



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

Interferometría Electrónica de moteado y
desplazamiento de fase en eventos dinámicos
para el análisis de la deformación uniaxial en
probetas metálicas soldadas

Presenta:

Ing. Jorge Ramón Parra Michel

Como requisito para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Con la asesoría de la

Dra. Amalia Martínez García

León, Guanajuato Diciembre 2006

León Gto., a 1de Noviembre de 2006

Dr. Francisco J. Cuevas de la Rosa
Director de Formación Académica
Presente

La presente es para solicitarle iniciar los trámites correspondientes para la obtención del grado Maestro en Ciencias (Óptica) del alumno **Jorge Ramón Parra Michel**, de este postgrado, bajo las siguientes consideraciones:

1. Que he leído, revisado y autorizado el trabajo de tesis:

“ Interferometría Electrónica de moteado y desplazamiento de fase en eventos dinámicos para el análisis de la deformación uniaxial en probetas metálicas soldadas ”

2. De acuerdo al área de Investigación, la mesa de Sinodales que propongo a usted para el examen de grado, la integramos:

- Dr. Abundio Dávila Álvarez, Sinodal Interno.
- Dr. Héctor José Puga Soberanes, Sinodal Externo.
- Dra. Amalia Martínez García, Asesor de Tesis y Presidente del Jurado

3. Propongo como fecha el día 8 de Diciembre de 2006, a las 11:00 horas, en el Auditorio Dr. Daniel Malacara Hernández, para efectuar el examen recepcional.

4. Así mismo, adjunto Curriculum Vitae del Dr. J. H. Puga, Sinodal Externo quien fungirá como Secretario en el examen de Grado. Lo anterior, para ser analizado y autorizado por el Comité Académico.

Agradeciendo su atención a la presente y en espera de su favorable respuesta al respecto, quedo de usted muy

Atentamente,

Dra. Amalia Martínez García
Investigador Titular

RESUMEN

El estudio de la mecánica ha existido desde la antigüedad y a acompañado al hombre a través de su evolución. Una de las preocupaciones de los primeros constructores era el utilizar las herramientas y los materiales adecuados para los fines que buscaban. Los ingenieros se vieron obligados a caracterizar los materiales, entre ellos los metales para la construcción adecuada y eficiente de sus máquinas y herramientas; así surgió la necesidad de crear métodos y sistemas que revelaran estas características y propiedades.

La interferometría electrónica de patrones de moteado, ESPI (acrónimo de *Electronic Speckle Pattern Interferometry*) nos sirve como herramienta para el estudio de las propiedades mecánicas de los metales y otros materiales. La utilización de la luz con alta coherencia espacial y temporal (propiedades de la luz láser) nos permite crear interferómetros que aprovechan el fenómeno de destrucción y amplificación de las ondas electromagnéticas cuando se sobreponen, creando franjas oscuras y brillantes que son utilizadas como un patrón de referencia para las mediciones cuando se observan en el medio que se quiere caracterizar.

El objetivo de este trabajo es mostrar una técnica basada en ESPI para evaluar a través del tiempo la deformación uniaxial en probetas soldadas y mostrar la importancia de considerar las soldaduras cuando el diseñador mecánico evalúa los esfuerzos en elementos mecánicos.

Agradecimientos

Quiero agradecer el apoyo me han brindado tanto personal y profesionalmente a mi familia, amigos y profesores.

La lista es muy larga pero tengo que pensar primero en mi madre a quien le aprendí que no hay peor bancarrota que el desánimo, que el mejor día de mi vida es hoy, que la mejor distracción es el trabajo y que el regalo más precioso es el perdón. Siempre la recordaré como la persona que fue: Disciplinada, Integra y con un firme carácter.

A mi esposa, que sin su amor, no sería la persona que soy; Ella me mostró el significado de que dos somos uno. A mi ma'Cony que siempre nos ha apoyado sin condición en las más locas aventuras y en los momentos difíciles.

A mi padre, porque hemos hecho un buen equipo y que ahora lo disfruto en los momentos en que platicamos y estamos juntos; realmente le doy gracias a la vida por permitirme estos momentos con él.

A mis compañeros y profesores del CIO, La Dra. Amalia Martínez y al Ing. Juan Antonio Rayas a quienes considero personas de una enorme calidad humana y quienes me han apoyado en mi formación profesional; Muchas gracias.

Y por último, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico y todas las facilidades que me prestaron a través de nuestra casa el Centro de Investigaciones en Óptica AC.

Índice:

- i. Inicio de tramites**
- ii. Resumen / I**
- iii. Agradecimientos / II**
- iv. Índice / III**
- v. Introducción general y objetivo de la tesis /1**

- 1. Conceptos de desplazamiento, deformación y vector de sensibilidad**
 - 1.1. Propósito del estudio de las uniones soldadas /4
 - 1.2. Análisis mecánico de la deformación /5
 - 1.3. Utilización de la luz en la metrología: interferencia óptica /9
 - 1.4. El vector de sensibilidad /12
 - 1.4.1. Vector de sensibilidad para un interferómetro fuera de plano con un haz de iluminación /12
 - 1.4.2. Vector de sensibilidad para un interferómetro en plano para dos haces de iluminación /14
 - 1.5. Referencias /17

- 2. El fenómeno del Speckle**
 - 2.1. Introducción /18
 - 2.2. Explicación del fenómeno de Speckle /19
 - 2.3. La interferencia del speckle /26
 - 2.4. Obtención de la fase óptica /28
 - 2.4.1. El método de phase stepping /29
 - 2.4.2. El método de Fourier /30
 - 2.4.3. El método directo /33
 - 2.5. Conclusiones /35
 - 2.6. Referencias /36

3. Simulación numérica por técnicas de elemento finito. (FEA)

- 3.1. Introducción básica al análisis por elemento finito /38
 - 3.1.1. Pasos básicos en el método de los elementos finitos /41
 - 3.1.1.1. Fase de preprocesado /41
 - 3.1.1.2. Fase de solución /41
 - 3.1.1.3. Fase de postprocesado /41
- 3.2. La programación por el software Mechanical Desktop™ de una probeta para el análisis de deformación /42
 - 3.2.1. Modelación de una probeta mecánica /42
- 3.3. Resultados y predicciones de la simulación numérica /44
- 3.4. Referencias /46

4. Medición de la deformación uniaxial para uniones soldadas mediante la técnica ESPI en plano

- 4.1. Medición del desplazamiento en plano /47
 - 4.1.1. Sistema óptico propuesto /48
 - 4.1.1.1. Sensibilidad del sistema /49
 - 4.1.2. Control de parámetros /51
 - 4.1.2.1. Velocidad de desplazamiento para la deformación /52
 - 4.1.2.2. Ajuste de extensómetro /52
 - 4.1.2.3. Control y optimización de desplazamiento de piezoeléctrico /52
 - 4.1.2.4. Razón de captura de imágenes y ajustes de la cámara CCD /53
 - 4.1.2.5. Estimación del error causados por la dinámica de la deformación durante el proceso del phase stepping y el posicionamiento del piezoeléctrico /55
 - 4.1.3. Puesta en marcha de la medición /58
 - 4.1.4. Obtención de imágenes /59
 - 4.1.5. Discusión acerca de la técnica utilizada /60
- 4.2. Proceso matemático para la obtención de la deformación /61
 - 4.2.1. Descripción de la programación del sistema para la técnica phase stepping de tres pasos para la obtención de la fase envuelta /63

4.2.2. Cálculo de la deformación /64

4.3. Comparación de mediciones vs. Simulación por elemento finito (FEA) /71

4.4. Referencias /73

5. Conclusiones Generales

5.1. Acerca de la técnica basada en ESPI en plano para la obtención de la deformación en un evento dinámico /74

5.2. Conclusiones acerca de los resultados obtenidos /75

5.3. Aplicación de la óptica para el análisis de la mecánica de materiales /76

5.4. Propuesta para proyectos futuros /77

Apéndices

A. Procesamiento Digital de Imágenes

A.1 Programación para obtención de la fase envuelta y fase desenvuelta /78

A.2 Programas utilizados para los cálculos de la deformación y filtrado /79

A.3 Los kernel de suavización de superficies /80

B Programas utilizados en LabVIEW

B1 Programa para la adquisición de las imágenes /81

C Trabajos derivados del proyecto de maestría

C.1 Participación en congresos /85

C.2 Memorias en extenso /85

Introducción general y objetivos de la tesis

El estudio de la mecánica ha existido desde la antigüedad y ha acompañado al hombre a través de su evolución. Una de las preocupaciones de los primeros constructores era el utilizar las herramientas y los materiales adecuados para los fines que buscaban. Posteriormente, en la industria de la guerra, el transporte y la urbanización, los ingenieros se vieron obligados a caracterizar los materiales, entre ellos los metales para la construcción adecuada y eficiente de sus máquinas y herramientas; así surgió la necesidad de crear métodos y sistemas que revelaran estas características y propiedades.

Como introducción, podemos decir que la interferometría electrónica de patrones de moteado, ESPI (acrónimo de *Electronic Speckle Pattern Interferometry*) nos sirve como herramienta para el estudio de las propiedades mecánicas de los metales y otros materiales como las cerámicas o los plásticos. La utilización de la luz con alta coherencia espacial y temporal (propiedades de la luz láser) nos permite crear interferómetros que aprovechan el fenómeno de destrucción y amplificación de las ondas electromagnéticas cuando se superponen, creando franjas con zonas oscuras y brillantes que son utilizados como un patrón de referencia para las mediciones cuando son observadas en el medio que se quiere caracterizar.

