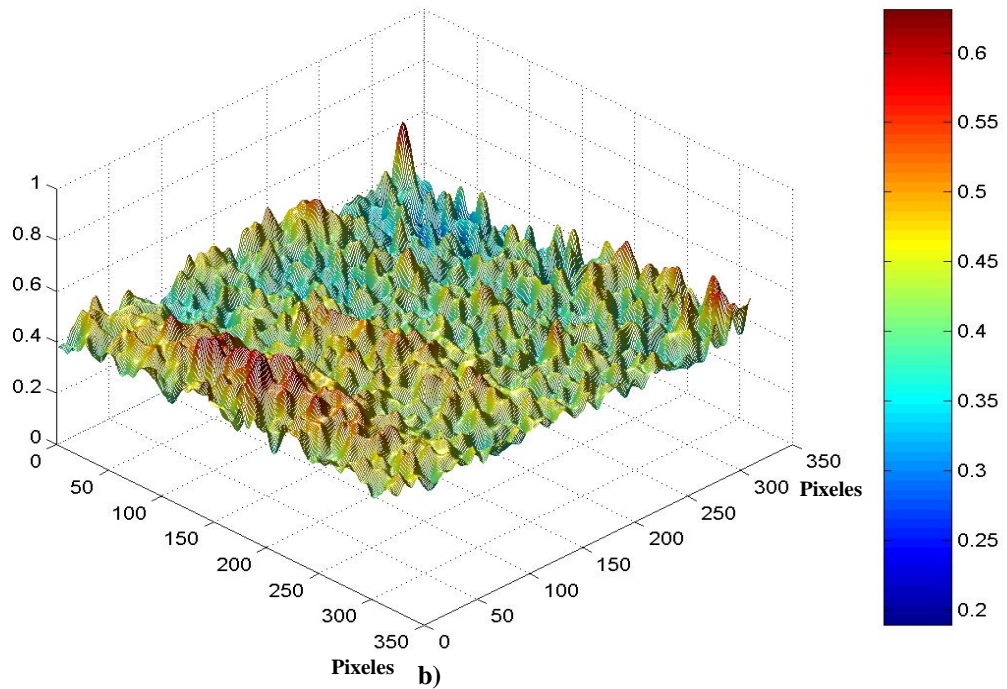
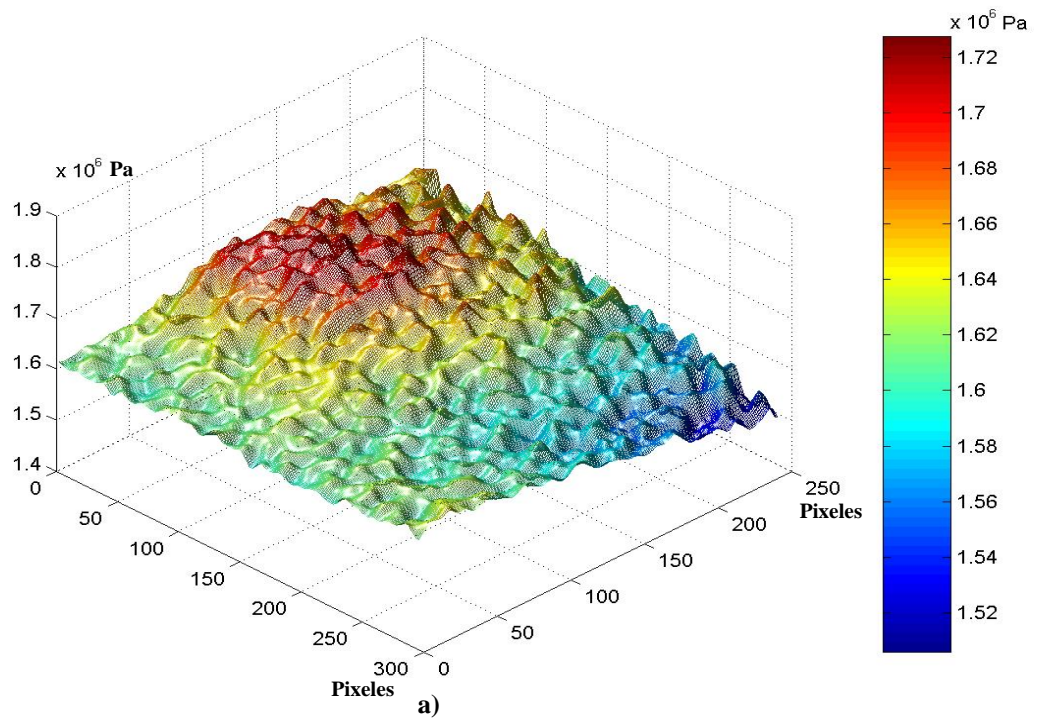


Figura 5.6 Datos experimentales obtenidos del módulo de Young y el coeficiente de Poisson respectivamente para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de $3 \times 10^{-3} \text{ N}$. a)Módulo de Young b) Coeficiente de Poisson.

Los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos iguales ($\theta = 18^\circ$) para un material elastómero que fue sometido a una tensión de aproximadamente 6×10^{-3} Newton son presentados en la figura 5.7, donde se muestran el mapa de fase de módulo 2π , el desdoblamiento realizado a la distribución de fase asociada con este mapa de fase y la representación tridimensional de la deformación *en el plano* con sus respectivos valores, componente que es obtenida a través de la ecuación 5.3.

Los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos desiguales ($\theta_1 = 45^\circ$ y $\theta_2 = 18^\circ$) para las mismas condiciones de carga y el mismo material elastómero, son presentados en la figura 5.8, donde se muestra el mapa de fase de módulo 2π , el cual tiene componentes tanto *en el plano* como *fuera del plano*, el desdoblamiento realizado a la distribución de fase asociada con este mapa de fase y la representación tridimensional de la deformación *fuera del plano* con sus respectivos valores; esta componente fue obtenida a través de la ecuación 5.4.

Bajo las condiciones de fuerza y dimensiones del material antes mencionadas se encontraron los valores de las siguientes propiedades mecánicas del material:

Módulo de Young: 1622031.6506 Pa.

Coefficiente de Poisson: 0.4231

Módulo de Rigidez: 570676.0550 Pa.

Los valores de las propiedades mecánicas a 22° C son mostrados en la tabla 5.7.

Valores	Módulo de Young (E) (Pa) A. Transv. Variable	Coefficiente de Poisson (ν) (m/m). Imagen cortada	Módulo de rigidez (G) (Pa)
Media	1622031.6506	0.4231	570676.0550
Máximo	1702944.7159	0.6628	647879.8006
Mínimo	1514727.4645	0.2597	470509.5460
Des. Estándar	27384.8622	0.0385	24097.1930

Tabla 5.7 Valores medios del módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 6×10^{-3} N, cada valor con su respectivo máximo, mínimo y desviación estándar.

En la figura 5.9a y 5.9b se muestran las representaciones gráficas del módulo de Young y el coeficiente de Poisson, respectivamente, del material de hule látex con dimensiones de 30.00 mm de ancho x 25.00 mm de longitud y con área transversal variable a medida que se le aplica la carga.

Como en el caso anterior, si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del módulo de Young con área transversal constante y el módulo de Young con área transversal variable, tabla 5.8, se nota un aumento en la precisión del 0.016% al considerar el área transversal variable.

Valores	Módulo de Young (Pa) A. Transv. Cte.	Módulo de Young (Pa) A. Transv. Variable	Coefficiente de Poisson (m/m). Imag. Sin cortar	Coefficiente de Poisson (m/m). Imagen cortada
Media	1617601.5790	1622031.6506	0.4784	0.4231
Máximo	1699236.9894	1702944.7159	1.6260	0.6628
Mínimo	1511302.8282	1514727.4645	0.2597	0.2597
Des. Estándar	27563.4578	27384.8622	0.1424	0.0385

Tabla 5.8 Valores medios del módulo de Young tomando el área transversal constante y área transversal variable, coeficiente de Poisson teniendo en cuenta los extremos de sujeción y sin tenerlos en cuenta. La muestra de hule látex fue sometida a una tensión de 6×10^{-3} N.

Ahora, si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del coeficiente de Poisson (imagen sin cortar e imagen cortada), se nota un aumento en la precisión del 20.8% (de ~29.8% a ~9%) al realizar el análisis de las propiedades mecánicas sin tener en cuenta los extremos de sujeción.

La barra de colores de la figura 5.7c representa el valor de la componente *en el plano* del desplazamiento, valor que esta comprendido entre $-6.86 \mu m$ y $-0.49 \mu m$ y la barra de colores de la figura 5.8c representa el valor de la componente *fuera del plano* del desplazamiento, valor que esta comprendido entre $-3.54 \mu m$ y $-0.43 \mu m$.

La componente en el plano de la deformación absoluta obtenida a partir de la técnica de conteo de franjas, para la muestra de hule látex sometida a una fuerza de 6×10^{-3} N, tiene un valor de $6.40 \mu m$.

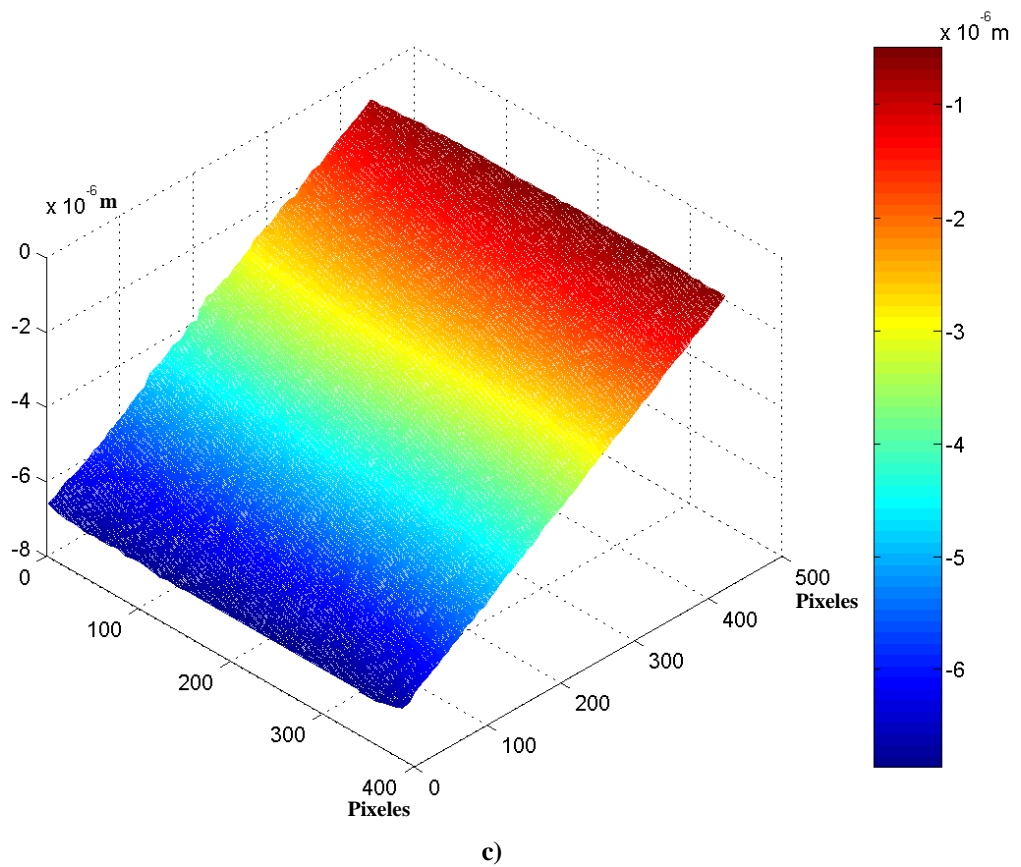
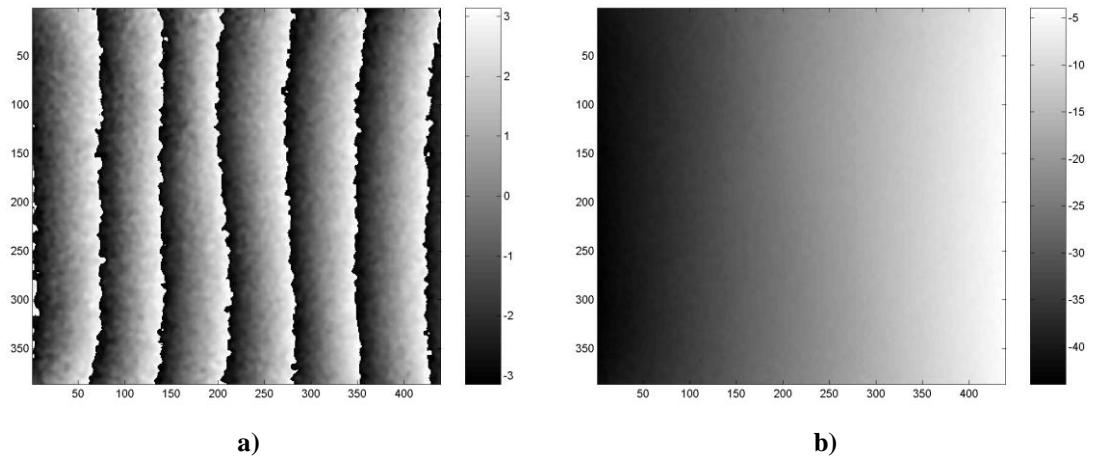


Figura 5.7 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos solo *en el plano*; la muestra de hule látex fue sometida a una fuerza de tensión de 6×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes en el eje x .

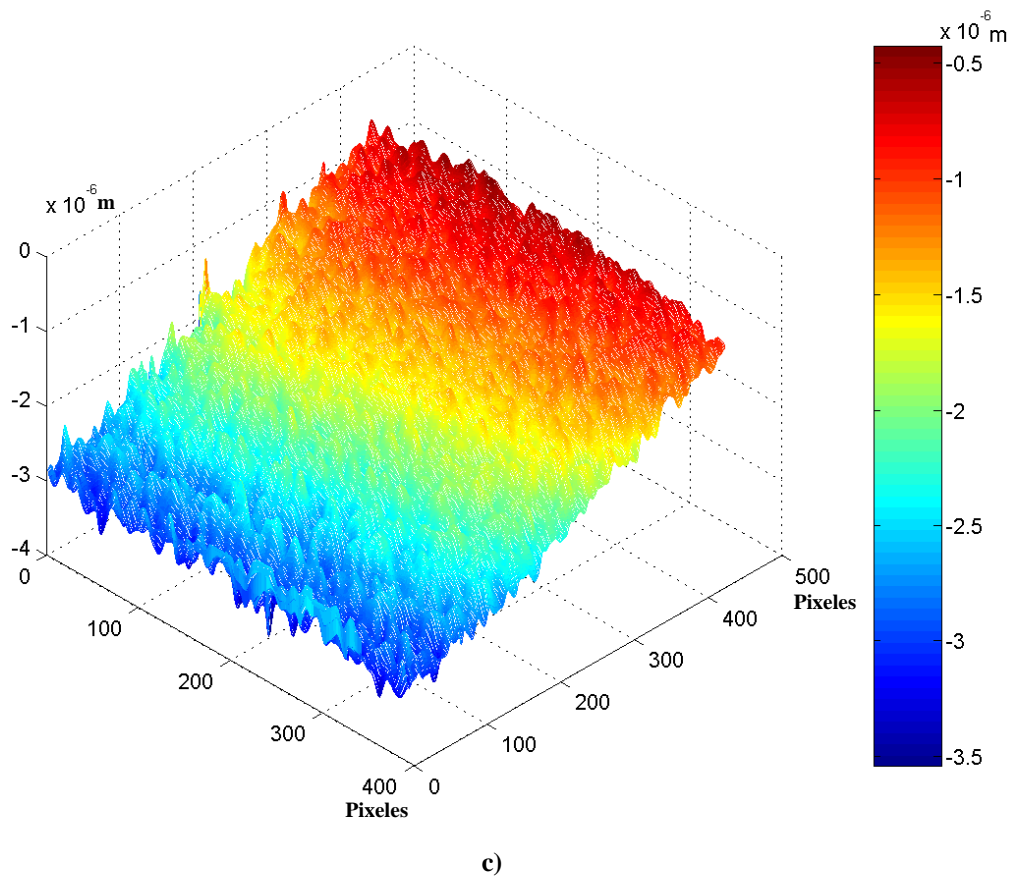
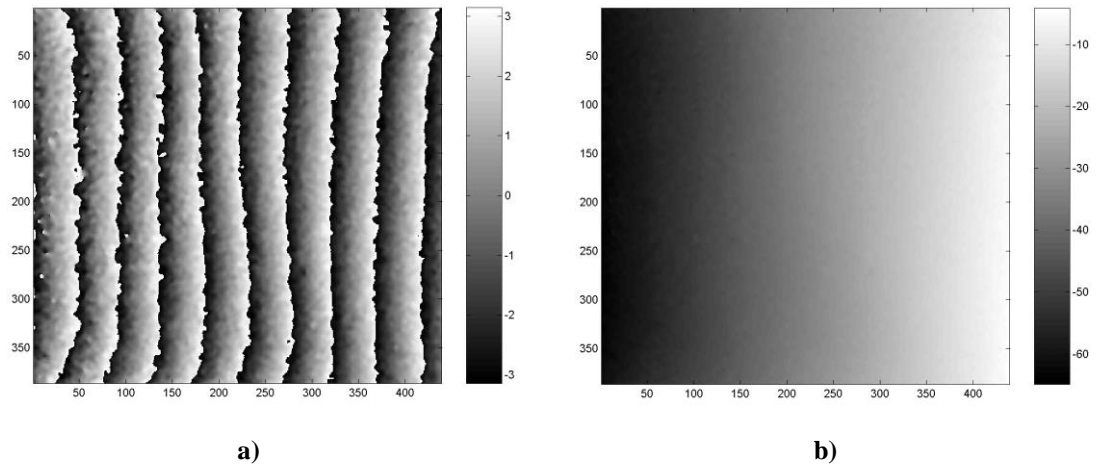


Figura 5.8 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos *en el plano* y *fuera del plano*; la muestra de hule látex fue sometida a una fuerza de tensión de 6×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *fuera del plano* (eje z).

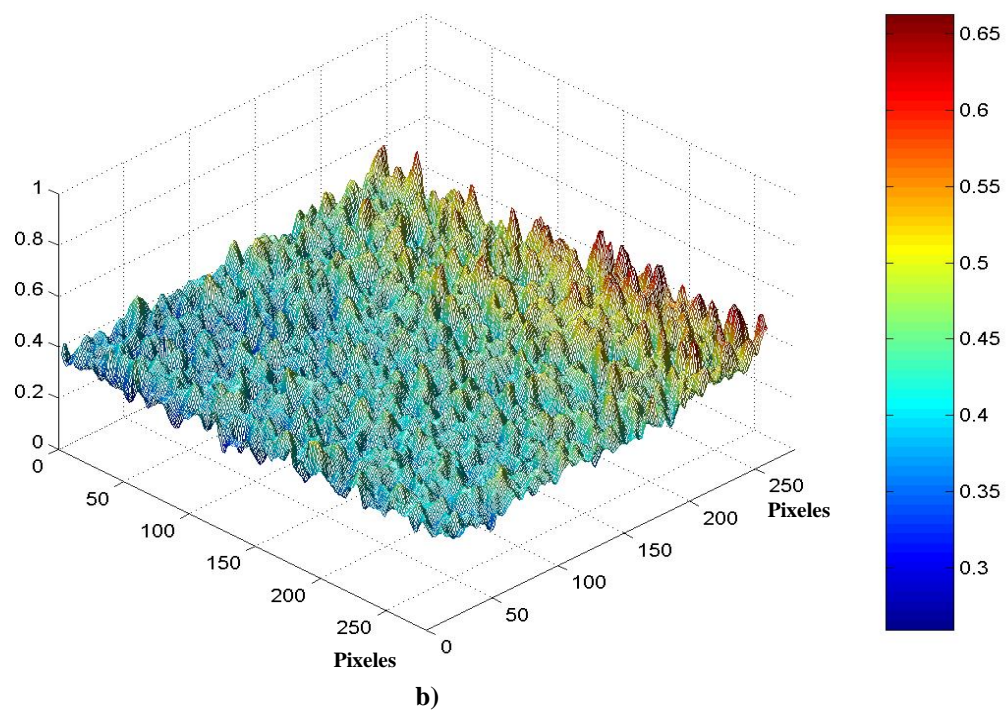
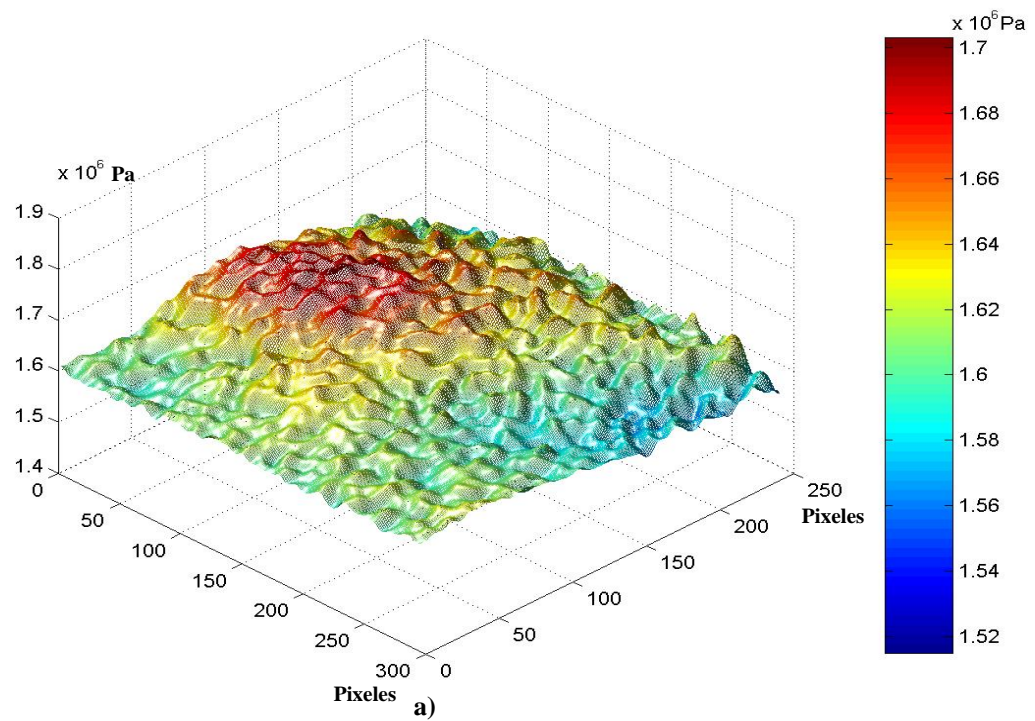


Figura 5.9 Datos experimentales obtenidos del módulo de Young y el coeficiente de Poisson respectivamente para una muestra de hule látex sometida a una tensión de $6 \times 10^{-3} \text{ N}$. a) Módulo de Young b) Coeficiente de Poisson.

Los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos iguales ($\theta = 18^\circ$) para un material elastómero que fue sometido a una tensión de aproximadamente 9×10^{-3} Newton son presentados en la figura 5.10, aquí se muestran el mapa de fase envuelto de módulo 2π , el desdoblamiento realizado a la distribución de fase asociada con este mapa de fase y la representación tridimensional de la deformación *en el plano* con sus respectivos valores, componente que es obtenida a través de la ecuación 5.3.

Ahora, los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos desiguales ($\theta_1 = 45^\circ$ y $\theta_2 = 18^\circ$) para las mismas condiciones de carga y el mismo material elastómero, son presentados en la figura 5.11, aquí se muestra el mapa de fase de módulo 2π , el desdoblamiento realizado a la distribución de fase asociada con este mapa de fase y la representación tridimensional de la deformación *fuera del plano* con sus respectivos valores, esta componente fue obtenida a través de la ecuación 5.4.

Bajo las condiciones de fuerza y dimensiones del material antes mencionadas se encontraron los valores de las siguientes propiedades mecánicas del material:

Módulo de Young: 1685904.5266 Pa.

Coefficiente de Poisson: 0.4169

Módulo de Rigidez: 596017.1291 Pa.

por lo tanto los valores de las propiedades mecánicas, a temperatura ambiente, se presentan en la tabla 5.9.

Valores	Módulo de Young (E) (Pa) A. Transv. Variable	Coefficiente de Poisson (ν) (m/m). Imagen cortada	Módulo de rigidez (G) (Pa)
Media	1685904.5266	0.4169	596017.1291
Máximo	1862227.7111	0.6972	861772.5146
Mínimo	1575834.4108	0.1805	478285.2167
Des. Estándar	52888.8057	0.0393	33885.0483

Tabla 5.9 Valores medios del módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para una muestra de hule látex sometida a una tensión de 9×10^{-3} N, cada valor con su respectivo máximo, mínimo y desviación estándar.

En la figura 5.12a y 5.12b se muestran las representaciones gráficas del módulo de Young y el coeficiente de Poisson, respectivamente, se muestra la representación gráfica del módulo de Young del material hule látex con dimensiones de 30.00 mm de ancho x 25.00 mm de longitud y con área transversal variable a medida que se le aplica la carga.

Como en el caso anterior, si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del módulo de Young con área transversal constante y el módulo de Young con área transversal variable, tabla 5.10, se nota un aumento del 0.093% en la precisión de la medida al considerar el área transversal variable.

Valores	Módulo de Young (Pa) A. Transv. Cte.	Módulo de Young (Pa) A. Transv. Variable	Coefficiente de Poisson (m/m). Imag. Sin cortar	Coefficiente de Poisson (m/m). Imagen cortada
Media	1680617.4568	1685904.5266	0.4033	0.4169
Máximo	1861336.1963	1862227.7111	1.7040	0.6972
Mínimo	1566501.8405	1575834.4108	-2.6200	0.1805
Des. Estándar	54281.3703	52888.8057	0.1453	0.0393

Tabla 5.10 Valores medios del módulo de Young tomando el área transversal constante y área transversal variable, coeficiente de Poisson teniendo en cuenta los extremos de sujeción y sin tenerlos en cuenta. La muestra de hule látex fue sometida a una tensión de 9×10^{-3} N.

Ahora, si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del coeficiente de Poisson (imagen sin cortar e imagen cortada), se nota un aumento del 26.6% en la precisión de la medida (de ~36% a ~9.4%) al realizar el análisis de las propiedades mecánicas sin tener en cuenta los extremos sujetos a las mordazas.

La barra de colores de la figura 5.10c representa el valor de la componente *en el plano* del desplazamiento, valor que está comprendido entre $-9.65 \mu m$ y $-0.28 \mu m$ y la barra de colores de la figura 5.11c representa el valor de la componente *fuera del plano* del desplazamiento, valor que está comprendido entre $-7.14 \mu m$ y $0.89 \mu m$.

La componente en el plano de la deformación absoluta obtenida a partir de la técnica de conteo de franjas para la muestra de hule látex sometida a una fuerza de 9×10^{-3} N tiene un valor de $9.38 \mu m$.

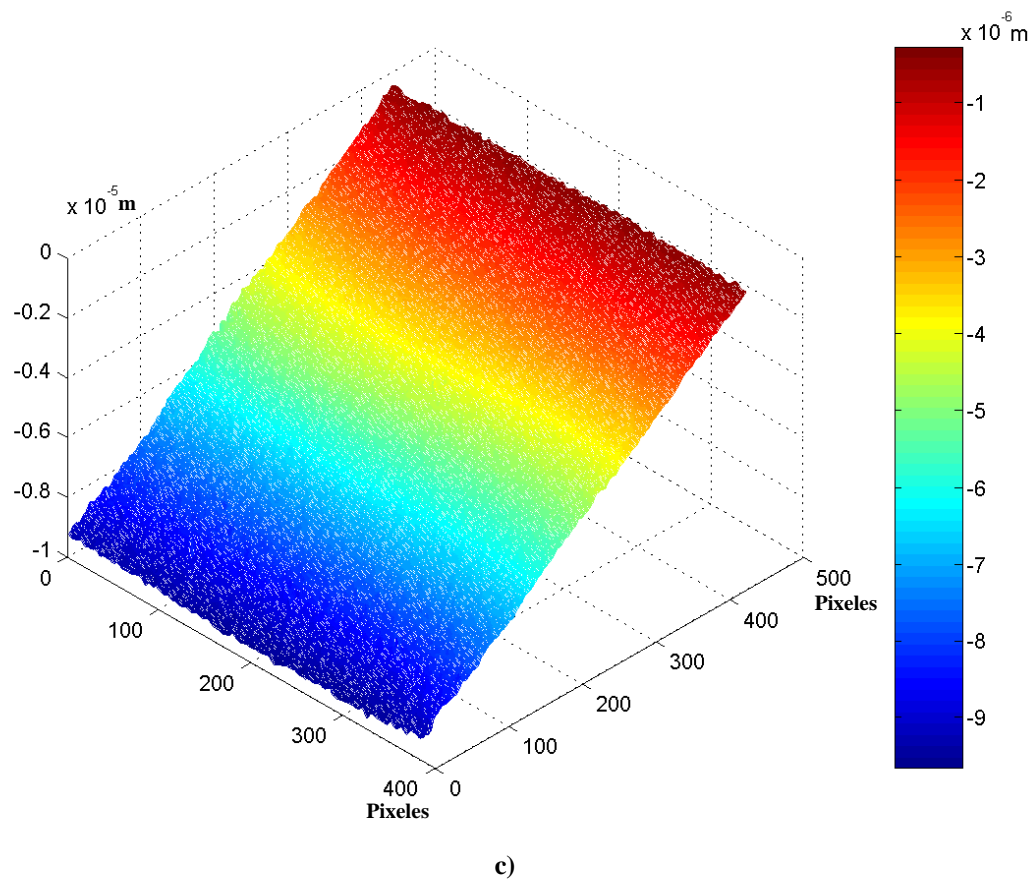
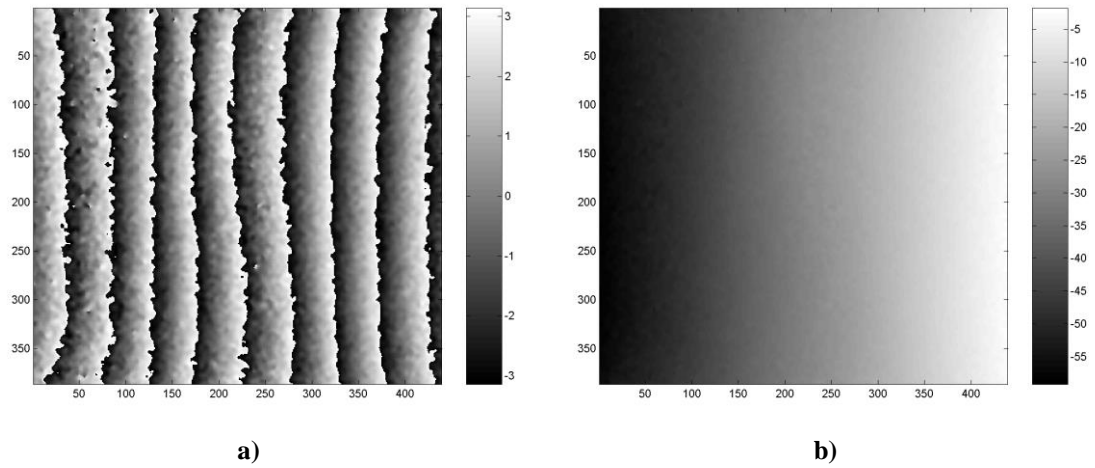


Figura 5.10 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos solo *en el plano*; la muestra de hule látex fue sometida a una fuerza de tensión de 9×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes en el eje x .