La luz es dividida, moldeada en su frente de onda, polarizada, transmitida y registrada por sistemas ópticos que son un sistema de lentes, espejos, filtros y placas fotográficas o cámaras de video; en la manera en que creamos un sistema óptico, podemos obtener mediciones de distintas características y direcciones. Para la medición de la deformación se utiliza dos tipos básicos de interferencia: los que registran la deformación en plano, y los que registran la deformación fuera de plano. La combinación de estos dos sistemas nos permite registrar las deformaciones en las tres direcciones. Así pues, para el estudio de las uniones soldadas nos apoyaremos en estas herramientas ópticas y en otras electromecánicas para describir los fenómenos de deformación que ocurren alrededor de la zona trabajada, también probaremos la

importancia que tiene en la industria la correcta utilización de técnicas para soldar desde el punto de vista del diseño mecánico; y por último, también se mostrarán como funcionan las distintas técnicas basados en ESPI.

Como resumen, podemos decir que el objetivo de esta tesis es mostrar una técnica basada en ESPI para evaluar la deformación uniaxial en probetas soldadas y mostrar la importancia de considerar las soldaduras cuando el diseñador mecánico evalúa los esfuerzos en elementos mecánicos.

En el capítulo primero se establece la relación entre desplazamiento, deformación y esfuerzo, así como el concepto de vector de sensibilidad.

En el capítulo segundo se mostrará como ocurre el fenómeno de reflexión de la luz láser cuando incide sobre superficies rugosas, pues es de esas reflexiones donde se obtienen la información de deformación. Este fenómeno se caracteriza por la formación de motas (o de speckle, en inglés) que cambian constantemente con respecto a la posición del observador, de la fuente de la iluminación o de la superficie iluminada; por lo tanto se hace un estudio matemático y se muestra un procedimiento para la medición de estas motas.

En el capítulo tercero, se describe la utilización de la técnica FEA, (acrónimo en inglés de *Finite Element Analysis*), para la simulación de la deformación de una probeta soldada y otra no soldada; se muestra los resultados obtenidos de la simulación.

El capítulo cuarto describe la técnica utilizada y el procedimiento para la obtención y medición de las deformaciones dinámicas con la técnica ESPI, se presenta un arreglo óptico para este objetivo; y por último se reportan resultados de algunas mediciones.

El capítulo quinto da a conocer las conclusiones generales acerca de este trabajo de tesis y se sugiere algunos nuevos proyectos que pueden dar continuidad a este trabajo.

Y por último, se anexan algunos apéndices con información adicional que sirven de apoyo teórico y complemento para las técnicas mostradas. Espero que durante la lectura a través de esta tesis, el lector la encuentre interesante y sirva como referencia para el estudio de la mecánica a través de la óptica.

1. Conceptos de desplazamiento, deformación y vector de sensibilidad

1.1. Propósito del estudio de las uniones soldadas

El proceso industrial más utilizado para la formación de elementos y estructuras metálicas es la soldadura. La soldadura es aplicada con diferentes métodos pero básicamente trata de la unión de dos o más metales mediante fusión de sus estructuras moleculares mediante la aplicación de calor o presión intensos en la región y alrededor de las partes a unir. La estructura isotrópica de los materiales originales se ve alterada en esa región y en muchos casos son necesarios utilizar tratamientos adicionales como los térmicos para tratar de recuperar esa estructura isotrópica, cosa que nunca ocurre en su totalidad. Las uniones soldadas pierden en gran medida la homogeneidad y continuidad molecular de la estructura mecánica, por lo tanto las líneas de esfuerzo se ven afectados en sus trayectorias ocasionando concentraciones de esfuerzo indeseados en la zona soldada. Un ejemplo de lo anterior se muestra en la figura 1.1.

El ingeniero de diseño tiene que calcular los esfuerzos máximos que puede soportar dichas uniones. Existen 2 métodos básicos para el procedimiento del calculo^(1T): el primero se basa en la utilización de un factor de seguridad que es un factor de proporción entre el esfuerzo último o de fluencia con respecto al esfuerzo admisible o de trabajo de la pieza mecánica; y el segundo, el más reciente, utiliza un control estadístico de factores involucrados durante el proceso de manufactura (fundición, tipo de maquinado, tipo de acabado superficial, tratamiento térmico, etc.) que van modificando el esfuerzo último o de fluencia hasta que se obtiene el esfuerzo admisible o de trabajo; también considera el ambiente de trabajo la cual la pieza estará sujeta y a las cargas dinámicas a lo largo de su vida útil.

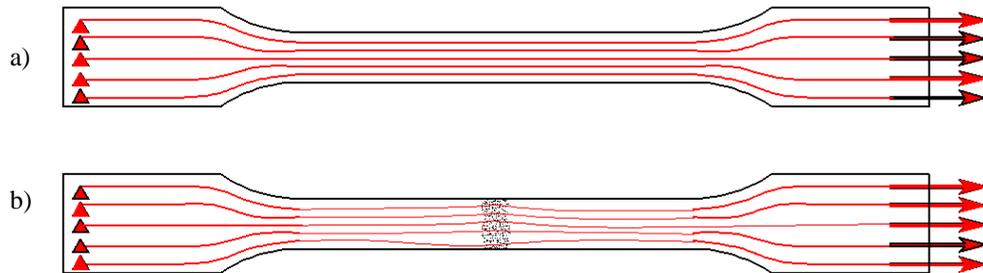


Figura 1.1

Trayectoria de las líneas de esfuerzo entre a) una pieza completa y homogénea y b) una pieza con una unión soldada.

Por lo tanto, el estudio de la deformación de las uniones soldadas nos permite calcular estos factores de concentración de esfuerzos sobre la superficie alrededor de la soldadura que van a modificar el esfuerzo admisible o de trabajo de los elementos mecánicos para que sean utilizados por el ingeniero de diseño.

1.2. Análisis mecánico de la deformación.

La mecánica de materiales considera a los cuerpos mecánicos como deformables, de esta consideración, se establecerán algunos conceptos los cuales son útiles en la discusión que ocupa la presente tesis; se tienen conceptos como los siguientes que a continuación se mencionan.

Las *fuerzas externas* que actúan sobre los cuerpos mecánicos se les denomina como *cargas*, y las fuerzas que los mantiene en equilibrio se llaman *reacciones*. Las fuerzas que se transfieren y distribuyen dentro del elemento mecánico se les denomina *esfuerzos* y son de dos tipos: *el esfuerzo total* y *el esfuerzo unitario*. El primero es un promedio del total de las fuerzas internas en una sección de la muestra mecánica; y el segundo y más importante para el análisis mecánico de la deformación en soldaduras, es un valor intensivo local sobre una sección transversal de la muestra mecánica independiente del tamaño o masa del sistema. Para casos prácticos se define el

esfuerzo como la cantidad de fuerza perpendicular sobre unidad de área en la que actúa, Ec. [1]:

$$\sigma = \frac{dF}{dA}. \quad [1]$$

La *deformación* se define como el cambio de forma y dimensión de la pieza mecánica que está sometida a las fuerzas externas. La deformación se pueden clasificar en: *deformación total* y *deformación unitaria* ε ; la primera considera el cambio de dimensión directamente en la pieza mecánica, esto es cuánto a aumentado o disminuido la dimensión lineal; y el segundo, con respecto a su dimensión original y dirección de la deformación⁽²⁾. Así que es fácil darse cuenta que no puede haber deformación de un punto dado dentro o en la superficie de un cuerpo sin que este se halla desplazado.

Haciendo un análisis más profundo, supongamos un pequeño volumen diferencial $dx dy dz$ que está sometido a varias fuerzas externas de tal manera que este equilibrado estáticamente; un punto P dentro del volumen diferencial se está desplazando hasta la posición P' , sean u , v y w los desplazamientos de este punto en dirección paralela al sistema de coordenadas x , y y z respectivamente; según la figura 1.2, el desplazamiento de los puntos adyacentes a P , A y B a lo largo de los ejes coordenados en el plano xy son:

$$\text{Para } A \text{ a lo largo de } x, u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$$

$$\text{Para } A \text{ a lo largo de } y, v + \frac{\partial v}{\partial x} dx$$

[2]

$$\text{Para } B \text{ a lo largo de } x, u + \frac{\partial u}{\partial y} dy$$

$$\text{Para } B \text{ a lo largo de } y, v + \frac{\partial v}{\partial y} dy$$

Se observa que en el segmento PA de la figura 1.2 el incremento de longitud después de la deformación a lo largo del eje x es $\frac{\partial u}{\partial x} dx$, donde la deformación unitaria es $\frac{\partial u}{\partial x}$; entonces la deformación unitaria del punto P a lo largo de x , y y z , se puede calcular respectivamente a partir del conjunto de ecuaciones no. [3]:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \quad [3]$$

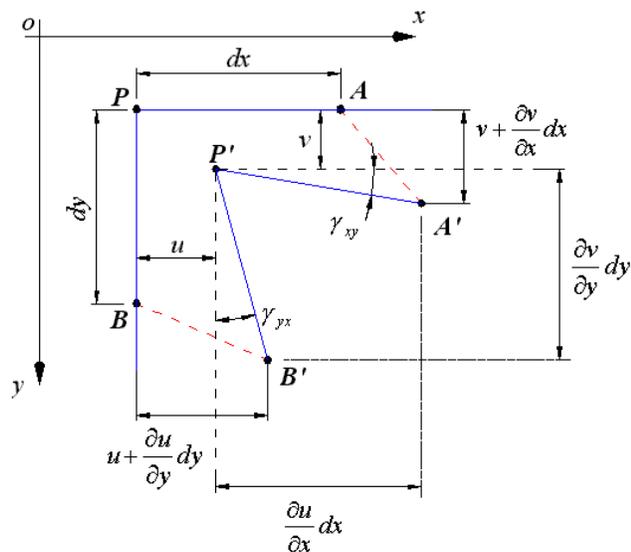


Figura 1.2

Desplazamientos de los puntos P , A y B

Por otro lado, podemos observar a partir de la figura 1.2, que el ángulo APB ha disminuido hasta $A'P'B'$. De manera similar podemos obtener la deformación unitaria angular⁽³⁾ con el conjunto de ecuaciones no. [4]:

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\end{aligned}\quad [4]$$

La ecuación de Hook relaciona el esfuerzo con la deformación unitaria ε y el modulo de Young E , en la zona elástica del material mediante la relación:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad [5]$$

de esta manera podemos relacionar el esfuerzo al que está sometido una pieza mecánica a tensión uniaxial con solo observar sus desplazamientos en el eje y de nuestro sistema óptico:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}. \quad [6]$$

Para el análisis de la deformación en uniones soldadas, las soldaduras se han hecho a tope como lo muestra la figura 1.3, se llama *garganta*, al espesor de la soldadura y se definirá como *junta* la unión soldada cuyas dimensiones son de 12.7 mm por 1 mm de separación entre placas. El *material base* es el material que se esta uniendo, en este caso, de acero comercial tipo *A36* cuyo módulo de elasticidad está definido por $E=206.8 \text{ GPa}$. El *aporte* es el material de la soldadura que se utiliza en la unión, las probetas están soldadas con electrodos comerciales tipo *E7010* de $1/8''$ de diámetro. La figura 1.4 muestra las dimensiones de las probetas utilizadas.