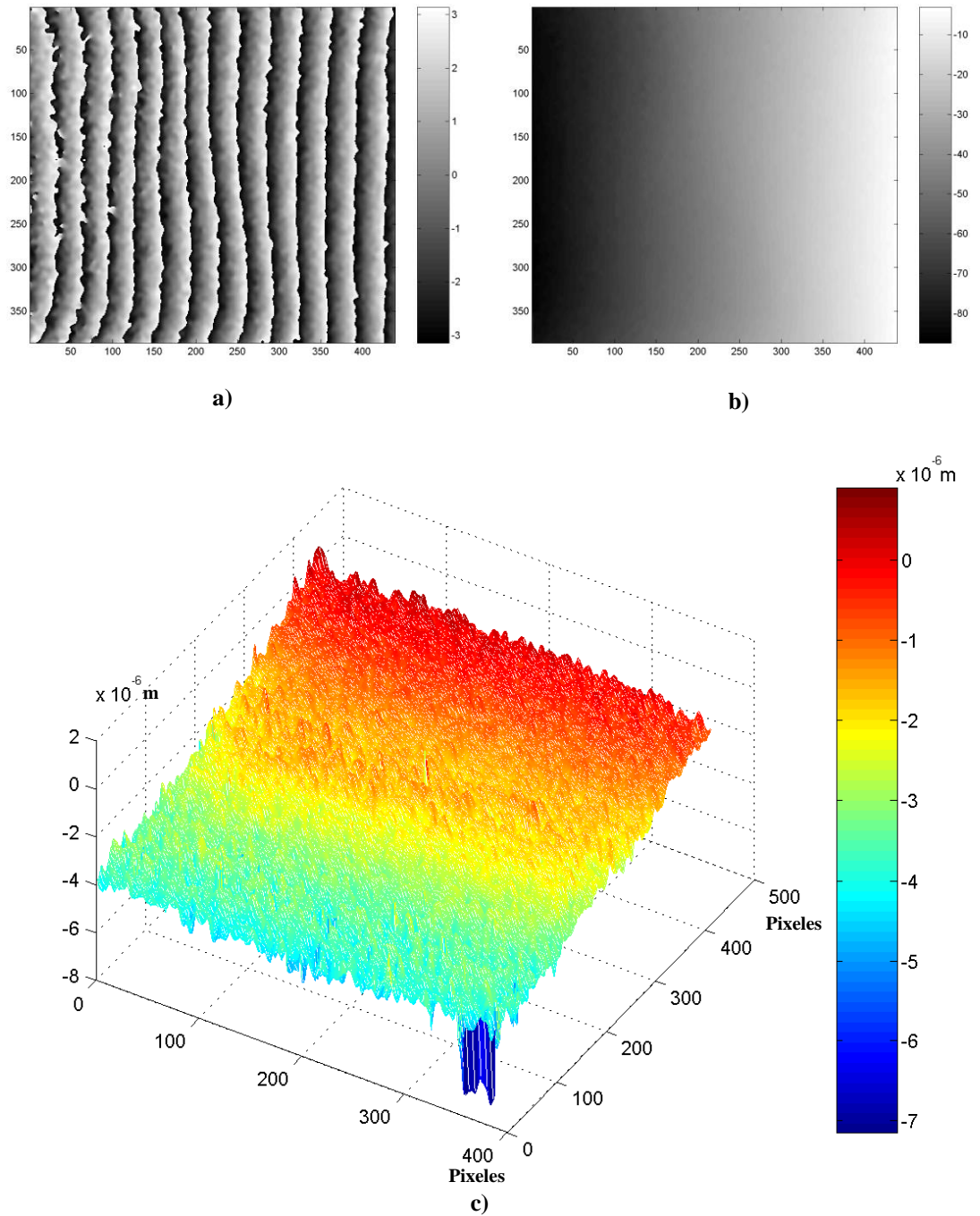
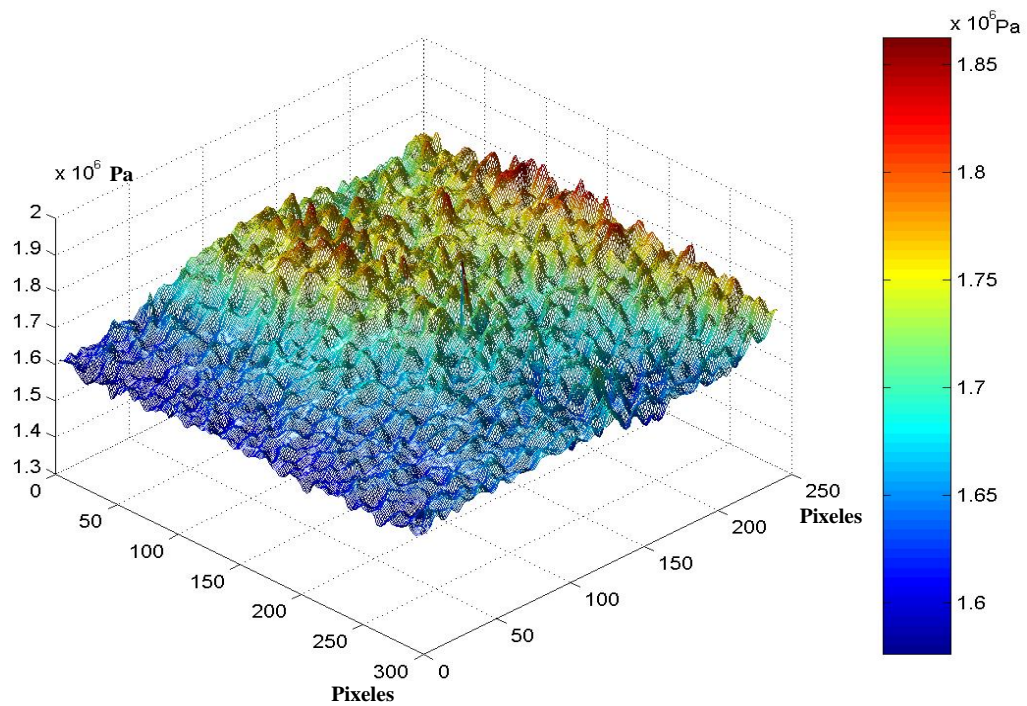
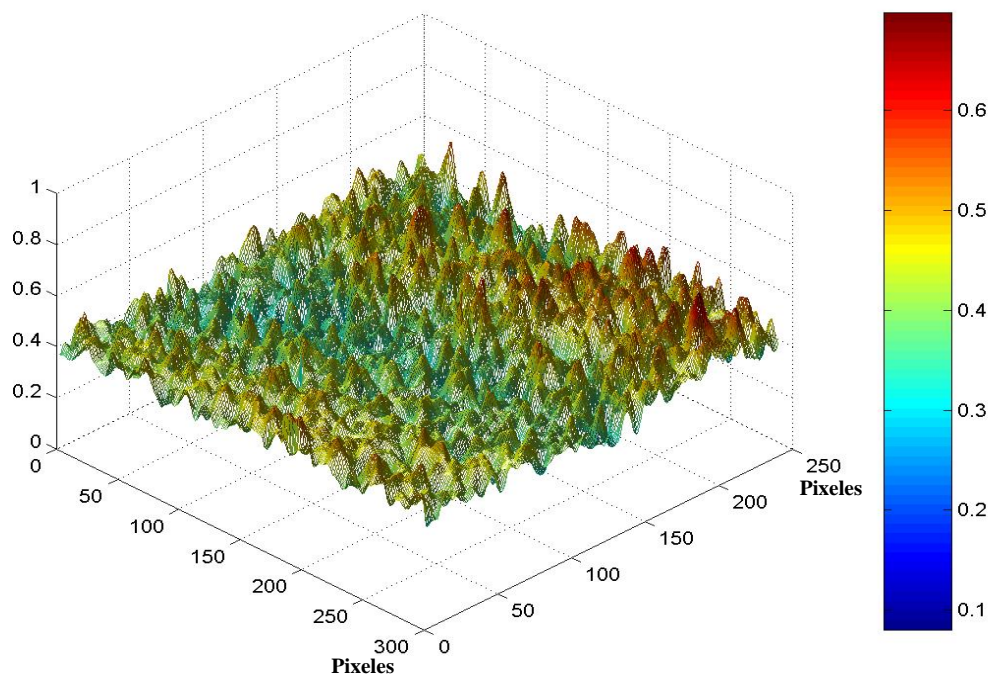


Figura 5.11 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos *en el plano* y *fuera del plano*; la muestra de hule látex fue sometida a una fuerza de tensión de 9×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *fuera del plano* (eje z).



a)



b)

Figura 5.12 Datos experimentales obtenidos del módulo de Young y el coeficiente de Poisson respectivamente para una muestra de hule látex sometida a tensión de $9 \times 10^{-3} \text{ N}$. a) Módulo de Young. b) Coeficiente de Poisson.

A la muestra de hule látex se le realizaron tres ensayos de tracción consecutivos para poder obtener un promedio de los resultados y así reducir errores. Los resultados obtenidos de los tres ensayos de tracción son mostrados en las tablas 5.11 a 5.16 y representados en la figura 5.13. Cabe mencionar que los resultados representados en las figuras anteriores son del ensayo de tracción # 3, se escogieron estos valores porque la desviación estándar de este ensayo es menor a la de los otros dos, además el valor del módulo de Young obtenido a partir de la Ecuación 5.1 (método de mínimos cuadrados) para este ensayo es muy próximo a el módulo de Young de los tres experimentos, tabla 5.17.

ENSAYO DE TRACCIÓN # 1		
Esfuerzo (N/m²)	Deformación unitaria (m/m)	Módulo de Young (Pa). Área trasversal variable
0.0000	0.0000000	-
116.3955	0.0000746	1561237.9248
232.7949	0.0001443	1613511.6774
349.1944	0.0002085	1674647.6530
Pendiente		1672440.2148
Desviación estándar		56762.5451

Tabla 5.11 Datos experimentales del esfuerzo, deformación y módulo de Young para el ensayo de tracción #1.

ENSAYO DE TRACCIÓN #1		
Fuerza aplicada (N)	Coefficiente de Poisson (ν) (m/m). Imagen cortada	Módulo de rigidez (G) (Pa)
3×10^{-3}	0.4152	551596.2142
6×10^{-3}	0.4025	575226.9795
9×10^{-3}	0.4060	595536.1497
Media	0.4079	574119.7811
Desviación estándar	0.0066	21990.8822

Tabla 5.12 Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #1. Valores obtenidos para el módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para cada una de las tres fuerzas aplicadas a una muestra de hule látex de dimensiones 0.63 mm de espesor, 39.80mm de ancho y 50.00 mm de longitud.

ENSAYO DE TRACCIÓN # 2		
Esfuerzo (N/m²)	Deformación unitaria (m/m)	Módulo de Young (Pa). Área transversal variable
0.0000	0.0000000	-
116.3955	0.0000726	1602349.8157
232.7949	0.0001424	1634938.9386
349.1944	0.0002050	1703028.7944
Pendiente		1697860.1871
Desviación estándar		51372.0679

Tabla 5.13 Datos experimentales del esfuerzo, deformación y módulo de Young para el ensayo de tracción #2.

ENSAYO DE TRACCIÓN #2		
Fuerza Aplicada (N)	Coefficiente de Poisson (ν) (m/m). Imagen cortada	Módulo de rigidez (G) (Pa)
3×10^{-3}	0.3982	573004.5114
6×10^{-3}	0.4097	579888.9617
9×10^{-3}	0.4005	608007.4239
Media	0.4028	586966.9657
Desviación Estándar	0.0061	18543.8555

Tabla 5.14 Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #2. Valores obtenidos para el módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para cada una de las tres fuerzas aplicadas a una muestra de hule látex de dimensiones 0.63 mm de espesor, 39.80 mm de ancho y 50.00 mm de longitud.

ENSAYO DE TRACCIÓN # 3		
Esfuerzo (N/m ²)	Deformación unitaria (m/m)	Módulo de Young (Pa). Área transversal variable
0.0000	0.0000000	-
116.3955	0.0000716	1626717.1468
232.7949	0.0001435	1622031.6506
349.1944	0.0002071	1685904.5266
Pendiente		1677768.1848
Desviación estándar		35601.6013

Tabla 5.15 Datos experimentales del esfuerzo, deformación y módulo de Young para el ensayo de tracción #3.

ENSAYO DE TRACCIÓN #3		
Fuerza aplicada (N)	Coefficiente de Poisson (ν) (m/m). Imagen cortada	Módulo de rigidez (G) (Pa)
3×10^{-3}	0.4221	574048.1468
6×10^{-3}	0.4231	570676.0550
9×10^{-3}	0.4169	596017.1291
Media	0.4207	580247.1103
Desviación Estándar	0.0033	13760.9182

Tabla 5.16 Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #3. Valores obtenidos para el módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para cada una de las tres fuerzas aplicadas a una muestra de hule látex de dimensiones 0.63 mm de espesor, 39.80 mm de ancho y 50.00 mm de longitud.

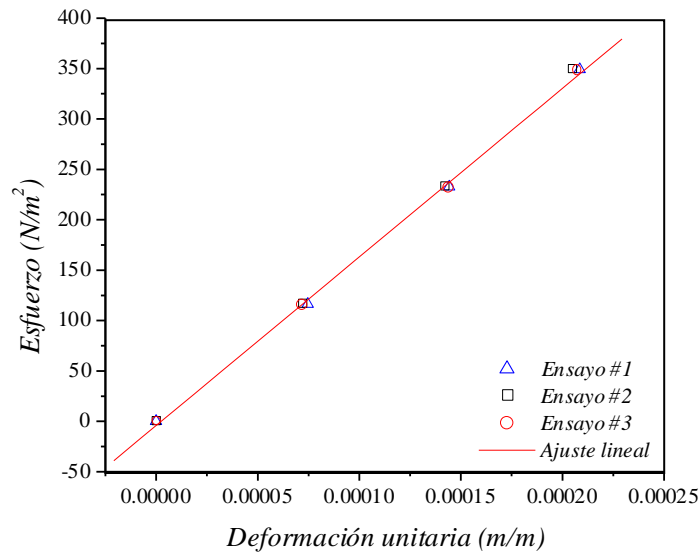


Figura 5.13 Diagrama esfuerzo-deformación para una muestra de hule látex de dimensiones 0.63 mm de espesor, 39.80 mm de ancho y 50.00 mm de longitud.

Ensayo de tracción	Módulo de Young (E) (Pa). A. Transv. Variable	Coefficiente de Poisson (ν) (m/m). Imagen cortada	Módulo de rigidez (G) (Pa)
1	1672440.2148	0.4079	574119.7811
2	1697860.1871	0.4028	586966.9657
3	1677768.1848	0.4207	580247.1103
Media	1682689.5289	0.4105	580444.6190
Desviación estándar	13405.5387	0.0092	6425.8692

Tabla 5.17 Valor del módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de rigidez para una muestra de hule látex de dimensiones 0.63 mm de espesor, 39.80 mm de ancho y 50.00 mm de longitud.

Según los resultados obtenidos para una muestra de hule látex de dimensiones 0.63 mm de espesor, 39.80 mm de ancho, 50.00 mm de longitud y a una temperatura ambiente de 22° C tenemos que el valor del módulo de Young es igual a **1682689.5289 ± 13405.5387 Pa (0.8% de precisión)**, el valor del coeficiente de Poisson es igual a **0.4105 ± 0.0092 (2 % de precisión)** y el módulo de rigidez es igual a **580444.6190 ± 6425.8692 Pa (1 % de precisión)**.

5.2.2 Muestra #2 hule látex natural (0.29 mm de espesor) Los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos iguales ($\theta = 18^\circ$) para una muestra de hule látex natural de dimensiones 34.50 mm de ancho x 38.60 mm de longitud x 0.29 mm de espesor y área transversal considerada como constante, que fue sometido a una tensión de aproximadamente 1×10^{-3} Newton son presentados en la figura 5.14, aquí se muestran el mapa de fase envuelto de módulo 2π , el desdoblamiento realizado a la distribución de fase asociada con este mapa de fase y la representación tridimensional de la deformación *en el plano* con sus respectivos valores.

El módulo de Young del hule látex bajo las condiciones de fuerza y dimensiones antes mencionadas es:

Valores	Módulo de Young (E) (Pa). Imagen cortada
Media	837462.9453
Máximo	958864.6113
Mínimo	698842.4342
Des. Estándar	44884.1932

Tabla 5.18 Valor medio del módulo de Young de una muestra de hule látex.

Nuevamente para realizar los análisis y evitar errores instrumentales sistemáticos y de método, no se tuvo en cuenta los extremos de la muestra los cuales estaban sujetos a las mordazas del sistema de tracción.

La figura 5.15 muestra la representación gráfica del módulo de Young de la muestra bajo las condiciones antes descritas.

Si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del módulo de Young obtenido para el hule látex (imagen sin cortar e imagen cortada), se nota un aumento del 8.3 % en la precisión de la medida (de ~13.6 % a ~5.3 %) al realizar el análisis del módulo de Young sin tener en cuenta los extremos de sujeción de la muestra.

Valores	Módulo de Young (Pa). Imagen sin cortar	Módulo de Young (Pa). Imagen cortada
Media	782329.1468	837462.9453
Máximo	1083333.8245	958864.6113
Mínimo	197172.9362	698842.4342
Des. Estándar	106816.4772	44884.1932

Tabla 5.19 Valores medios del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de 1×10^{-3} N, teniendo en cuenta y sin tener en cuenta los extremos de sujeción.

Por este tipo de errores introducidos en los extremos es que se considera solamente una parte considerable de la muestra sin tener en cuenta los extremos de sujeción de la muestra, en muchos casos se escoge únicamente la parte central del material bajo estudio para realizar la determinación de las propiedades elásticas, esto es posible ya que si se asume que el material es *isótropo* y *homogéneo*, las condiciones elásticas serán las mismas en todas las direcciones y a través de todo el material

La barra de colores de la figura 5.14c representa el valor de la componente *en el plano* del desplazamiento, valor que está comprendido entre $-3.97 \mu m$ y $-0.18 \mu m$.

De la misma manera que para la muestra #1, los resultados de las deformaciones *en el plano* obtenidas mediante la técnica de corrimiento de fase, bajo las condiciones de fuerza y dimensiones del material antes mencionadas, son corroborados con el resultado obtenido mediante la técnica de conteo de franjas.

La componente en el plano de la deformación absoluta obtenida a partir de la técnica de conteo de franjas para la muestra de hule látex sometida a una fuerza de 1×10^{-3} N tiene un valor de $3.84 \mu m$.

Para esta muestra de hule látex, redondeando los valores de cada pixel en las imágenes al número de cifras significativas del instrumento de medida, calibrador, cada pixel tiene un valor aproximado de $0.09 \text{ mm} \times 0.09 \text{ mm}$.

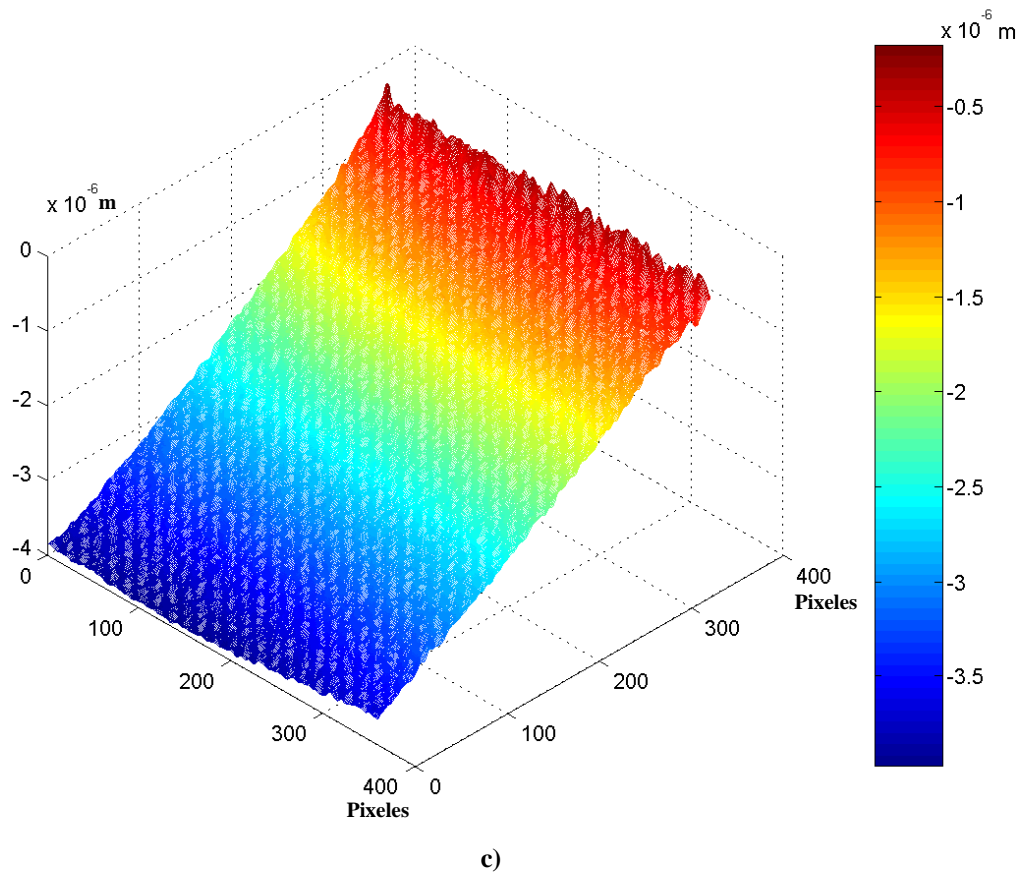
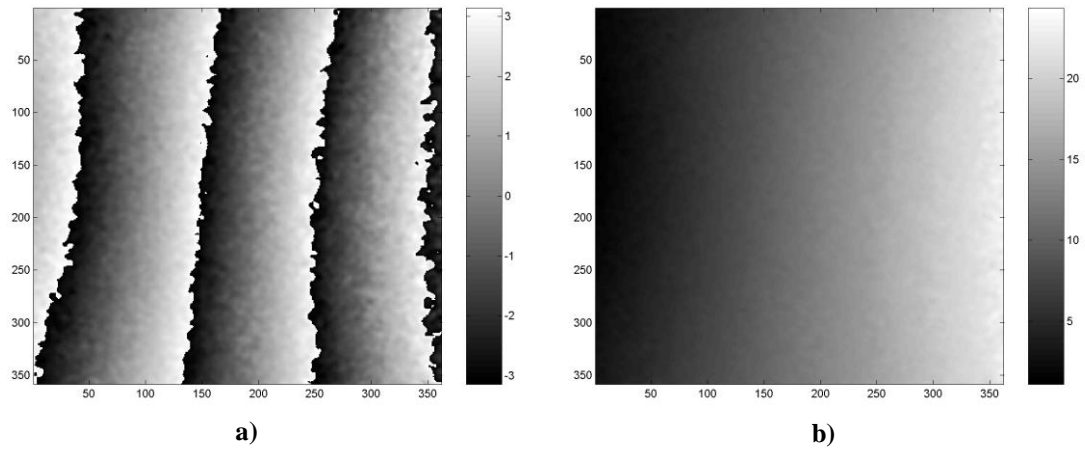


Figura 5.14 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos solo *en el plano*; la muestra hule látex que fue sometido a una fuerza de tensión de 1×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *en el plano* (eje x).

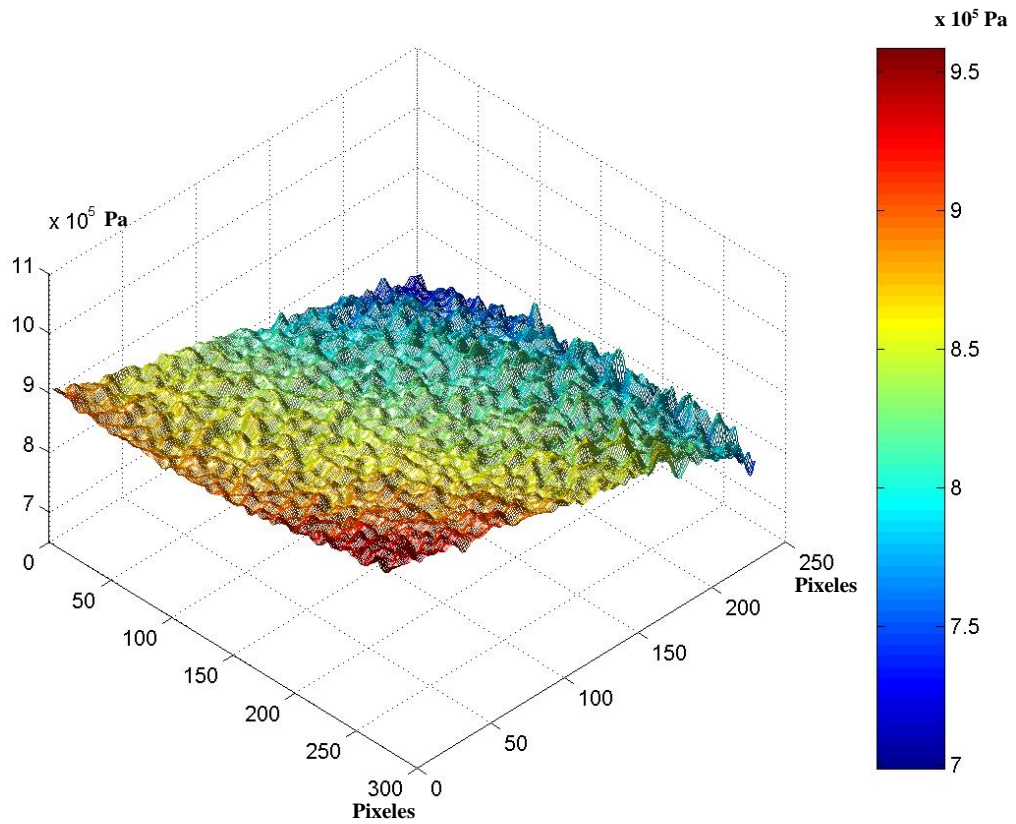


Figura 5.15 Datos experimentales obtenidos del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de 1×10^{-3} N.

Los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos iguales ($\theta = 18^\circ$) para la misma muestra de hule látex que fue sometida a una tensión de aproximadamente 2×10^{-3} Newton son presentados en la figura 5.16.

El módulo de Young de la muestra bajo las condiciones de fuerza mencionada es:

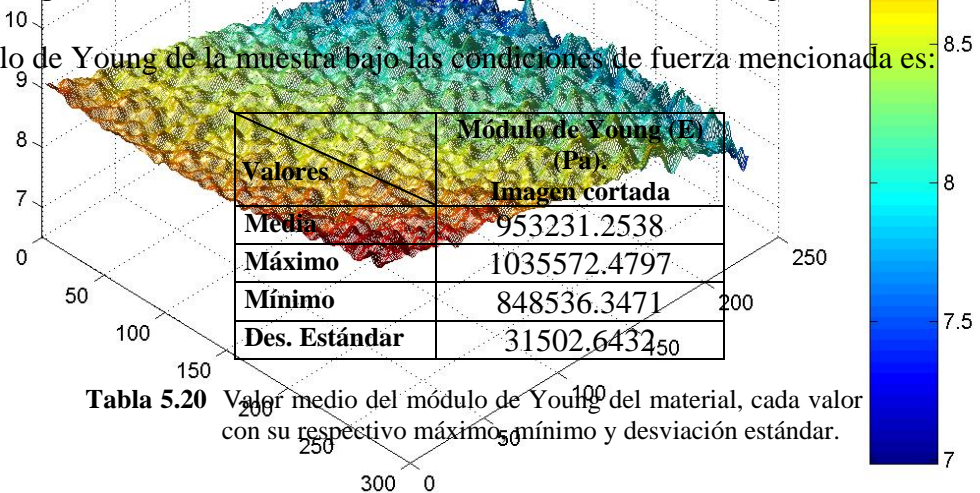


Tabla 5.20 Valor medio del módulo de Young del material, cada valor con su respectivo máximo, mínimo y desviación estándar.

Nuevamente para realizar los análisis no se tuvo en cuenta los extremos de la muestra sujetos a las mordazas del sistema de tracción, la figura 5.17 muestra la representación gráfica del módulo de Young del hule látex bajo las condiciones antes descritas

Si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del módulo de Young obtenido para el hule látex (imagen sin cortar e imagen cortada), se nota un aumento del 4.4% en la precisión de la medida (de ~7.7% a ~3.3%) al realizar el análisis del módulo de Young sin tener en cuenta los extremos de sujeción de la muestra.

La barra de colores de la figura 5.16c representa el valor de la componente *en el plano* del desplazamiento, valor que esta comprendido entre $-7.12 \mu m$ y $-0.15 \mu m$.

Valores	Módulo de Young (Pa). Imagen sin cortar	Módulo de Young (Pa). Imagen cortada
Media	950334.4767	953231.2538
Máximo	3135369.3276	1035572.4797
Mínimo	612386.8231	848536.3471
Des. Estándar	73318.7557	31502.6432

Tabla 5.21 Valores medios del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de 2×10^{-3} N, teniendo en cuenta y sin tener en cuenta los extremos de sujeción.

La componente en el plano de la deformación absoluta obtenida a partir de la técnica de conteo de franjas para la muestra de hule látex sometida a una fuerza de 2×10^{-3} N tiene un valor de $6.99 \mu m$.