Por lo tanto, para determinar el esfuerzo presente en una junta se debe medir la deformación unitaria uniaxial. Un interferómetro es la herramienta que se utilizará para este propósito.

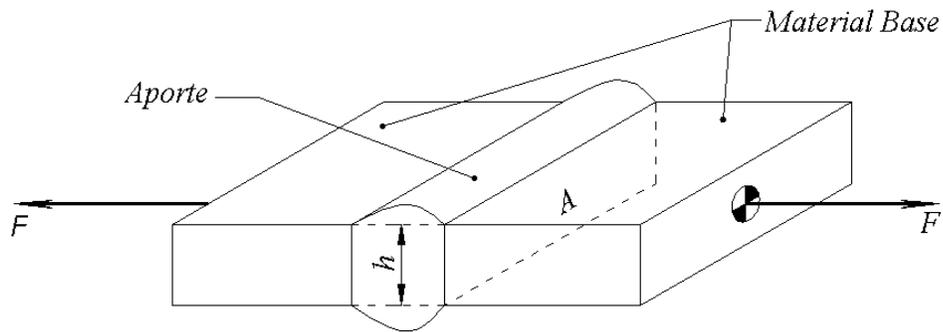


Figura 1.3

Junta típica a tope. h es el espesor de la garganta, A es el área transversal, F es la fuerza aplicada

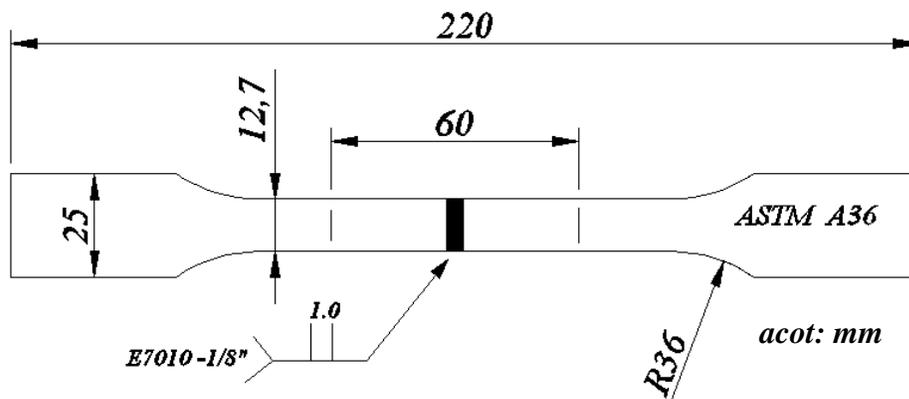


Figura 1.4

Dimensiones de las probetas utilizadas.

1.3. Utilización de la luz en la metrología: interferencia óptica

A partir de la ecuación de onda (ec. [7]) para un campo electromagnético A , una solución a la ec. [8], es la de una onda plana viajando a través del espacio representado por la ec. [8]; \vec{k} se define como el vector de onda y \vec{d} es el vector de su desplazamiento, w está relacionado con la frecuencia ν (frecuencia angular del haz de luz), ec [9] y [10]; t es el tiempo y φ es una constante que adelanta o retrasa la fase.

$$\nabla^2 A = \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t^2} A \quad [7]$$

$$A(r, t) = a_0 e^{i(-\omega t + \vec{k} \cdot \vec{d} + \phi)} \quad [8]$$

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad [9]$$

$$\omega = 2\pi\nu \quad [10]$$

Cuando dos o más ondas electromagnéticas se superponen, se presenta el fenómeno de interferencia óptica la cual puede ser observada y medida a través de la irradiancia.

La irradiancia o intensidad de una onda está dado por el promedio del producto entre la amplitud de la onda y su conjugado, ec. [11].

$$I(t) = \langle A(t)A^*(t) \rangle \quad [11]$$

Un sensor de irradiancia, como puede ser una cámara CCD, le es prácticamente imposible poder medir la irradiancia instantáneamente; las lecturas que obtiene el sensor las calcula integrando en un lapso de tiempo regular T_m a $A(t)$ de la siguiente manera:

$$I = \lim_{T_m \rightarrow \infty} \frac{1}{T_m} \int_{-T_m/2}^{T_m/2} A(t')A^*(t')dt' \quad [12]$$

Haciendo simplificaciones y considerando que los tiempos de integración T_m son periódicos y constantes podemos simplificar la ec. [12] para un solo haz de luz como:

$$I = |A|^2 \quad [13]$$

En el caso de la interferencia de dos haces, la ec. [13] se convierte en:

$$\begin{aligned}
 I &= (A_1 + A_2)(A_1^* + A_2^*) \\
 &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1^2 a_2^2 \cos(\phi_1 - \phi_2)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

donde:

$$\phi = [-\omega t + (\vec{k} \cdot \vec{d}) + \varphi]
 \tag{15}$$

Los dos primeros términos de la ecuación [14], a_1^2 y a_2^2 representan ruido de fondo y dependen exclusivamente de la intensidad de las fuentes de iluminación, la tercera parte de la ecuación, $2a_1^2 a_2^2 \cos(\phi_1 - \phi_2)$, depende exclusivamente de las fases relativas de la iluminación y lleva consigo la información que tratamos de analizar.

La ec. [14] se puede describir de la forma:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi).
 \tag{16}$$

El contraste de las franjas de interferencia detectada por el sensor, puede evaluarse por medio de la visibilidad:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}
 \tag{17}$$

1.4. Vector de Sensibilidad

1.4.1. Vector de sensibilidad para un interferómetro fuera de plano con un haz de iluminación

Si un punto p de una superficie se desplaza cierta cantidad debido a una deformación, entonces la nueva distancia entre ese punto y la referencia cambia con respecto a la distancia original. Por otro lado, la distancia que recorre un haz de luz desde la fuente hacia el punto p también cambia. Aquí podemos definir un concepto muy importante en la metrología óptica: a la diferencia en número de ondas medida en radianes de las dos distancias del punto sobre la superficie con respecto a la fuente de iluminación se le conoce como la *diferencia de camino óptico (DCO)* representado por el símbolo δ . La fase óptica $\Delta\phi$ está relacionada con δ y está dado por ⁽⁴⁾:

$$\Delta\phi(p) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(p). \quad [18]$$

Si una superficie iluminada se deforma, cada punto tendrá un diferente δ con respecto a la fuente de iluminación y también, con respecto a un observador situado en otro punto distinto a la fuente. Consideremos la figura 1.5, cuando un objeto se deforma, cada punto de la superficie se desplaza y tiene un distinto δ dado por la ec. [18]. La fase $\Delta\phi$ está relacionada también por la intensidad en la ec. [16]. Sean la fuente de iluminación $S(x_s, y_s, z_s)$ y el punto de observación $B(x_b, y_b, z_b)$. Considerando un punto sobre la superficie de un objeto el cual se desplaza desde $P_1(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})$ hasta $P_2(x_{p2}, y_{p2}, z_{p2})$; entonces, el vector de desplazamiento \vec{d} se calcula por una simple substracción vectorial entre P_2 y P_1 :

$$\vec{d}_{P_1P_2} = \vec{P}_2 - \vec{P}_1 \quad [19]$$

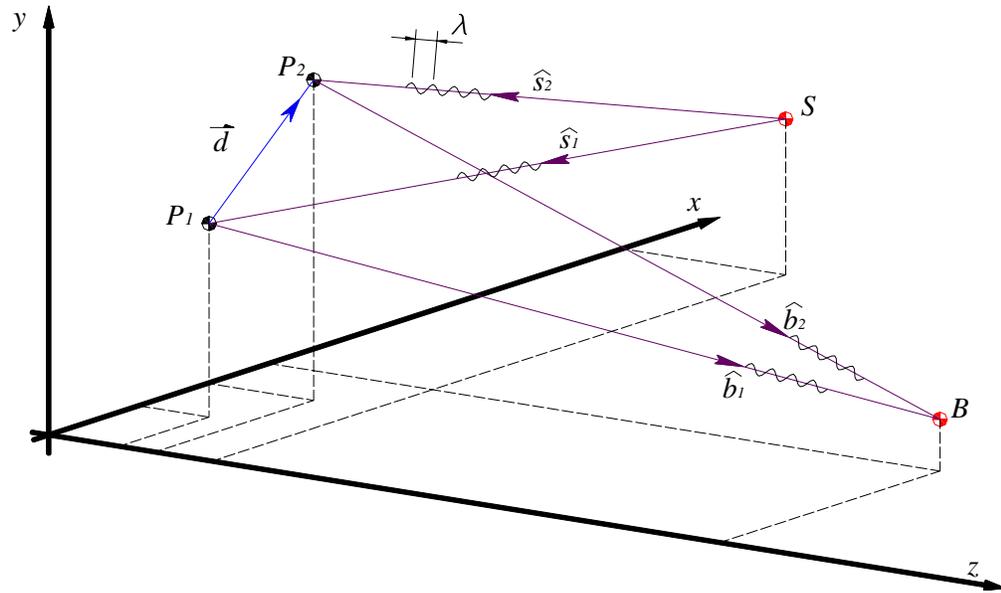


Figura 1.5

Esquema para la obtención del vector de sensibilidad.