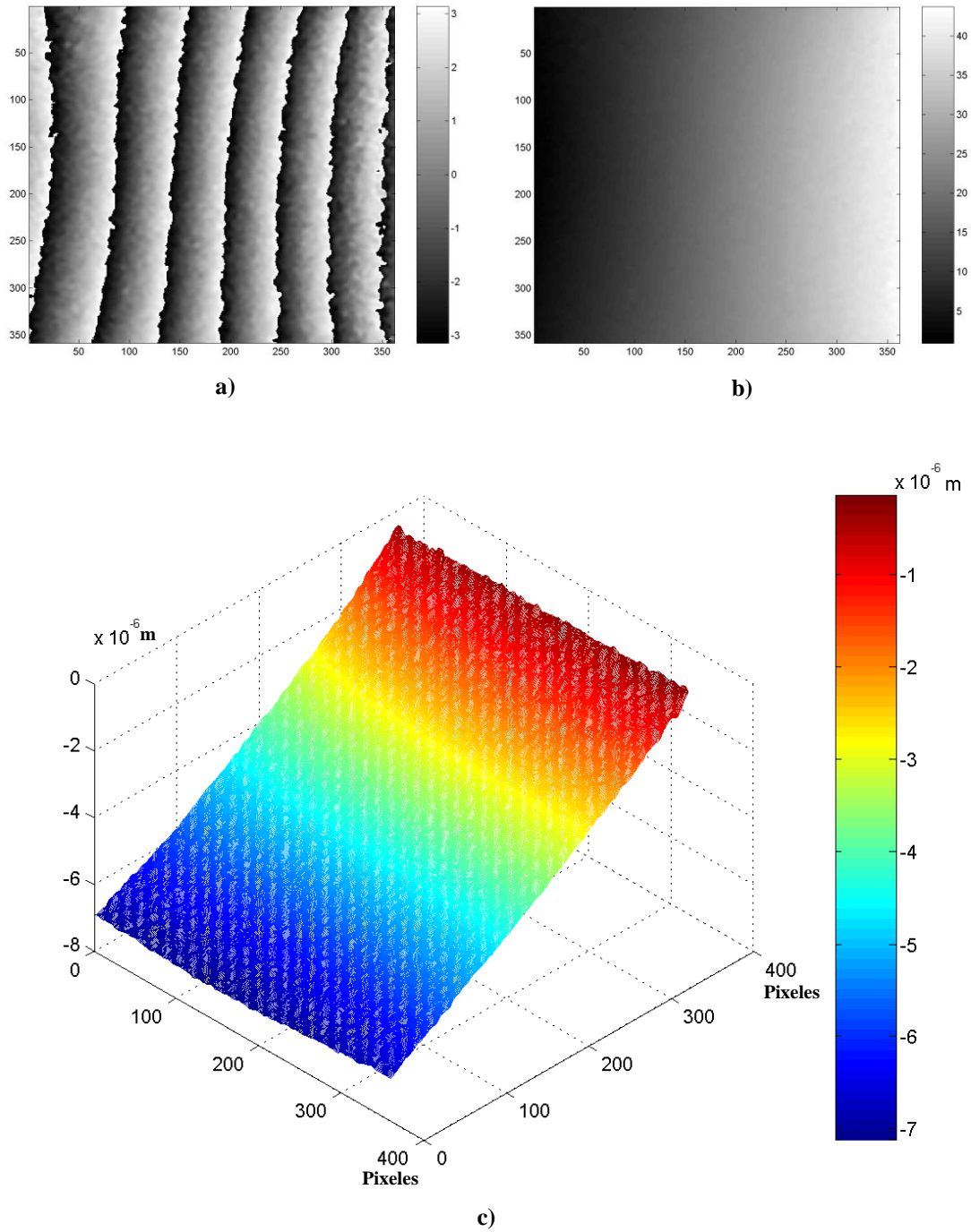


Figura 5.16 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos solo *en el plano*; la muestra de hule látex fue sometida a una fuerza de tensión de 2×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *en el plano* (eje x).

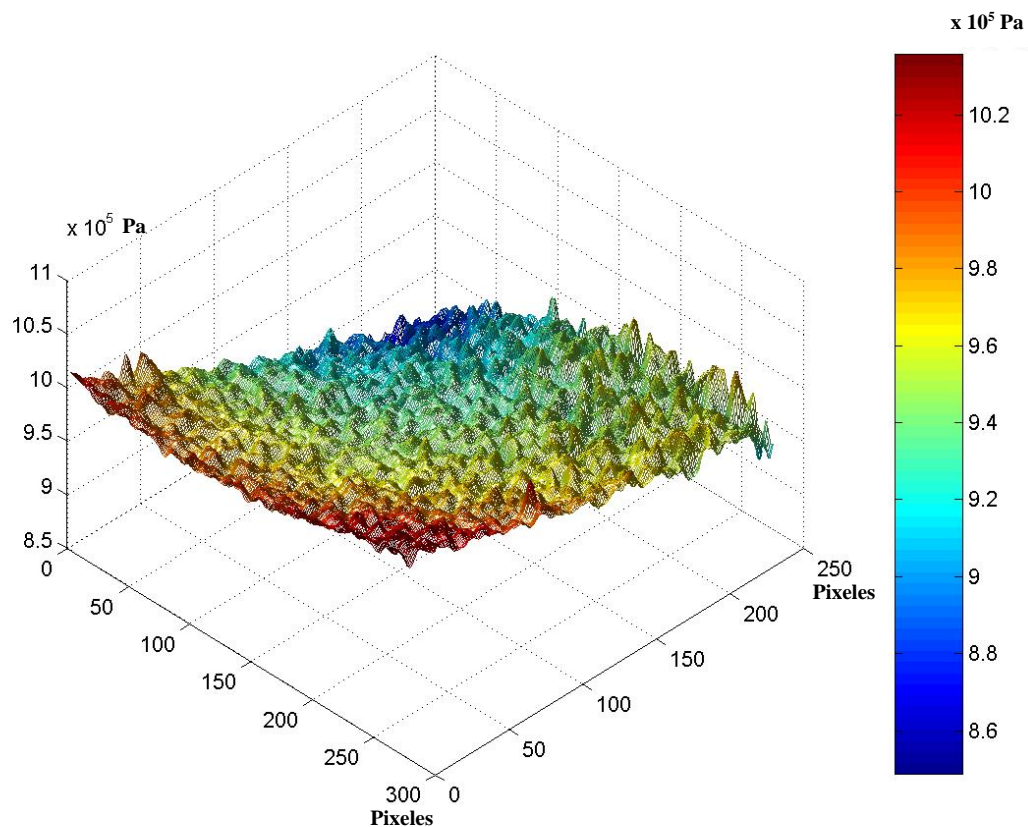


Figura 5.17 Datos experimentales obtenidos del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de 2×10^{-3} N.

Los resultados obtenidos con el interferómetro de iluminación dual en la configuración de ángulos iguales ($\theta = 18^\circ$) para la misma muestra de hule látex que fue sometido a una fuerza de tensión de 3×10^{-3} Newton son presentados en la figura 5.18.

El módulo de Young de la muestra bajo las condiciones de fuerza mencionada es:

Valores	Módulo de Young (E) (Pa). Imagen cortada
Media	925136.0930
Máximo	1035941.2975
Mínimo	789398.2466
Des. Estándar	42532.8430

Tabla 5.22 Valor medio del módulo de Young del material, cada valor con su respectivo máximo, mínimo y desviación estándar.

Nuevamente para realizar los análisis no se tuvo en cuenta los extremos de la muestra sujetos a las mordazas del sistema de tracción, la figura 5.19 muestra la representación gráfica del módulo de Young del hule látex bajo las condiciones antes descritas.

Si realizamos una comparación entre los cuatro valores, media, máximo, mínimo y desviación estándar, del módulo de Young obtenido para el hule látex (imagen sin cortar e imagen cortada), se nota un aumento del 5.6% en la precisión de la medida (de ~10.2% a ~4.6% de error) al realizar el análisis del módulo de Young sin tener en cuenta los extremos de sujeción de la muestra. El valor de la componente *en el plano* del desplazamiento, valor que está comprendido entre $-10.87 \mu m$ y $-0.73 \mu m$ (figura 5.18c).

Valores	Módulo de Young (Pa). Imagen sin cortar	Módulo de Young (Pa). Imagen cortada
Media	882718.0055	925136.0930
Máximo	1065768.1858	1035941.2975
Mínimo	439900.1280	789398.2466
Des. Estándar	90349.0956	42532.8430

Tabla 5.23 Valores medios del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de 3×10^{-3} N, teniendo en cuenta y sin tener en cuenta los extremos de sujeción.

La componente en el plano de la deformación absoluta obtenida a partir de la técnica de conteo de franjas para la muestra de hule látex sometida a una fuerza de 3×10^{-3} N tiene un valor de $10.36 \mu m$.

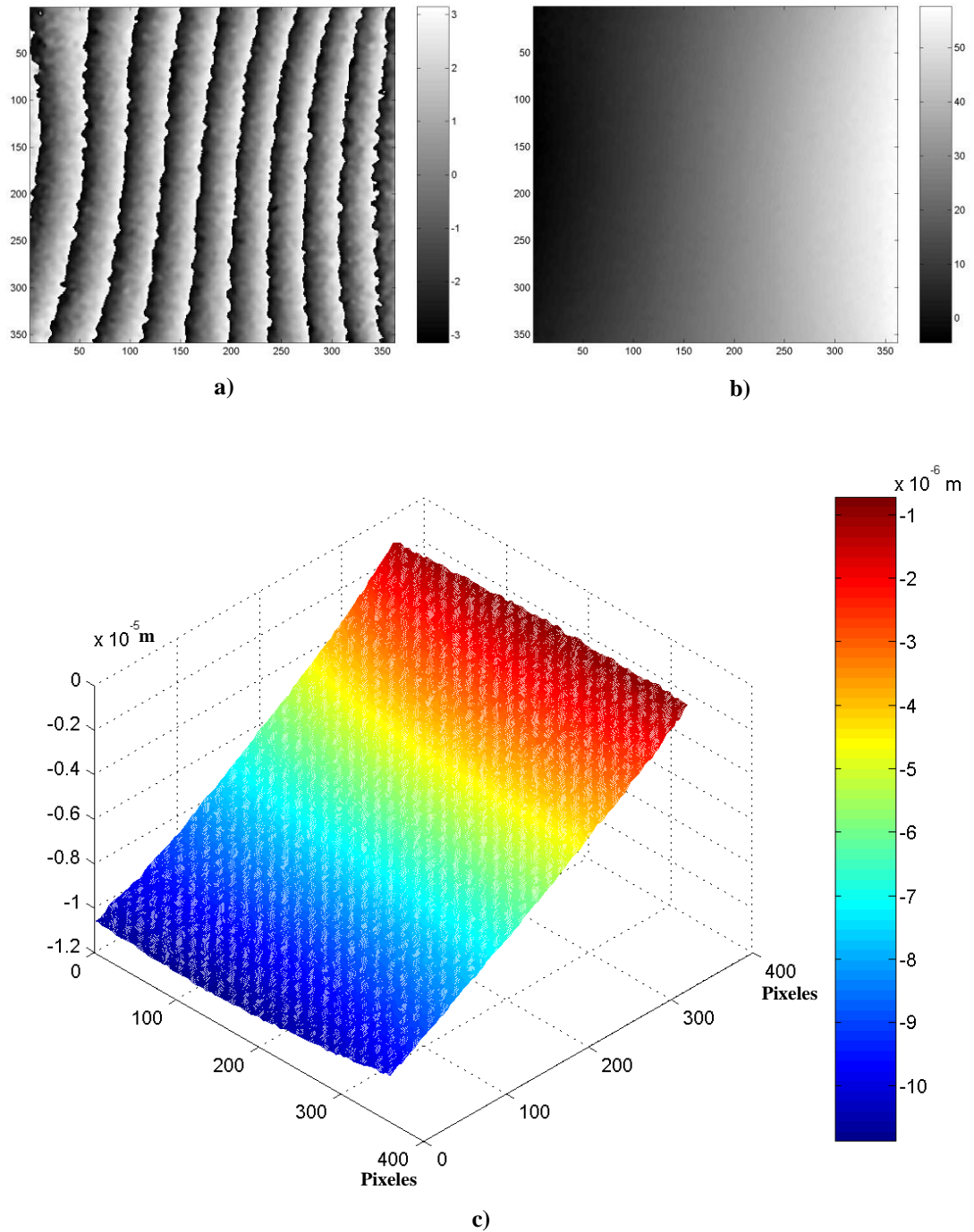


Figura 5.18 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos solo *en el plano*; la muestra de hule látex fue sometida a una fuerza de tensión de 3×10^{-3} N. a) Mapa de fase módulo 2π . Intervalo $(-\pi$ a $\pi)$. b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *en el plano* (eje x).

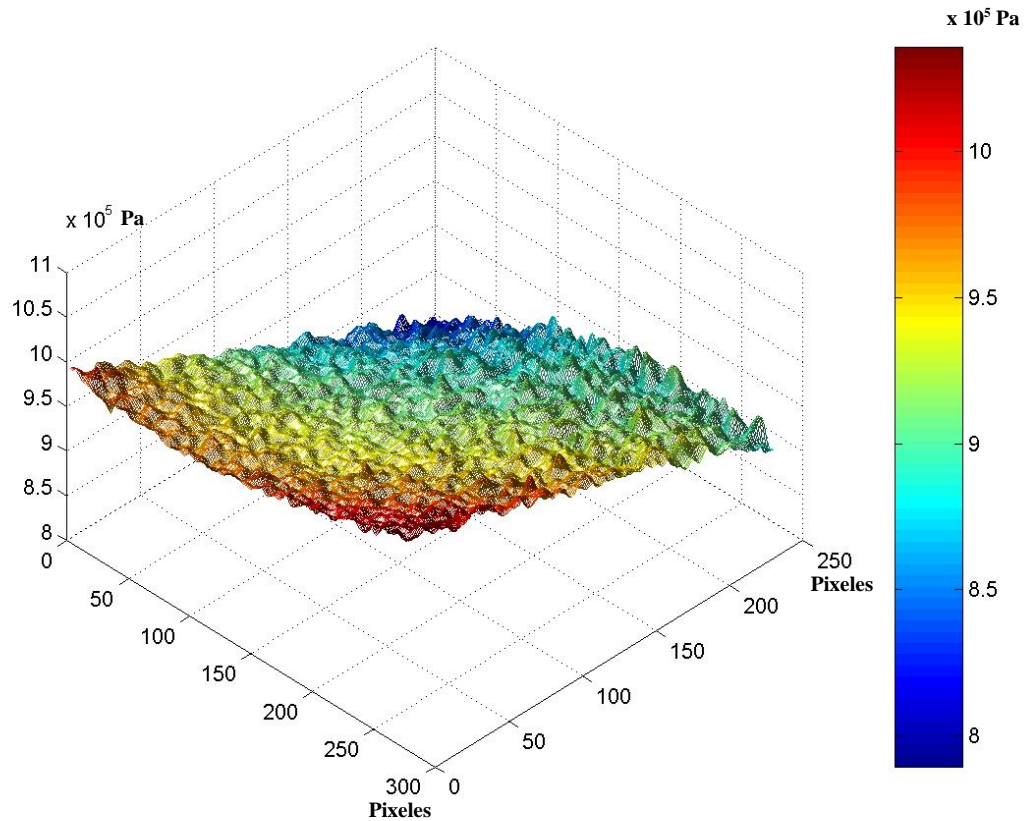


Figura 5.19 Datos experimentales obtenidos del módulo de Young para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de 3×10^{-3} N.

A la muestra de hule látex se le realizaron tres ensayos de tracción consecutivos para poder obtener un promedio de los resultados y así reducir errores. Los resultados obtenidos de los tres ensayos de tracción son mostrados en las tablas 5.24 a 5.26 y representados en la figura 5.20.

Cabe mencionar que los resultados representados en las figuras anteriores son del ensayo de tracción # 2, se escogieron estos valores porque la desviación estándar de este ensayo es menor a la de los otros dos, además el valor del módulo de Young, ecuación 5.1, de este ensayo es muy próximo al valor medio del módulo de Young de los tres experimentos, tabla 5.27.

ENSAYO DE TRACCIÓN # 1		
Esfuerzo (N/m²)	Deformación (m/m)	Módulo de Young (Pa). Imagen cortada
0.0000	0.0000000	-
99.8543	0.0001180	848564.7013
199.7126	0.0002105	958652.3656
299.5639	0.0003198	962865.4610
Pendiente		947425.8394
Desviación estándar		64809.6028

Tabla 5.24 Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #1. Valores medios del módulo de Young para cada una de las ocho fuerzas aplicadas a una muestra de hule látex de dimensiones 34.50 mm de ancho x 38.60 mm de longitud x 0.29 mm de espesor.

ENSAYO DE TRACCIÓN # 2		
Esfuerzo (N/m²)	Deformación (m/m)	Módulo de Young (Pa). Imagen cortada
0.0000	0.0000000	-
99.8543	0.0001192	837462.9453
199.7126	0.0002095	953231.2538
299.5639	0.0003238	925136.0930
Pendiente		938090.6522
Desviación estándar		60385.1805

Tabla 5.25 Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #2. Valores medios del módulo de Young para cada una de las ocho fuerzas aplicadas a una muestra de hule látex de dimensiones 34.50 mm de ancho x 38.60 mm de longitud x 0.29 mm de espesor.