Como δ es la diferencia entre la distancia que recorre la luz desde la fuente hasta el punto de observación pasando primero por P_1 y después por P_2 , la δ se puede expresar como⁽⁵⁾:

$$\begin{aligned} \delta(P_1) &= (\overline{SP_1} + \overline{P_1B}) - (\overline{SP_2} + \overline{P_2B}) \\ &= [\hat{s}_1 \cdot |\overline{SP_1}| + \hat{b}_1 \cdot |\overline{P_1B}|] - [\hat{s}_2 \cdot |\overline{SP_2}| + \hat{b}_2 \cdot |\overline{P_2B}|] \end{aligned} \quad [20]$$

por otro lado, consideremos los bisectores para los vectores unitarios como:

$$\begin{aligned} \bar{s}(P_1, P_2) &= \frac{1}{2} [\hat{s}_1(P_1) + \hat{s}_2(P_2)] \\ \bar{b}(P_1, P_2) &= \frac{1}{2} [\hat{b}_1(P_1) + \hat{b}_2(P_2)] \end{aligned} \quad [21]$$

y además también consideremos la mitad de la diferencia de los vectores unitarios como:

$$\begin{aligned}\Delta\hat{s}(P_1, P_2) &= \frac{1}{2}[\hat{s}_1(P_1) - \hat{s}_2(P_2)] \\ \Delta\hat{b}(P_1, P_2) &= \frac{1}{2}[\hat{b}_1(P_1) - \hat{b}_2(P_2)]\end{aligned}\quad [22]$$

Aplicando las ecuaciones [21], [22] en [20] encontramos:

$$\begin{aligned}\delta(P_1) &= (\bar{s} + \Delta\bar{s}) \cdot \overline{SP_1} + (\hat{b} + \Delta\hat{b}) \cdot \overline{P_1B} - (\bar{s} - \Delta\bar{s}) \cdot \overline{SP_2} - (\hat{b} - \Delta\hat{b}) \cdot \overline{P_2B} \\ &= \hat{b} \cdot \vec{d} - \bar{s} \cdot \vec{d} + \Delta\hat{b} \cdot (\overline{P_1B} + \overline{P_2B}) + \Delta\bar{s} \cdot (\overline{SP_1} + \overline{SP_2})\end{aligned}\quad [23]$$

Puesto que el producto punto de dos vectores perpendiculares es cero, la ec. [23] se puede simplificar de tal modo que:

$$\delta(P) = \vec{d}(P) \cdot [\hat{b}(P) - \bar{s}(P)].\quad [24]$$

Introduciendo en la ec. [18] encontramos que la fase óptica está en función del desplazamiento del punto P y de los vectores unitarios de la fuente de iluminación y de observación:

$$\Delta\phi(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{b}(P) - \bar{s}(P)] \cdot \vec{d}(P)\quad [25]$$

de la ec. [25] podemos definir matemáticamente el vector de sensibilidad⁽⁶⁾.

$$\vec{e}(P) = \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{b}(P) - \bar{s}(P)]\quad [26]$$

1.4.2. Para dos haces de luz

La figura 1.6 considera una superficie iluminada simétricamente con respecto al eje óptico por dos fuentes S_1 y S_2 , el observador B se encuentra en el eje óptico:

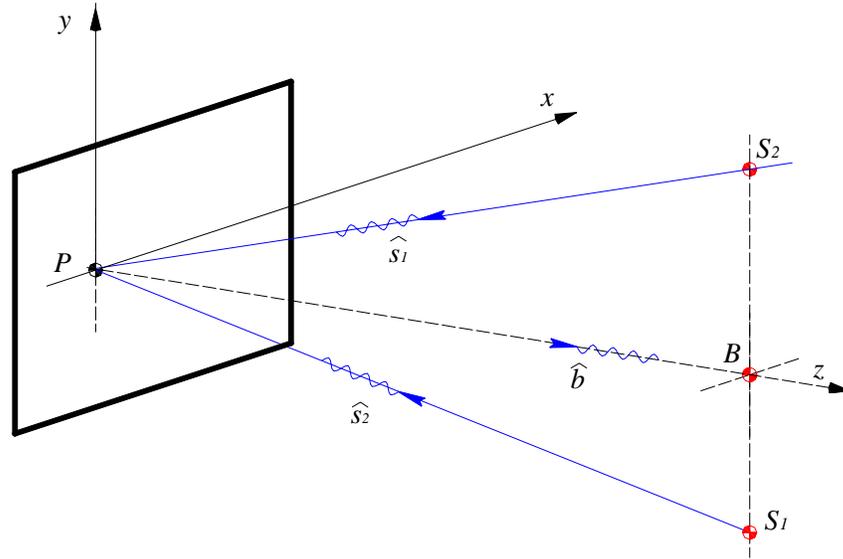


Figura 1.6

Esquema para el vector de sensibilidad para iluminación dual.

El vector de sensibilidad respectivamente para cada haz de iluminación de las fuentes S_1 y S_2 es⁽⁵⁾:

$$\begin{aligned} \bar{e}_1(P) &= \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{b}(P) - \hat{s}_1(P)] \\ \bar{e}_2(P) &= \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{b}(P) - \hat{s}_2(P)] \end{aligned} \quad [27]$$

por superposición, tomando la diferencia entre los vectores de sensibilidad e_1 y e_2

$$\begin{aligned} \bar{e}(P) &= \bar{e}_2(P) - \bar{e}_1(P) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [\hat{s}_1(P) - \hat{s}_2(P)] \end{aligned} \quad [28]$$

En este caso, el vector de sensibilidad no depende del vector de observación, pero si depende de la forma del objeto y de la posición de las fuentes.

Denotando como (x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}) y (x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}) las coordenadas de las fuentes de iluminación S_1 y S_2 respectivamente y por (x_p, y_p, z_p) las coordenadas de un punto sobre el plano iluminado de un objeto, entonces, Los vectores unitarios de iluminación de cada fuente están dados por:

$$\hat{s}_1(\mathbf{P}) = \frac{1}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} \begin{bmatrix} x_p - x_{s1} \\ y_p - y_{s1} \\ z_p - z_{s1} \end{bmatrix} \quad [29]$$

$$\hat{s}_2(\mathbf{P}) = \frac{1}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \begin{bmatrix} x_p - x_{s2} \\ y_p - y_{s2} \\ z_p - z_{s2} \end{bmatrix}$$

Substituyendo la ec. [29] en la ec. [28] se obtiene las componentes del vector de sensibilidad ⁽⁷⁾:

$$e_x(\mathbf{P}) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{x_p - x_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{x_p - x_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right]$$

$$e_y(\mathbf{P}) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{y_p - y_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{y_p - y_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right]$$

$$e_z(\mathbf{P}) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{z_p - z_{s1}}{\sqrt{(x_p - x_{s1})^2 + (y_p - y_{s1})^2 + (z_p - z_{s1})^2}} - \frac{z_p - z_{s2}}{\sqrt{(x_p - x_{s2})^2 + (y_p - y_{s2})^2 + (z_p - z_{s2})^2}} \right]$$

[30]

Donde la magnitud del vector de sensibilidad es la raíz cuadrada de la suma al cuadrado de los componentes del vector de sensibilidad:

$$|\bar{e}(\mathbf{P})| = \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2} \quad [31]$$

Por último, la relación que existe entre la fase obtenida en los interferogramas $\phi(x, y)$ y el vector de desplazamiento $\vec{d}(x, y, z)$ en un punto $P = P(x_p, y_p, z_p)$ está dado por:

$$\Delta\phi(P) = [\vec{e}(P) \cdot \vec{d}(P)] \quad [32]$$

1.5. Referencias

- (1) Robert L. Norton, “*Diseño de máquinas*”, Ed. Prentice Hall, 1998. pag. 310
- (2) José de Jesús Mayagoitia Barragán, “*Tecnología e ingeniería de materiales*”, Ed. Mc Graw Hill, primera edición, pg.66.
- (3) Stephen Timoshenko, “*Theory of elasticity*”, Ed. McGraw-Hill College, 1970
- (4) Amalia Martínez, *Tesis Doctoral*, Centro de Investigaciones en Óptica AC, Diciembre 2001, León Guanajuato.
- (5) Thomas Kreis, “*Holographic Interferometry, Principles and methods*”, Ed. Akademie Verlag, Berlin, 1996; pg 72.
- (6) Thomas Kreis, “*Holographic Interferometry, Principles and methods*”, Ed. Akademie Verlag, Berlin, 1996; pg 73.
- (7) Amalia Martínez, R. Rodríguez-Vera, J.A. Rayas, H.J. Puga. “*Error in the measurement due to the divergence of the object illumination wave front for in-plane interferometers*” *Optics Comm.* 223 (2003), 239-246.

2. El fenómeno del speckle

2.1. Introducción

La coherencia espacial de la luz láser nos ofrece un interesante fenómeno: cuando la luz láser incide en una superficie rugosa, su reflexión o transmisión da una apariencia granular; es decir, con un efecto de moteado, (*Speckle* en inglés). Estas motas varían de tamaño y posición dependiendo la posición del observador.

Antes de la invención del láser, este fenómeno se consideraba como simple ruido observado en fotografías y superficies rugosas debido a la coherencia temporal y espacial de algunas fuentes de iluminación monocromáticas. Alrededor de los años de 1970, ya con luz láser, se empezó a reportar la utilización de este ruido con fines de medición; así se empezó a crear las técnicas de la interferencia de speckle o moteado⁽¹⁾.

El efecto de moteado ocurre cuando luz monocromática altamente coherente espacialmente, con longitud de onda λ constante, es esparcida por una superficie cuya rugosidad produce interferencia entre unos trenes de ondas con otras. La figura 2.1 muestra dos fotografías de este fenómeno con dos diferentes fuentes de iluminación láser.

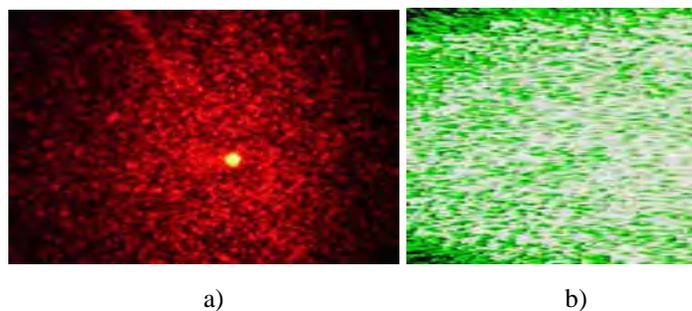


Figura 2.1

Patrones de moteado con iluminación láser, a) láser He-Ne de 632.8 nm sobre un vidrio esmerilado y b) láser de 532.2 nm sobre una placa de aluminio con un terminado semipulido.

2.2. Explicación del fenómeno de speckle

Como se mencionó anteriormente, el efecto de moteado se produce por la dispersión de un haz de luz coherente sobre la rugosidad de la superficie, figura 2.2, creando puntos brillantes y oscuros que son fácilmente visibles. Solo se puede ver en superficies cuya rugosidad e imperfecciones sean mayores a la longitud de onda λ de la luz empleada.

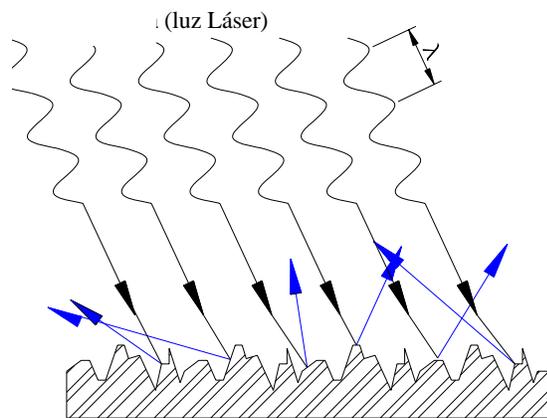


Figura 2.2

Reflexión de la luz láser por una superficie rugosa.

De acuerdo al principio de Huygens, cada punto en un frente de onda en propagación, emite un tren de ondas esféricas de tal modo que después de cierto tiempo, el frente de onda estará formado por la envolvente del tren de estas ondas esféricas. Cuando la envolvente del frente de onda incide sobre una superficie, cada punto de la superficie iluminada emite una onda secundaria de forma⁽²⁾:

$$E_n(r_n) = \frac{1}{r_n} E_{0n} e^{i(k \cdot r_n + \phi_n)} \quad [1]$$

y para el punto B de la superficie S de la figura 2.3, la suma de todas las ondas esta definido como:

$$E(B) = \sum_n \frac{1}{r_n} E'_{0n} e^{i(k \cdot r_n + \phi_n)} \quad [2]$$

Aplicando la teoría del límite central de probabilidad y considerando que la amplitud y la fase de cada tren de onda es independiente una de otra, y además que la fase esta comprendida entre los valores de $[-\pi$ y $\pi]$ se encuentra que:

$$E_n(r_n) = \frac{1}{\sqrt{N}} |E_{0n}| e^{i(\phi_n)} \quad [3]$$

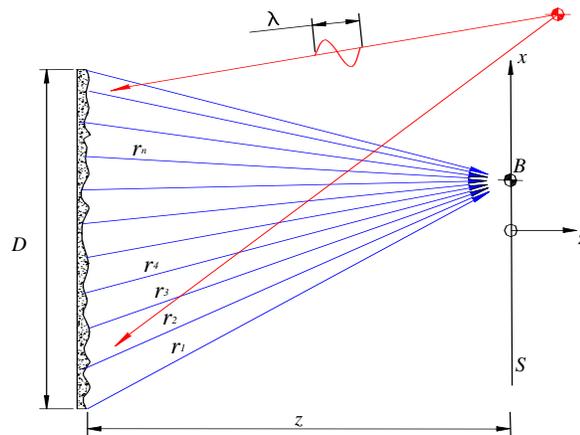


Figura 2.3

Formación de una mota sobre un plano

Donde N representa el total de trenes de onda incidentes en la superficie S . Además, supondremos más adelante que la amplitud $\frac{1}{\sqrt{N}} |E_{0n}|$ y la fase ϕ_n son estadísticamente independientes debido a que la rugosidad de la superficie tiene un patrón no uniforme y la fase esta distribuida entre los valores de $[-\pi, \pi]$.

La parte real e imaginaria de la ec. [3] son:

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}\{E_n\} &= E_r = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N |E_{0n}| \cos(\phi_n) \\ \operatorname{Im}\{E_n\} &= E_{im} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N |E_{0n}| \sin(\phi_n)\end{aligned}\quad [4]$$

Observemos que el promedio de las amplitudes E_r y E_{im} es igual a cero porque la fase varía de $-\pi$ hasta π . Calculando ahora la varianza y la correlación, y recordando las propiedades de ortogonalidad de las funciones trigonométricas:

$$\begin{aligned}\langle \cos \phi_a \cos \phi_b \rangle &= \langle \sin \phi_a \sin \phi_b \rangle = \begin{cases} \frac{1}{2} : a = b \\ 0 : a \neq b \end{cases} \\ \langle \cos \phi_a \sin \phi_b \rangle &= \langle \sin \phi_a \cos \phi_b \rangle = 0\end{aligned}\quad [5]$$

podemos calcular la amplitud del Speckle:

$$\begin{aligned}\langle E_r^2 \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \langle |E_{0n}| |E_{0m}| \rangle \langle \cos(\phi_n) \cos(\phi_m) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \langle |E_{0n}|^2 \rangle \\ \langle E_{im}^2 \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \langle |E_{0n}| |E_{0m}| \rangle \langle \sin(\phi_n) \sin(\phi_m) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \langle |E_{0n}|^2 \rangle \\ \langle E_r E_{im} \rangle &= 0\end{aligned}\quad [6]$$

Ahora, aplicando el teorema de la varianza considerando que $N \rightarrow \infty$ y que E_r y E_{im} tienen un perfil gaussiano, encontramos que la densidad poblacional es⁽³⁾:

$$P_{r,im}(E_r, E_{im}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{E_r^2 + E_{im}^2}{2\sigma^2}} \quad [7]$$

y la varianza queda expresada como:

$$\sigma^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \langle |E_{0n}|^2 \rangle \quad [8]$$

Puesto que la intensidad I y la fase ϕ son independientes una de otra debido a la naturaleza rugosa de la superficie iluminada, el campo resultante esta compuesto por la parte real y la imaginaria, esto es:

$$\begin{aligned} E_r &= \sqrt{I} \cos \phi \\ E_{im} &= \sqrt{I} \sin \phi \end{aligned} \quad [9]$$

Considerando lo anterior, entonces introduciendo la ec. [9] en la ec. [7] y tomando en consideración la ec. [5], obtenemos:

$$\begin{aligned} P_{r,im}(E_r, E_{im}) &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(\sqrt{I} \cos \phi)^2 + (\sqrt{I} \sin \phi)^2}{2\sigma^2}} \\ &= P_{r,im}(I, \phi) \\ &= \begin{cases} \frac{1}{4\pi\sigma^2} e^{-\frac{I}{2\sigma^2}} & \text{para } [I \geq 0] \text{ y } [-\pi \leq \phi \leq \pi] \\ 0 & \text{para cualquier otro valor} \end{cases} \end{aligned} \quad [10]$$

Para conocer qué parte corresponde a la intensidad del speckle y qué parte a la fase, consideramos que la ec. [10] puede considerarse estar compuesta por dos funciones independientes puesto que I y ϕ son también independientes:

$$P_{I,\phi}(I, \phi) = p_I(I) p_\phi(\phi) \quad [11]$$

e integrando cada función en sus limites:

$$\begin{aligned} p_I(I) &= \int_{-\pi}^{\pi} p_{I,\phi}(I, \phi) d\phi = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{I}{2\sigma^2}} & \text{para } I \geq 0 \\ 0 & \text{para todo lo demás.} \end{cases} \\ p_\phi(\phi) &= \int_0^\infty p_{I,\phi}(I, \phi) dI = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{para } -\pi \leq \phi \leq \pi \\ 0 & \text{para todo lo demás.} \end{cases} \end{aligned} \quad [12]$$

De los resultados de la ec. [12] podemos observar que la fase del patrón de speckle es constante y que la intensidad en el patrón disminuye exponencialmente.

El promedio de la intensidad es $\langle I \rangle = 2\sigma^2$ y a partir de la varianza de σ podemos determinar la visibilidad o contraste V del patrón de speckle mediante:

$$V = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} \quad [13]$$

Para determinar el tamaño de una mota, supongamos que el punto B en la superficie S de nuestro sensor llega dos haces de luz de diferentes regiones de nuestro objeto cuando es iluminado por luz láser en un diámetro D . La figura 2.3 nos muestra este arreglo.