ENSAYO DE TRACCIÓN # 3		
Esfuerzo (N/m ²)	Deformación (m/m)	Módulo de Young (Pa). Imagen cortada
0.0000	0.0000000	-
99.8543	0.0001199	832896.5448
199.7126	0.0002106	948524.9632
299.5639	0.0003178	942462.8412
Pendiente		953840.6474
Desviación estándar		65078.7392

Tabla 5.26 Datos experimentales obtenidos del ensayo de tracción #3. Valores medios del módulo de Young para cada una de las ocho fuerzas aplicadas a una muestra de hule látex de dimensiones 34.50 mm de ancho x 38.60 mm de longitud x 0.29 mm de espesor.

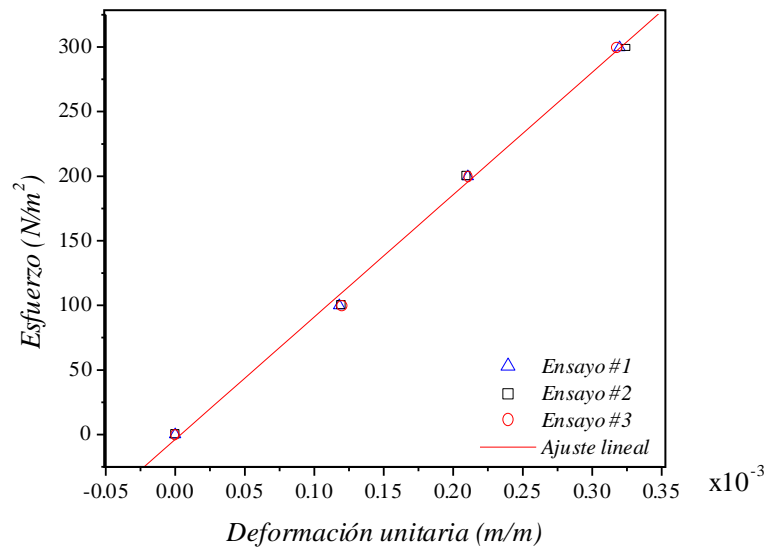


Figura 5.20 Diagrama esfuerzo-deformación para una muestra de hule látex de dimensiones 34.50 mm de ancho x 38.60 mm de longitud x 0.29 mm de espesor.

Ensayo de tracción	Módulo de Young (Pa). Imagen cortada
1	947425.8394
2	938090.6522
3	953840.6474
Media	946452.3797
Desviación estándar	7919.9940

Tabla 5.27 Valor del módulo de Young para una muestra de hule látex de dimensiones 34.50 mm de ancho x 38.60 mm de longitud x 0.29 mm de espesor y área transversal considerada como constante teniendo en cuenta y sin tener en cuenta los extremos de sujeción.

De acuerdo con los resultados obtenidos para una muestra de hule látex de dimensiones 34.50 mm de ancho x 38.60 mm de longitud x 0.29 mm de espesor, el valor del módulo de Young a 22° C es igual a **946452.3797 ± 7919.9940 Pa**, lo que corresponde a una precisión del **0.8%**.

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las propiedades elásticas obtenidas para una muestra de hule látex natural con un espesor de **0.63 mm** mediante técnicas mecánicas son: **1434448.3852 ± 71432.3928 Pa** para el módulo de Young, **0.52437 ± 0.00272** para el coeficiente de Poisson y **470505.3186 ± 3536.4847 Pa** para el módulo de rigidez; mientras que con DSPI los valores obtenidos fueron: **1682689.5289 ± 13405.5387 Pa**, **0.4105 ± 0.0092** y **580444.6190 ± 6425.8692 Pa**, para el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el módulo de rigidez, respectivamente.

Para una probeta de hule látex de **0.29 mm** de espesor el valor obtenido del módulo de Young por el método mecánico es de **750225.9462 ± 36158.4880 Pa**, mientras el valor obtenido a partir de DSPI es de **946452.3797 ± 7919.9940 Pa**.

La diferencia de estos valores puede deberse a aspectos tales como el error generado por vibración y turbulencia del aire sobre el sistema óptico, la baja resolución del calibrador usado para el registro de las deformaciones en el procedimiento mecánico y el error que se produce por el uso de luz divergente en lugar de luz colimada.

El valor que se encontró para las propiedades mecánicas de la muestra bajo estudio (caucho natural) concuerda con lo esperado, pues el caucho al ser un material elastomérico tiene un módulo de elasticidad relativamente bajo, mientras que el coeficiente de Poisson debe ser un poco inferior a 0.5.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado la posibilidad de usar la interferometría digital de patrones de *speckle* (DSPI) para el análisis de pequeñas deformaciones. El potencial de DSPI se mostró midiendo las deformaciones micrométricas que se producen en un material elastómero cuando es sometido a cargas mecánicas externas. Para este fin se realizó un estudio sobre los principios interferométricos, adquisición, procesamiento digital de imágenes y algoritmos computacionales característicos de la interferometría *speckle*. El arreglo experimental implementado fue un sistema interferométrico de tres haces con la capacidad de medir desplazamientos *en el plano* y *fuera del plano*.

Para generar las tensiones que se aplicaron sobre la muestra se hizo necesaria la construcción de un sistema electromecánico de tracción ya que en el laboratorio de óptica no se contaba con un equipo similar. Para la construcción del sistema se utilizaros elementos fáciles de adquirir y de un costo relativamente bajo. El costo aproximado de la construcción del sistema de tracción fue de 300000 pesos (~USD \$120), lo cual es muy inferior al costo de las máquinas que se encuentran comercialmente cuyo valor oscila entre los USD \$5000 y varios cientos de miles de dólares, de acuerdo con las características como capacidad máxima de carga, tipo y tamaño de la probetas, nivel de exactitud, etc. Una de las desventajas que presenta la máquina construida en este trabajo frente a las máquinas comerciales es su limitado campo de operación, ya que la máquina no puede ser utilizada para trabajar con materiales muy rígidos, como por ejemplo metales, debido a que el motor no posee la potencia suficiente para deformarlos; por el contrario presenta un óptimo desempeño cuando se estudian materiales suaves como plásticos flexibles y elastómeros.

Para el diseño del sistema de corrimiento de fase se utilizaron dispositivos piezoeléctricos obtenidos a partir de bocinas. Esta es una buena opción ya que los sistemas de nanoposicionamiento presentan un alto costo en el mercado; de esta forma se reduce el costo del proyecto y se obtiene una buena respuesta del sistema ya que es posible producir desplazamientos de forma controlada del orden de los nanómetros. Se debe tener mucho cuidado a la hora de utilizar dispositivos piezoeléctricos pues presentan una alta resolución por lo que son muy propensos a generar errores debido a la presencia de señales parásitas. Dado que los actuadores piezoeléctricos exhiben una dependencia con la temperatura, se debe procurar trabajar bajo condiciones ambientales establecidas para que el resultado de la práctica pueda ser reproducible.

La información de las deformaciones producidas sobre el material, las cuales se encuentran codificadas en las franjas de correlación, fue extraída a partir de la aplicación de la técnica de corrimiento de fase. Estos valores fueron comparados con valores obtenidos mediante el uso de la técnica de conteo de franjas. Aunque el conteo de franjas proporciona una buena aproximación de la deformación total producida en el material, el uso de la técnica de corrimiento de fase suministra mapas de desplazamiento, donde cada elemento (*pixel*) del

mapa representa el valor de la deformación en el punto respectivo del objeto bajo prueba, brindando una representación gráfica de la deformación en toda la muestra. Además la técnica de corrimiento de fase puede aplicarse a patrones complejos de franjas, como franjas curvas o cerradas, a diferencia del conteo de franjas que resulta eficiente solamente en el análisis de patrones simples.

Una aplicación inmediata encontrada a partir de la medición de las cargas aplicadas y las deformaciones resultantes, está relacionada con la determinación de las características mecánicas de los materiales, como por ejemplo el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el módulo de rigidez. De esta forma se demuestra que la técnica óptica DSPI puede ser usada para el estudio, caracterización, aplicación y control no destructivo de materiales, estructuras y componentes industriales, con un mayor grado de exactitud y precisión que los métodos convencionales.

RECOMENDACIONES

Con el fin de mejorar el desempeño del sistema se recomienda tener en cuenta las siguientes observaciones:

Los sistemas de medición que emplean luz láser como fuente de iluminación son muy sensibles a vibraciones y turbulencia del aire generando errores sistemáticos que pueden alterar el registro final. Uno de los mecanismos que pueden ser empleados para evitar el efecto nocivo que genera la presencia de vibraciones, es el uso de sistemas amortiguadores, como por ejemplo la ubicación de la mesa holográfica sobre bancos de arena. Además, el sitio de trabajo debe estar totalmente libre de presencia de fuentes de iluminación adicionales, pues esto podría llegar a generar errores en la medida. Una solución a este inconveniente es el realizar la toma de datos en la noche para evitar la presencia de luz solar.

Se recomienda la implementación de un sistema de tracción hidráulico (pistones, compresores, etc.) con el fin de ampliar su campo de aplicación a materiales más rígidos. También se aconseja mejorar el sistema de agarre de la muestra para que durante el ensayo no se produzcan movimientos de cuerpo rígido (traslación o rotación) [17],[21].

Gran parte del desempeño del sistema depende de la calidad del algoritmo de desenvolvimiento de fase, por lo tanto es aconsejable mejorar el algoritmo implementado, construyendo uno basado en la relación de conectividad ocho entre un nodo y sus vecinos, en vez de la conectividad cuatro que caracteriza el algoritmo utilizado.

Para mejorar el potencial del sistema podría implementarse un interferómetro capaz de medir las tres componentes del desplazamiento para extender su aplicación a medidas de desplazamientos en los tres ejes. Se recomienda también la automatización de todo el sistema (mecánico, óptico y procesamiento digital), permitiéndolo llevar a un medio ambiente hostil.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.microana.com.mx/page0007.htm>. Catálogo de Máquinas para Ensayos de Materiales. Microanálisis, S.A. De C.V. Fecha de consulta: 30 marzo de 2005. E-mail responsable: ingenier@microanalisis.com.mx.
- [2] HECHT, E. Óptica. Addison Wesley Iberoamericana. Madrid 2000.
- [3] DAINTY, J.C. Laser Speckle and Related phenomena. Springer, Berlin, 1975.
- [4] GOODMAN, J.W. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In DAINTY, J. C. editor, Laser Speckle and Related Phenomena. pag. 9-75. Springer, Berlin, 1975.
- [5] JAKOBI, M. Laser Speckle Based Surface Measurement Techniques Relevant to Fusion Devices. PhD thesis, Technische Universität München, München, Germany, 2000.
- [6] LI, Q. BF. CHIANG, P. Three-Dimensional Dimension of Laser Speckle. Appl. Opt., 31:6287-6291, 1992.
- [7] RASTOGI, P. Holographic Interferometry Principles and Methods. Ed. Springer Verlag. Germany, June 1994. ISBN: 0387573542.
- [8] RASTOGI, P.K. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques. John and Wiley and Sons Ltd. Chichester 2001.
- [9] PUGA, H.J. RODRÍGUEZ, R. MARTÍNEZ, A. General Model to Predict and Correct Errors in Phase Map Interpretation and Measurement for Out-of-Plane ESPI Interferometers. Optics & Laser Technology 34 (2002) 81 – 92.
- [10] LEENDERTZ, J. A y BUTTERS, J. N. An Image-Shearing Speckle-Pattern Interferometer for Measuring Bending Moments. J. Phys. E, 6:1107-1110, 1973.
- [11] HENAO, R. MEJÍA, A. Análisis de la Calidad de Franjas en Interferometría Speckle. Revista Colombiana de Física, vol. 34, no. 2. 2002.
- [12] ENNOS, A. E. Speckle Interferometry. In DAINTY, J. C., editor, Laser Speckle and Related Phenomena. Pag. 203-253. Springer, Berlin, 1975.
- [13] VEST, Ch. M. Holography Interferometry. John Wiley & Sons. USA 1979.

- [14] POSADA, L.F. RESTREPO, R. Algoritmos para el Análisis de Franjas Interferométricas, Trabajo de grado ingeniería mecánica, Universidad EAFIT, Medellín 2002.
- [15] PALZA, H. Introducción a las Propiedades Mecánicas de Polímeros. Ciencia Abierta, Vol. 25. Editor PhD ACEVEDO, R. Universidad de Chile. Santiago, febrero 2004.
- [16] SMITH, W. F. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Mc Graw Hill. Madrid 1998.
- [17] TIMOSHENKO,S. GOODIER, J.N. Teoría de la Elasticidad. Ediciones Urmo. Bilbao 1968.
- [18] MARTÍNEZ, A. CORDERO, R. RAYAS, J.A.. PUGA, H y RODRÍGUEZ, R Uncertainty Analysis of Displacements Measured by in-plane Electronic Speckle-Pattern Interferometry with Spherical Wave Fronts. Appl. Opt., 44:7:1141- 1149 2005.
- [19] BAIRD, D.C. Experimentación, una Introducción a la Teoría de Mediciones y al Diseño de Experimentos. Prentise- Hall Hispnoamericna, S.A. México 1991.
- [20] PATIÑO, M. Aplicación de la Holografía Digital en el Análisis de la Expansión Térmica en Objetos Opacos. Trabajo de grado ingeniería física, Universidad del Cauca, Popayán 2003.
- [21] SVANBRO, A. Speckle Interferometry and Correlation Applied to Large-Displacement Field, PhD thesis, Luleå University of Technology 2004.
- [22] RAYAS, J.A. RODRÍGUEZ, R. MARTINEZ, A. Medición del Módulo de Young en el Hule Látex Usando ESPI. Revista Mexicana de Física. 49 (6) 555-564. Diciembre 2003.
- [23] KENNEDY, J. NEVILLE, A. Estadística para Ciencias e Ingeniería. Segunda Edición. Harla, México D.F. 1993.
- [24] SKOOG, D. HOLLER, J. NIEMAN, T. Principios de Análisis Instrumental. Quinta Edición. Mac Graw Hill. Madrid.

ANEXOS

A1. MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

A1.1 ASPECTOS GENERALES

El significado de la palabra piezo es estrechar, apretar u oprimir. Jacques y Pierre Curie descubrieron en 1880 que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en éste; ellos llamaron a este fenómeno efecto piezoeléctrico; más tarde, también verificaron que la aplicación de un campo eléctrico generaría una deformación en el material, fenómeno que denominaron efecto piezoeléctrico inverso. Los materiales piezoeléctricos pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

Después del descubrimiento pasaron varias décadas antes de que se utilizara el fenómeno piezoeléctrico. La primera aplicación comercial fue en detectores ultrasónicos para submarinos desarrollados durante la primera guerra mundial y en la década de los cuarenta científicos descubrieron que el titanato de bario (cerámico) puede comportarse como material piezoeléctrico en presencia de un campo eléctrico. Actualmente el fenómeno piezoeléctrico es a menudo encontrado en la vida diaria, por ejemplo en encendedores de gas y relojes. En el campo de ingeniería el uso más común del fenómeno piezoeléctrico actualmente es en los actuadores piezoeléctricos, los cuales son dispositivos que producen un movimiento aprovechando el fenómeno físico de la piezoelectricidad. El movimiento preciso que resulta cuando un campo eléctrico es aplicado al material es de gran valor para nanoposicionamiento.

El efecto piezoeléctrico exhibido por materiales naturales como el cuarzo, la turmalina, la sal de rochelle, etc. es muy pequeño, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, como los materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos como el BaTiO₃ y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT). Los cerámicos PZT, disponibles en muchas variaciones, son los materiales más ampliamente usados hoy para aplicaciones como actuadores o sensores.