Puesto que en B se interceptan los dos haces (y que pudieran ser muchos más de la superficie en D) podemos suponer que un haz llega primero que otro. Por lo tanto la diferencia de fase será⁽⁴⁾:

$$\Delta\phi = 2\pi f x = \frac{2\pi D}{\lambda z} x \quad [14]$$

Donde f es la frecuencia espacial del patrón de interferencia. La frecuencia máxima será:

$$f_{\max} = \frac{D}{\lambda z} \quad [15]$$

por lo tanto el periodo de la mota de la figura 2.3 será el tamaño mínimo de la mota observada:

$$\sigma_0 = \frac{\lambda z}{D} \quad [16]$$

Para un sistema óptico se debe considerar la difracción; según Goodman J.W. en su artículo⁴ “Statical propieties of laser speckle patterns”, el tamaño se puede considerar como la separación que existe entre los dos primeros mínimos de la función Bessel de primer orden J_1 esto es cuando $J_1(x)=0$ y cuando $x=1.22\pi$, esto quiere decir que el tamaño depende del límite de difracción del sistema óptico. A partir de la relación de autocorrelación para un sistema óptico compuesto con lentes:

$$R(r) = \langle I \rangle^2 \left\{ 1 + \left| \frac{2J_1\left(\frac{\pi Dr}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi Dr}{\lambda z}} \right|^2 \right\} \quad [17]$$

donde D es el diámetro de la iluminación, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ y $R(r)$ es la intensidad de la mota observable, la separación esta dada por:

$$\sigma_0' = \frac{2.44\lambda z}{D} \quad [18]$$

La figura 2.4 muestra gráficamente lo dicho por la ec. [17] y [18]:

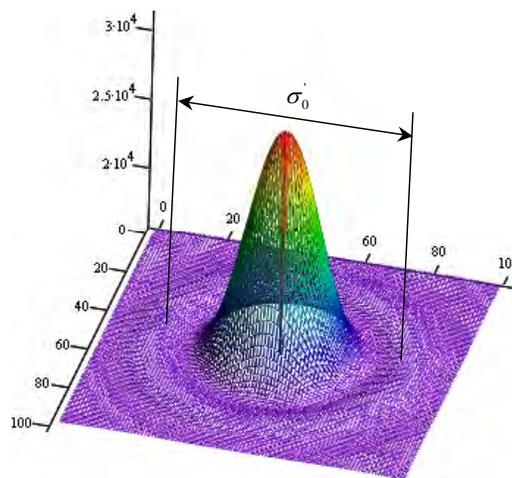


Figura 2.4

Tamaño de una mota

$D=2 \text{ mm}$, $z=1000 \text{ mm}$, $\lambda=442 \text{ nm}$, $I=127$

La amplificación también modifica el tamaño de la mota registrada. Para la figura 2.5 podemos escribir el tamaño de la mota proyectada sobre una superficie debido a una lente.

El tamaño de la mota será:

$$\sigma_s = \frac{1.22\lambda b}{D} \quad [19]$$

Introduciendo la definición de apertura numérica para el lente: $F \equiv \frac{f_L}{D}$, donde f_L es la distancia focal de la lente, obtenemos:

$$\sigma_s = 1.22\lambda F(1+m) \quad [20]$$

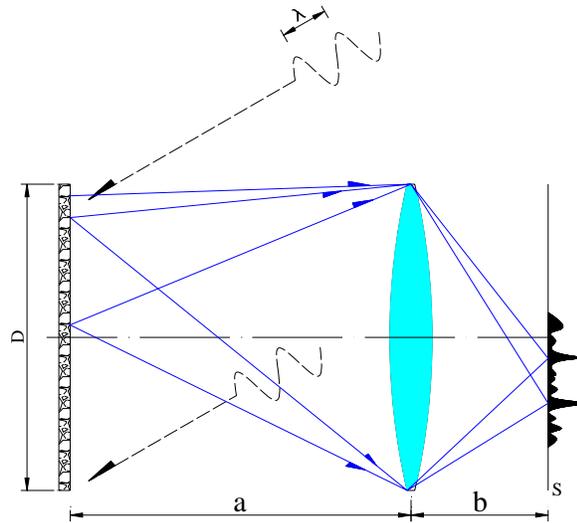


Figura 2.5

Formación de una imagen de patrón de motas sobre un plano

Donde m es la amplificación dado por⁽⁵⁾:

$$m = \frac{(b - f_L)}{f_L} \quad [21]$$

Como comentarios a la formación de speckle, podemos decir que este fenómeno no puede ser explicado por la óptica geométrica puesto que para ella, cada punto del objeto le corresponde un punto en la imagen. Paradójicamente, el tamaño de la mota observada en un sistema óptico, no depende de la rugosidad de la superficie iluminada sino del sistema óptico. El efecto de moteado está formado por la interferencia espacial y existe en cualquier punto entre la lente y su distancia focal.

Por lo tanto, mientras que un objeto tiene su imagen en un sistema de lentes, un patrón de speckle no.

2.3. La Interferometría del speckle

La interferometría ocurre cuando dos haces de luz se interfieren entre ellos; en el caso de speckle, dos patrones también pueden interferir. Con las nuevas tecnologías de cámaras digitales es posible realizar operaciones entre imágenes casi instantáneamente y evitar así los largos tiempos que se toman los procesos de revelado fotográfico y holográfico. La interferometría de speckle obtenida por superposición de dos imágenes antes y después de un cambio dimensional en el objeto no contienen las clásicas franjas de interferencia óptica puesto que la fase de cada mota es estadísticamente independiente, sin embargo, cada mota en una imagen puede interferir con su correspondiente en la otra imagen. Por lo tanto la interferometría del speckle se puede tratar muy similar como si se tratara de la interferencia óptica clásica. La fase del patrón de speckle se considera como un promedio variablemente distribuida en la imagen en el rango de $[0, 2\pi]$ ⁽⁶⁾.

Para entender esto, el procedimiento para esta técnica es como sigue: supongamos que dos haces iluminan un objeto, entonces la intensidad luminosa en el objeto será la suma de ambas:

$$I_{AB}(x, y) = I_A(x, y)e^{-i\phi(x, y)} + I_B(x, y)e^{-i\phi(x, y)}. \quad [22]$$

Aplicado la identidad de Euler, podemos simplificar la ecuación anterior, sea ahora $I_1(x,y)$ la intensidad luminosa de la primera imagen que usaremos de referencia. Así que simplificando la ecuación [22] tenemos:

$$I_1(x, y) = I_A + I_B + \sqrt{2I_A I_B} \cos \phi(x, y), \quad [23]$$

donde $\phi(x,y)$ es la fase promediada del patrón de speckle de la primera imagen y que, como mencionamos, nos servirá de referencia. Una segunda imagen es tomada cuando un desplazamiento ocurre en el objeto, representada por $I_2(x,y)$. Por lo tanto, existe una variación en el promedio de la fase $\Delta\phi$ asociada con el desplazamiento y no así, en la intensidad porque ésta es independiente de la fase. La intensidad del segundo patrón de speckle será:

$$I_2(x, y) = I_A + I_B + \sqrt{2I_A I_B} \cos[\phi(x, y) + \Delta\phi] \quad [24]$$

Al substrair de la imagen de referencia, la imagen con la variación de fase y obteniendo su cuadrado, obtenemos un patrón de franjas relacionadas con el desplazamiento de la siguiente manera:

$$I(x, y) = |I_1(x, y) - I_2(x, y)|^2 = 4\sqrt{I_A I_B} \left[\sin\left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \Delta\phi\right) \right] \quad [25]$$

Amplitud o intensidad total.

Patrón de franjas de alta frecuencia asociados al speckle. Puesto que el tamaño de las motas es mayor al periodo de las franjas, este termino se considera solo ruido o speckle.

Este en un patrón de franjas de baja frecuencia que modula los términos anteriores. Este término representa las franjas observables y contienen la información asociada al desplazamiento.

Normalmente las franjas pueden representar aparte de la deformación, desplazamientos o topografía de objetos, pero eso depende del tipo de arreglo óptico que se utilice para obtener los patrones de speckle. La figura 2.8 muestra dos patrones de speckle y su interferencia.

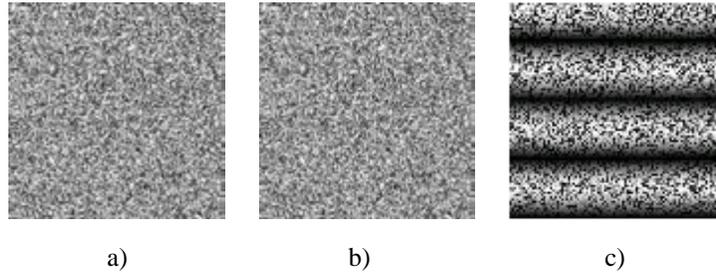


Figura 2.8

a) Imagen de referencia, b) Imagen con una variación en la fase, c) substracción

2.4 Obtención de la fase ϕ óptica

Representando de manera general el patrón de franjas la ec. [25] y despreciando el termino asociado con el ruido, El patrón de interferencia de speckle puede tener la forma⁽⁷⁾:

$$I(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\phi(x, y) + \Delta\phi]. \quad [26]$$

Ahora, la información de la deformación está implícitamente contenida en la fase ϕ . Extraer la información de la fase ϕ de la ecuación [26] requiere de un procedimiento matemático no muy complicado. Existen varios métodos con sus ventajas y desventajas de los cuales es preferible utilizar el que mejor se adapte a las condiciones físicas al y tipo de medición. Básicamente trataremos de tres técnicas para encontrar la fase que contiene la información que necesitamos: los métodos de phase stepping, el método de fourier y por último, el método directo.

2.4.1. El método de phase stepping.

Es posible conocer la fase relacionada a un desplazamiento evaluando la variación de la fase en un periodo de 2π , por lo tanto lo más fácil de hacer es evaluar la fase más unos incrementos conocido hasta que se completa el periodo de 2π . Se pueden hacer pasos de 3, 4 o más pasos de fase, de ahí el nombre de la técnica phase stepping en el idioma inglés.

A partir de la ec. [26], sea los incrementos de $\pi/2$, se requerirán 4 pasos para completar un periodo completo:

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos[\phi(x, y) + 0]. \\
 I_2(x, y) &= I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos\left[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right]. \\
 I_3(x, y) &= I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos[\phi(x, y) + \pi]. \\
 I_4(x, y) &= I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos\left[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right].
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Gráficamente, la fase se puede representar como se muestra en la figura 2.9a donde la circunferencia representa el periodo de la fase con el módulo 2π .

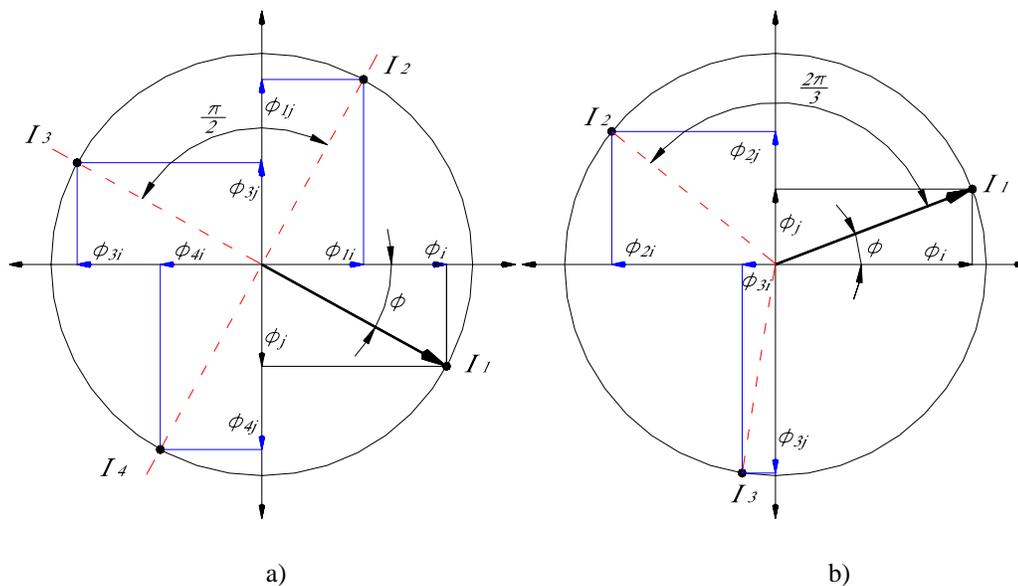


Figura 2.9

Gráficas de fase para phase stepping para a) 4 pasos donde $\Delta\phi = \pi/2$, y b) 3 pasos donde $\Delta\phi = 2\pi/3$

Para obtener la fase, recordemos que la interfase esta modulado por 2π entonces se puede poner la fase como una función trigonométrica⁽⁸⁾, según la figura 2.9:

$$\phi(i, j) = \arctan\left(\frac{\sum \phi_{nj}}{\sum \phi_{ni}}\right). \quad n = \text{número de paso} \quad [28]$$

Entonces simplificando la ec. [28] y substituyendo en la ec. [27] obtenemos la fase para un phase stepping de cuatro pasos a 90° :

$$\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad [29]$$

y para el phase stepping de 3 pasos a 120° :

$$\phi = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3}\right) \quad [30]$$

Thomas Kreis, trata con más detalle distintos tipos de phase stepping con distintos pasos en fase $\Delta\phi$.⁽⁹⁾

2.4.2. El método de Fourier

Las propiedades de la transformada de Fourier detectan la fase ϕ de un patrón de franjas en función del campo de las frecuencias espaciales. Estas frecuencias son las relacionadas con el patrón de franjas propias de la interferencia (frecuencia portadora) y por otro lado, las frecuencias asociadas con la deformación. Esencialmente, la evaluación de la transformada de Fourier de un interferograma es una serie de combinaciones lineales entre funciones espaciales armónicas dada por la ecuación [26]; esta ecuación se puede expresar en el campo complejo aplicando la identidad de Euler para el coseno, de tal manera que:

$$\begin{aligned}
I_1(x, y) &= I_A(x, y) + \frac{1}{2} I_B(x, y) \left[e^{i2\pi fx} e^{i\phi(x, y)} + e^{-i2\pi fx} e^{-i\phi(x, y)} \right] \\
&= I_A(x, y) + \frac{1}{2} I_B(x, y) e^{i\phi(x, y)} \left[e^{i2\pi fx} \right] + \frac{1}{2} I_B^*(x, y) e^{i\phi(x, y)} \left[e^{-i2\pi fx} \right]
\end{aligned} \tag{31}$$

Donde * denota el conjugado de $I_B(x, y)$, haciendo $B(x, y) = \frac{1}{2} I_B(x, y) e^{i\phi(x, y)}$,

$A(x, y) = I_A(x, y)$ y aplicando la transformada de Fourier con respecto a x , a la ec. [31] encontramos:

$$\mathfrak{F}\{I_1(x, y)\} = A(f, y) + B(f - f_0, y) + B^*(f + f_0, y) \tag{32}$$

eliminando $A(f, y)$ y $B(f - f_0, y)$ y haciendo que $f_0 = 0$ (centrando a $B^*(f - f_0, y)$), aplicando la transformada inversa de Fourier a $B^*(f, y)$ con respecto a f se obtiene la parte de $B(x, y)$, tal que despejando $\phi(x, y)$ nos da:

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{\text{Im}(B(x, y))}{\text{Re}(B(x, y))} \right] \tag{33}$$

así obtenemos la fase $\phi(x, y)$ completamente separada de las variaciones de la amplitud de la intensidad $I_B(x, y)$. La fase obtenida por este método es indeterminada por un factor de 2π . Un ejemplo de este método se observa en la figura 2.10 donde a) es un patrón de franjas simuladas de un interferograma con variaciones que simulan una deformación lineal en dirección horizontal hacia la derecha, b) es una gráfica de la intensidad $I(i, j)$ versus el número de píxel, c) muestra la transformada de Fourier para $I(i, j)$, d) muestra $I^*(i, j)$ centrada en la imagen, y por último e) gráfica de la fase ϕ obtenida mediante la transformada inversa de Fourier de la gráfica eliminando la frecuencia portadora y la del interferograma inicial (con la portadora) para comparación.

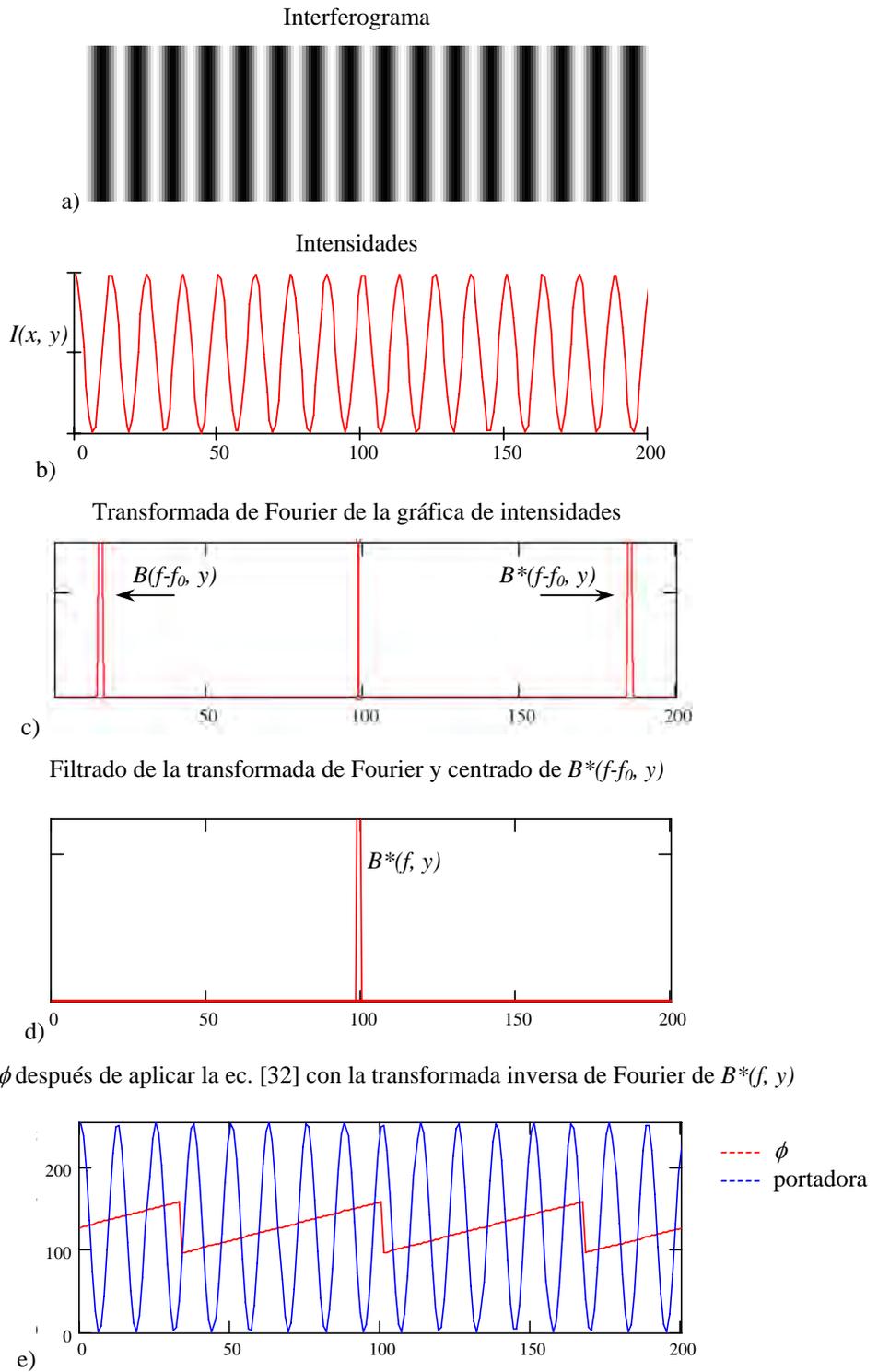


Figura 2.10

Método de obtención de la fase ϕ mediante el método de Fourier.

El método de Fourier tiene dos desventajas importantes: los filtros utilizados deben ser lo más precisos para no filtrar de más ni de menos a $B^*(f-f_0, y)$ ya que la fase recuperada podría acarrear errores en la medición y la ambigüedad de signo, puesto que la fase es indeterminada en un rango de 0 a 2π ó lo que es lo mismo de $-\pi$ a π , por lo tanto no está determinado en que cuadrante empieza la fase.