La estructura cristalina del PZT es cúbica centrada en las caras (isotrópico) antes de la polarización y después de la polarización exhiben simetría tetragonal (estructura anisotrópica) por debajo de la temperatura de Curie, que es aquella en la cual la estructura cristalina cambia de forma piezoeléctrica (no simétrica) a no piezoeléctrica. A esta temperatura los cerámicos PZT pierden las propiedades piezoeléctricas.

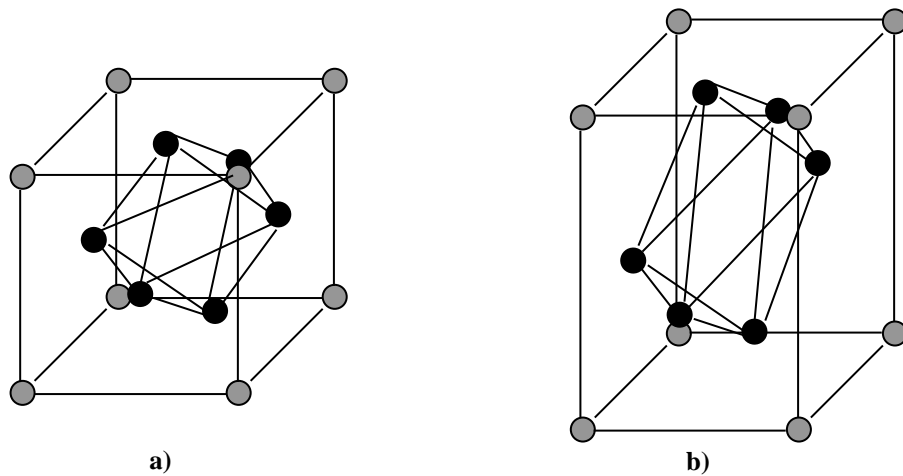


Figura A1.1 Estructura cristalina del PZT a) antes de polarización b) después de polarización

La razón del comportamiento de dipolo eléctrico es la separación entre los iones de carga positiva y negativa. Una región de dipolos eléctricos con orientación similar es llamada dominio. A los grupos de dipolos con orientación paralela se les llama dominio de Weiss. El dominio de Weiss está orientado aleatoriamente en el grueso del material del PZT, antes de que el tratamiento de polarización sea efectuado. Para este propósito se aplica un campo eléctrico al piezo cerámico que ha sido previamente calentado. Con el campo aplicado, el material se expande a lo largo del eje del campo y se contrae perpendicularmente a este eje. Los dipolos eléctricos se alinean y permanecen rígidamente alineados hasta su enfriamiento. El material tiene ahora una polarización permanente (la cual puede ser degradada si se exceden los límites mecánicos, térmicos y eléctricos del material). Como resultado hay una distorsión que causa un aumento en las dimensiones alineadas con el campo y una contracción en los ejes normales al campo.

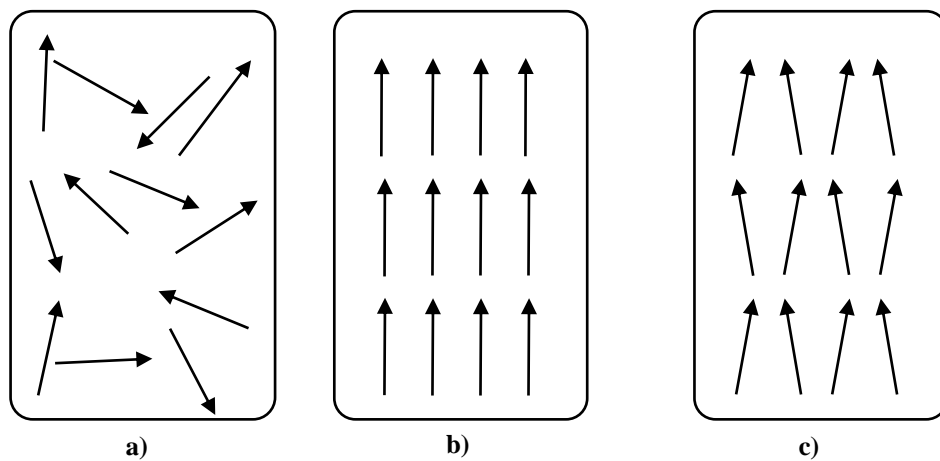


Figura A1.2 Comportamiento de los dominios de Weiss antes (a), durante (b) y después del proceso denominado “*poling*” (c).

Cuando un voltaje es aplicado a un material piezoeléctrico polarizado, el dominio de Weiss aumenta su alineamiento proporcionalmente al voltaje. El resultado es un cambio en las dimensiones (expansión, contracción) del PZT.

Los piezo actuadores generan grandes fuerzas rápidamente, sin efectos magnéticos, con baja potencia de consumo y libre de desgaste y roturas. Tienen aplicaciones en óptica de estabilización de imágenes, sistemas de auto enfoque, alineación y conexión de fibra óptica, scanners de espejo rápido, óptica activa y adaptable, sintonización de láser, posicionadores de espejo, estimulación de vibraciones. En unidades de disco son utilizados para prueba de cabezas y cancelación de vibración. En microelectrónica son utilizados para nanometrología, posicionamiento de obleas y máscaras, medición de dimensiones críticas, microlitografía, sistemas de inspección y cancelación de vibración. Estas son sólo algunas aplicaciones, por mencionar algunas que tengan relación con la electrónica de forma más directa, pero existen cientos de aplicación es más.

A1.2 PROPIEDADES

El desplazamiento de un material piezoeléctrico tipo PZT depende del campo eléctrico aplicado, al igual que de las propiedades del material y de las dimensiones de este [20].

El valor del desplazamiento ΔL de un actuador piezoeléctrico, operando en su región lineal puede calcularse mediante la siguiente relación:

$$\Delta L \approx \pm E \cdot d_{ij} \cdot L_0, \quad (\text{A1.1})$$

donde \vec{E} es el campo eléctrico aplicado en voltios sobre metro (V/m), L_0 es la longitud del material cerámico en metros (m) y d_{ij} son coeficientes propios del material dados en metros sobre voltio (m/V). Los coeficientes d_{ij} son coeficientes de estiramiento. El doble subíndice indica la relación entre las propiedades eléctricas y mecánicas del material, el primer índice describe la dirección de la excitación y el segundo la dirección de la respuesta del sistema, así pues, d_{33} describe las componentes de dilatación paralelas al vector de polarización del piezoeléctrico y d_{31} describe el desplazamiento ortogonal al vector polarización. A estos coeficientes se les denomina comúnmente la ganancia del piezoeléctrico.

La diferencia de potencial máxima que puede llegar a soportar el material cerámico depende del espesor de este, así como de los materiales aislantes. La aplicación de una diferencia de potencial mayor puede llegar a provocar un daño irreversible sobre el actuador, por eso es necesario estimar el valor máximo de voltaje que puede ser aplicado. Una buena estimación de este valor es 1 kilovoltio por cada milímetro de espesor del cerámico, debido a esto se hace necesario construir el actuador con delgadas láminas del material conectadas mecánicamente en serie y eléctricamente en paralelo con el fin de mantener el voltaje de operación dentro de límites prácticos. El desplazamiento total que

puede generar un sistema de este tipo es la suma de los desplazamientos individuales generados por cada una de las láminas, por lo tanto

$$\Delta L \approx \pm n.E.d_{ij}.L_0, \quad (\text{A1.2})$$

donde n es el número de láminas conectadas en paralelo.

La resolución que se puede obtener de un actuador piezoeléctrico es teóricamente ilimitada. Dado que el desplazamiento para un material cerámico PZT se basa en la orientación de los dipolos eléctricos, la aplicación de pequeños campos eléctricos generan desplazamientos infinitesimalmente pequeños del actuador, sin embargo, debido a esta característica, es posible que pequeñas señales como ruido eléctrico generen desplazamientos indeseados en el cerámico, lo que limita el valor de campo eléctrico que puede ser aplicado para obtener una respuesta apropiada del sistema.

Para los materiales ferroeléctricos como el PZT, la relación entre la polarización y el campo eléctrico aplicado no es lineal y exhiben fenómenos de histéresis debido a efectos de fricción molecular del material y a la polarización cristalina. La histéresis para este tipo de materiales está comprendida entre el 10% y el 15% del movimiento.

A2. CONTEO DE FRANJAS

La técnica de corrimiento de fase nos permite obtener el valor de los desplazamientos conociendo los mapas de fase desenvueltos, pero si no se cuenta con esta técnica para cuantificar las deformaciones, es posible hacerlo con una técnica alternativa.

Las franjas de correlación son obtenidas al realizar una adición o sustracción de dos exposiciones del material, una antes y otra después de la deformación. La gráfica resultante para este caso corresponde a valores de irradiancia en lugar de valores fase. Figura A2.1a y A2.1b .

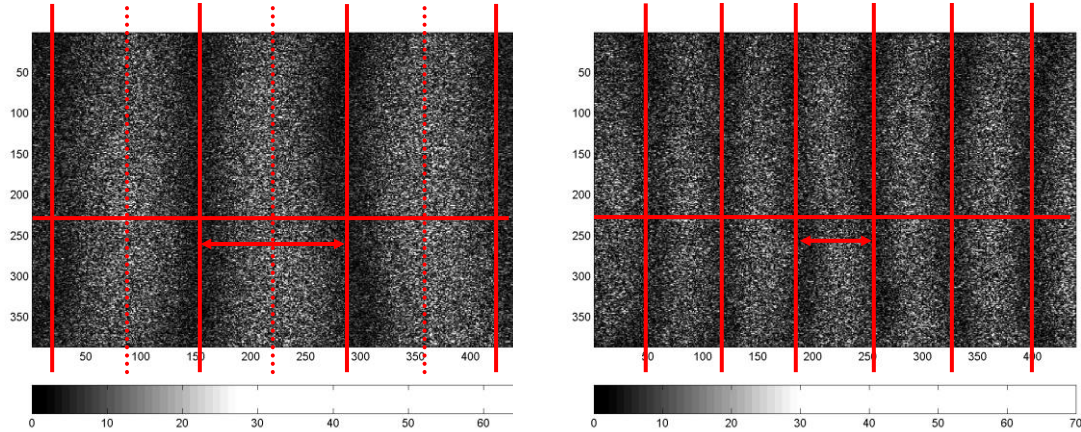


Figura A2.1 Franjas de correlación. a) Franjas de correlación para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de 3×10^{-3} N. b) Franjas de correlación para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de 6×10^{-3} N.

Si se obtienen patrones simples de franjas como los de la Figura A2.1, es posible determinar las deformaciones de la muestra mediante el conteo de franjas sin la necesidad de recurrir a la técnica de corrimiento de fase.

Para calcular el valor de la deformación que representa una franja se utiliza la ecuación (A2.1), donde θ es el ángulo de incidencia del haz, λ es la longitud de onda de la fuente de iluminación y u es la separación entre franja y franja.

$$u = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}, \quad (\text{A2.1})$$

Para nuestro caso, $\theta = 18^\circ$ y $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, por lo tanto el valor de separación entre franja y franja es $\sim 1.02 \mu\text{m}$.

El valor de la deformación total en la muestra se calcula con la ecuación (A2.2), donde N es el número de franjas presentes en el patrón.

$$u = \frac{\lambda N}{2 \text{sen} \theta}. \quad (\text{A2.2})$$

El conteo de franjas por patrón se realizó mediante el algoritmo de la Figura A2.2 [22], el cual fue implementado en MatLab.

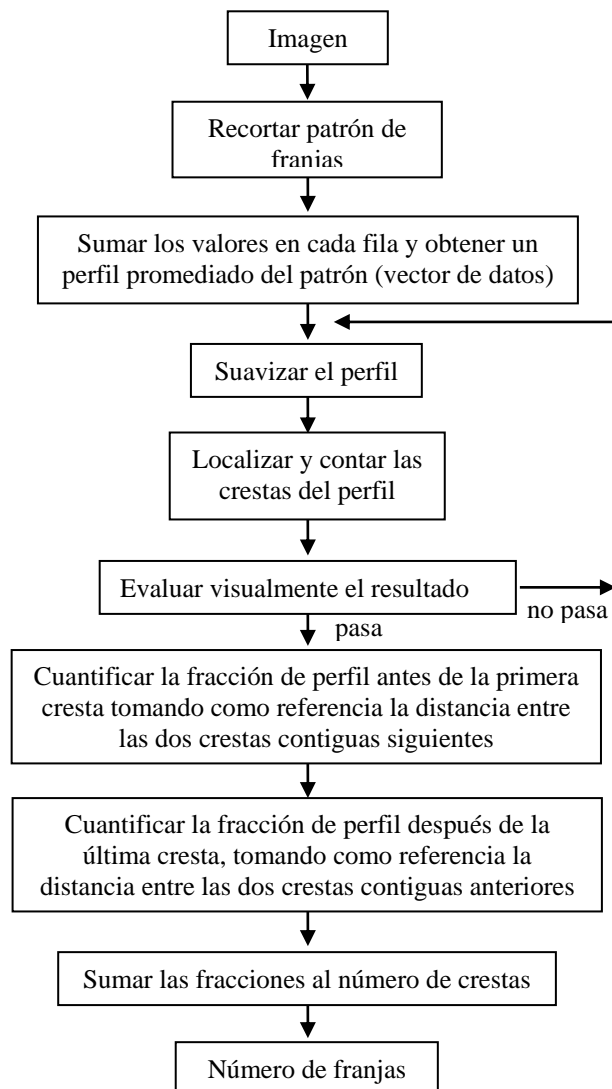


Figura A2.2 Algoritmo usado en el conteo de franjas.

En la Tabla A2.1 y A2.2 se presentan el número de franjas y las deformaciones calculadas para cada uno de los patrones de la Figuras A2.3 y A2.4, respectivamente.

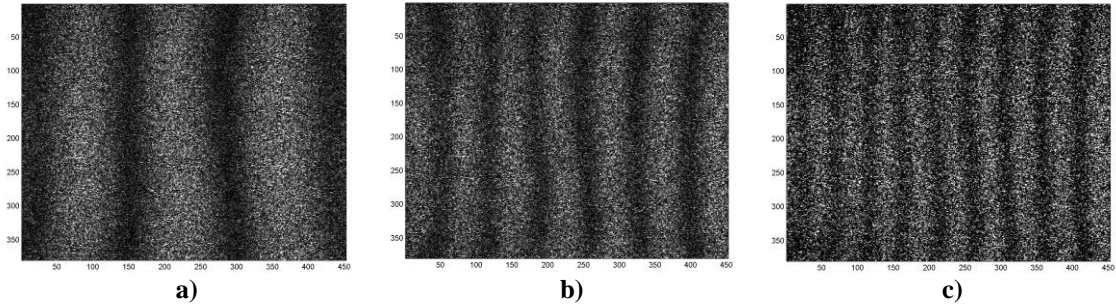


Figura A2.3 Patrones de franjas para una muestra de hule látex de 0.63 mm de espesor, sometida a tres deformaciones. a) 3×10^{-3} N. b) 6×10^{-3} N. c) 9×10^{-3} N.

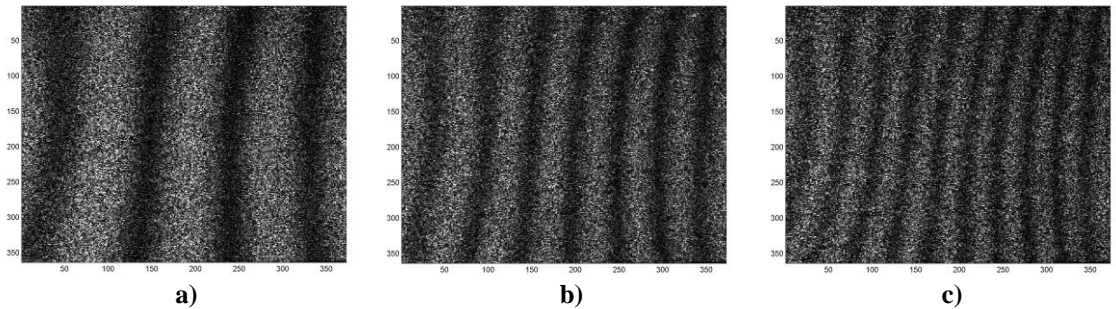


Figura A2.4 Patrones de franjas para una muestra de hule látex de 0.29 mm de espesor, sometida a tres deformaciones. a) 1×10^{-3} N. b) 2×10^{-3} N. c) 3×10^{-3} N.

Esta técnica de conteo de franjas es eficaz para conocer los desplazamientos generales de la muestra, sin embargo la ventaja de usar la técnica de corrimiento de fase es que cada elemento (pixel) del mapa de desplazamientos representa el valor de la deformación en el punto respectivo del objeto bajo prueba, además esta técnica es muy útil para describir gráficamente las deformaciones en la superficie del material a medida que se le aplican las cargas externas.

MUESTRA #1 (0.63 mm de espesor)			
Patrón	Tensiones (N)	N° de Franjas	Deformación (μm)
P1	3×10^{-3}	3.27	3.35
P2	6×10^{-3}	6.25	6.40
P3	9×10^{-3}	9.16	9.38

Tabla A2.1 Deformaciones representadas por el patrón de franjas de la Figura A2.3

MUESTRA #1 (0.29 mm de espesor)			
Patrón	Tensiones (N)	Nº de Franjas	Deformación (μm)
P1	1×10^{-3}	3.75	3.84
P2	2×10^{-3}	6.83	6.99
P3	3×10^{-3}	10.12	10.36

Tabla A2.2 Deformaciones representadas por el patrón de franjas de la Figura A2.4

Cuando el interferómetro está en configuración de ángulos iguales, las franjas verticales aparecen debido a las deformaciones a lo largo del eje x (vector de sensibilidad).

Los saltos de fase de 2π bordean líneas que se pueden relacionar con una deformación; y por estar distribuidas constantemente se puede asumir que dicha deformación también es constante, Figura A2.5, esto es de utilidad siempre y cuando no se desee un estudio muy detallado de las deformaciones que ha sufrido el material.

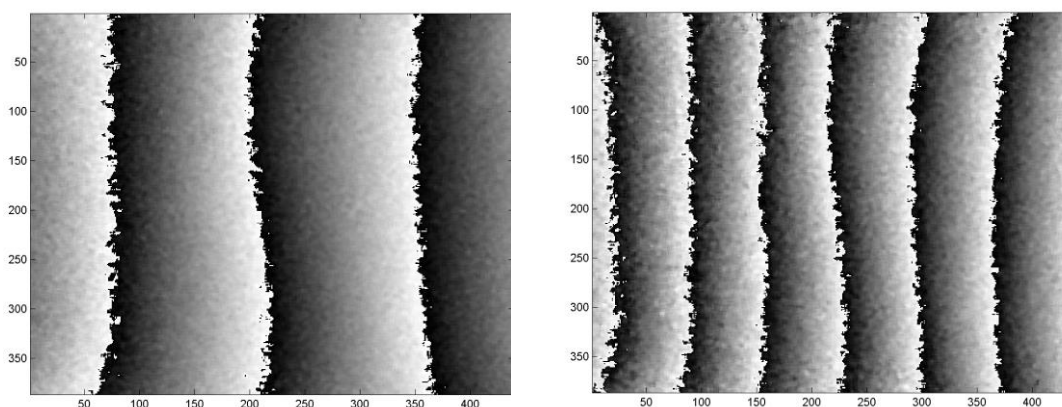


Figura A2.5 Datos experimentales obtenidos con un interferómetro de iluminación dual sensible a desplazamientos solo *en el plano*. a) Mapa de fase módulo 2π para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de 3×10^{-3} N. b) Mapa de fase módulo 2π para una muestra de hule látex sometida a una fuerza de tensión de 6×10^{-3} N.

Cuando no se tienen patrones simples y en lugar de esto se forman patrones complejos como los de la Figura A2.6, es el mapa de fase el que permite determinar las deformaciones del material en cada punto de la muestra; por tal motivo se recurre a la técnica de corrimiento de fase para cuantificar las deformaciones.

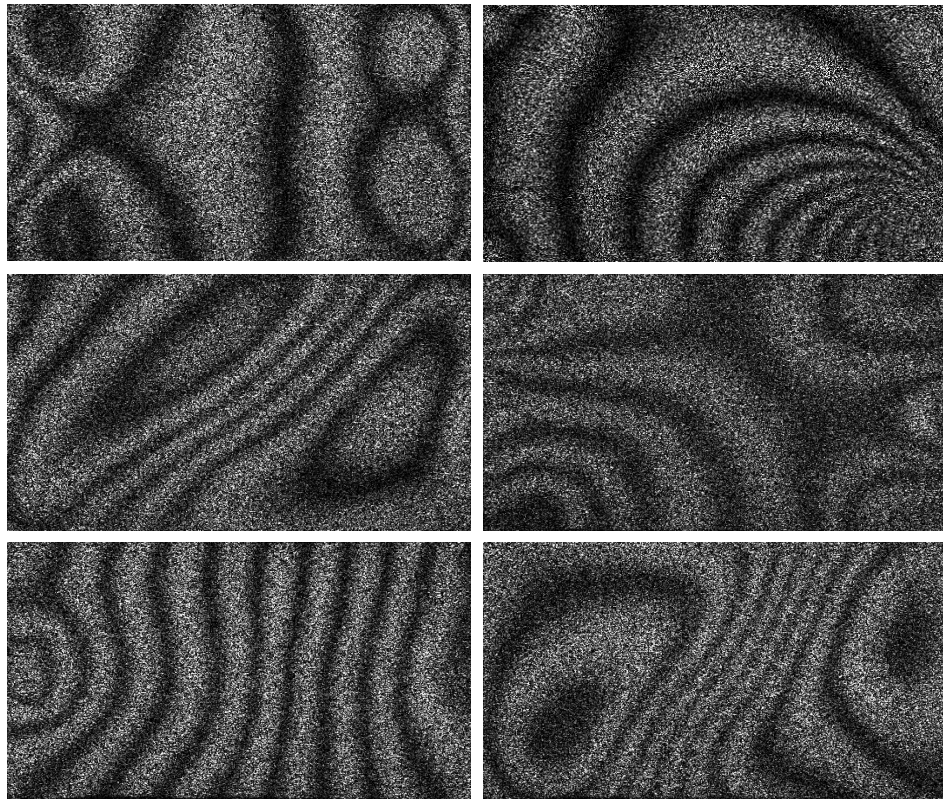
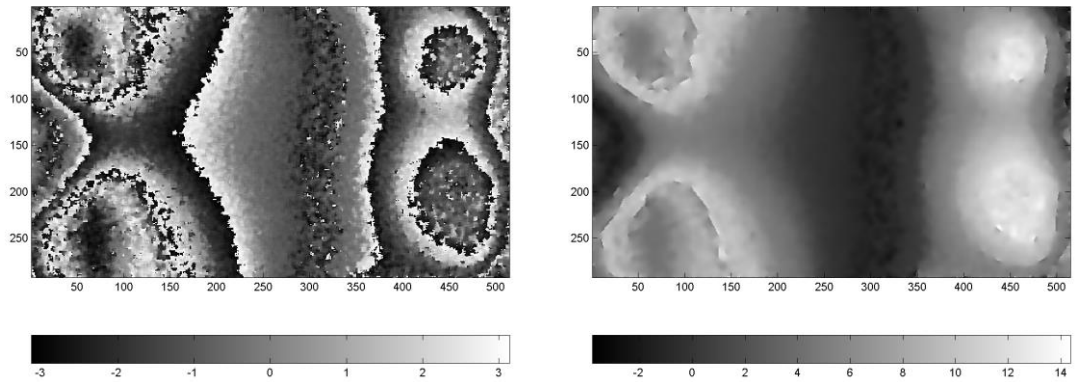


Figura A2.6 Franjas de correlación con deformaciones no uniformes.

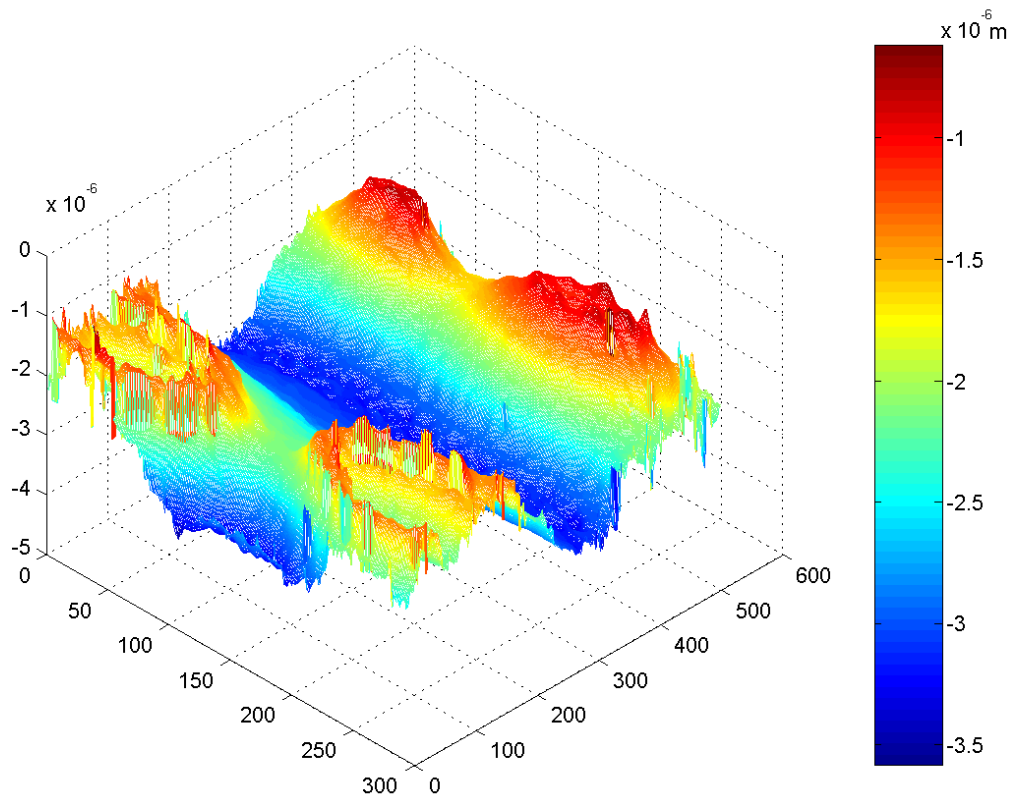
Cuando se esta preparando la muestra para someterla a un ensayo de tracción es de gran importancia, entre otras condiciones, asegurar que la fuerza o carga aplicada sea axial, es decir, producir un esfuerzo uniforme; pero en los ensayos de tracción tradicionales no hay manera de asegurar esto, simplemente se supone esta condición, la muestra se asegura a lo máximo que ajusten las mordazas para garantizar que no se produzca un deslizamiento o un movimiento de cuerpo rígido [17],[21], se toman los datos debidos y se realizan los análisis necesarios.

A continuación se muestran unos resultados obtenidos cuando la muestra se ha sujetado incorrectamente a las mordazas (Figuras A2.7 y A2.8). Se muestran los mapas de fase de módulo 2π , la distribución de fase asociados a los mapas de módulo 2π y la representación 3D del mapa de desplazamientos cuando las deformaciones no son uniformes, los resultados son para la componente *en el plano* del desplazamiento.



a)

b)



c)

Figura A2.7 Deformaciones no uniformes para una muestra de hule látex. a) Mapa de fase módulo 2π . b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *en el plano* (eje x).

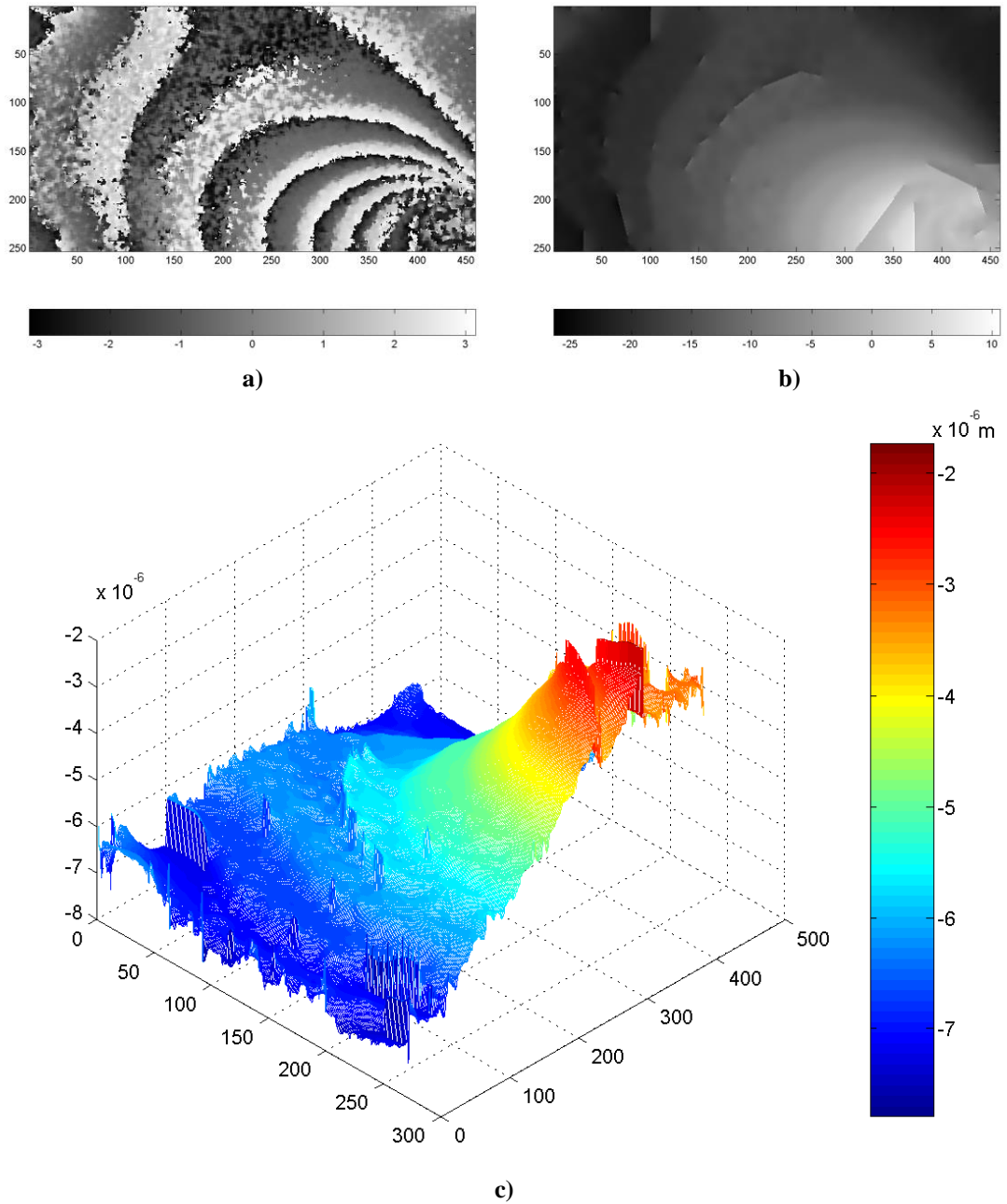


Figura A2.8 Deformaciones no uniformes para una muestra de hule látex. a) Mapa de fase módulo 2π . b) Fase desenvuelta a partir del mapa de fase módulo 2π . c) Mapa de desplazamientos con componentes *en el plano* (eje x).