2.4.3. El método Directo

Este método solo necesita una imagen para encontrar la fase, sea $I(t)$ una imagen obtenida en una secuencia de deformación de un material de la forma:

$$I(t) = I_A(t) + I_B(t) \cos[wt + \phi(t)] \quad [34]$$

para encontrar la fase, basta con multiplicar por $\cos(wt)$ y por $\sin(wt)$ a $I(t)$:

$$\begin{aligned} I(t) \cos(wt) &= I_A(t) \cos(wt) + \frac{I_B(t)}{2} \cos[\phi(t)] + \frac{I_B(t)}{2} \cos[2wt - \phi(t)] \\ I(t) \sin(wt) &= I_A(t) \sin(wt) + \frac{I_B(t)}{2} \sin[\phi(t)] + \frac{I_B(t)}{2} \sin[2wt - \phi(t)] \end{aligned} \quad [35]$$

filtrando las altas frecuencias (wt), se obtiene:

$$\begin{aligned} C(t) &= \frac{I_B(t)}{2} \cos \phi(t) \\ S(t) &= \frac{I_B(t)}{2} \sin \phi(t) \end{aligned} \quad [36]$$

Aplicando el arco-tangente a la ec. [36] se obtiene la fase directamente.

$$\phi(t) = \arctan\left(\frac{S(t)}{C(t)}\right) \quad [37]$$

La fase obtenida por este método es de baja calidad puesto que es muy difícil filtrar adecuadamente las altas frecuencias sobre todo si wt y la fase están muy próximas. La figura 2.11 muestra un ejemplo de este método.

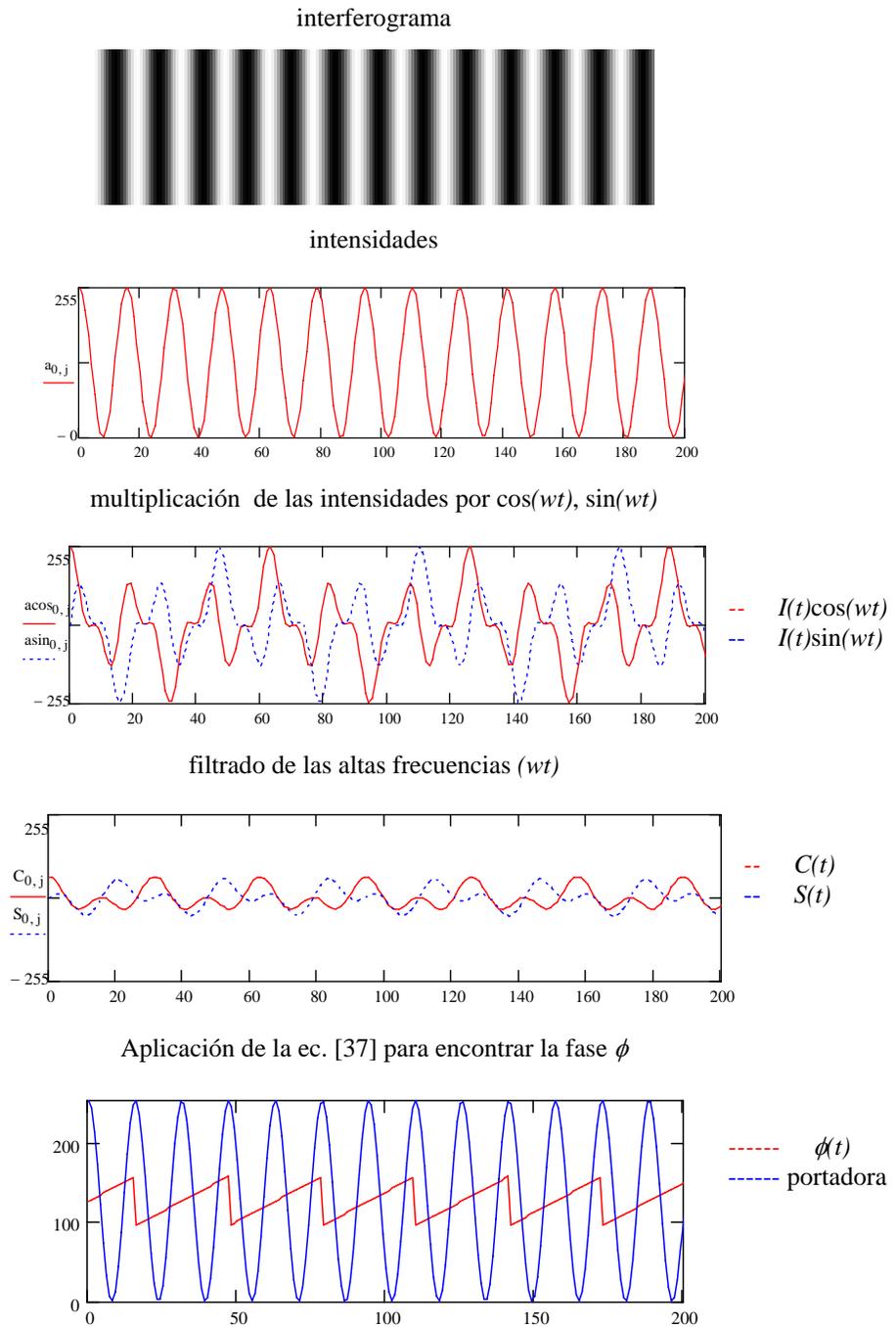


Figura 2.11

Método de obtención de la fase ϕ mediante el método directo.

2.5 Conclusiones

Lo más importante del fenómeno de speckle es que se puede registrar con cualquier dispositivo de captura de imágenes y esa imagen capturada nos revela una firma característica de la superficie iluminada. Con solo observar los cambios en el patrón de speckle y compararlos con las mismas imágenes capturadas de referencia, podemos hacer mediciones de los desplazamientos y obtener topografías en superficies iluminadas. La única restricción que ponen estos métodos, es que tanto la fuente de iluminación y la de captura deben permanecer invariantes en posición o con movimientos controlados mientras se ilumina el objeto. Otra limitante es que los desplazamientos no pueden ser excesivos porque entonces el periodo de las franjas observables superaría a la frecuencia máxima del speckle y se perdería la información.

A la pérdida de franjas por desplazamientos excesivos se le llama decorrelación del patrón de speckle, de ahí la importancia de obtener un tamaño de mota adecuado para poder detectar desplazamientos en los rangos de medición deseados sin que ocurra la decorrelación.

Entre los distintos métodos para encontrar la fase de un patrón de speckle podemos mencionar que el método preferido será el que mejor se adapte a las condiciones de medición; para objetos dinámicos o en movimiento constante, es preferible los métodos de Fourier o el método directo, la única limitante es la adecuada selección de los filtros. Para objetos estáticos o con muy poco movimiento, es preferible el método de phase stepping ya que ofrece una mejor precisión en las mediciones; además, es importante obtener los pasos en los intervalos correctos.

2.6 Referencias

-
- (1) Eugene HECHT, “*Óptica*”, Addison Wesley iberoamericana, Madrid, 2000. pg. 609.
 - (2) Thomas Kreis, “*Holographic interferometry, principles and methods*”, Akademie Verlag, Berlin, 1996, pg. 31.
 - (3) Goodman J.W. “*Statical propieties of laser speckle patterns*”, in Dainty, J.C. (ed) Topics in applied physics 9: laser Speckle and Related Phenomena, Springer Verlag, Berlin. Applied Optics, 9, 9-75, 1975.
 - (4) Kjell j. Gasvik, “*Optical Metrology*” third edition, WILEY, pg.193. N.Y.
 - (5) Kjell J. Gasvik, “*Optical Mtrology*”, ed. John Wiley & Sons, 1987, pg.149.
 - (6) C.R. Coggrave, “*Wholefield optical metrology: Surface Displacement measurement*”, a internal and institutional document from Phase Vision Ltd. [Hhttp://www.phasevision.com/H](http://www.phasevision.com/H)
 - (7) Kjell J. Gasvik, “*Optical Mtrology*”, ed. John Wiley & Sons, 1987, pg.159.
 - (8) Thomas Kreis, “*Holographic interferometry, principles and methods*”, Akademie Verlag, Berlin, 1996, pg. 126.
 - (9) Thomas Kreis, “*Holographic interferometry, principles and methods*”, Akademie Verlag, Berlin, 1996, pg. 128.

3. Simulación numérica por técnicas de elemento finito (FEA)

Una de las tareas fundamentales del ingeniero de diseño consiste en la predicción cuantitativa del comportamiento de un sistema o elemento mecánico para proceder a su diseño eficiente.

Para ello debe hacer uso de conceptos de física y matemática para formular un modelo matemático del sistema en consideración. Dicho modelo no es más que un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas representan magnitudes de interés como podrían ser las deformaciones o la distribución de temperatura, lo cual describe el comportamiento del objeto bajo análisis. Consecuentemente, para llevar a cabo la predicción en sí misma, el ingeniero debe resolver cuantitativamente un sistema de ecuaciones para dedicarse, a continuación, a la interpretación técnica y al análisis de los resultados.

En muchas situaciones, los modelos pertinentes involucran problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales y derivadas parciales⁽¹⁾. Por mencionar algunos de dichos casos pueden citarse el estudio estructural de automóviles, aviones, puentes, o el análisis de campo de flujo de calor en componentes de máquinas, flujo de fluidos, filtración en presas de tierra, etc.

Debido a la gran dificultad para obtener soluciones analíticas a las ecuaciones diferenciales y derivadas parciales, la ingeniería ha recurrido, históricamente, al uso de modelos simplificados basados en resultados experimentales, experiencia y en el mejor de los casos en unas pocas soluciones matemáticas particulares relativas a un modelo más preciso. Estos modelos simplificados constituyen la denominada "*ingeniería práctica*" y se encuentran reunidos en manuales y códigos de recomendaciones prácticas o reglamentos.

Esta metodología general de la ingeniería ha dado muy buenos resultados y aún lo sigue haciendo. No obstante, es importante notar que se trata de una metodología que presenta fuertes limitaciones en cuanto a las posibilidades de análisis, hecho que se hace más grave si se consideran las crecientes necesidades de la tecnología moderna.

La manera de trabajar del ingeniero de diseño ha ido cambiando con el advenimiento de la computación electrónica y con el desarrollo asociado de métodos computacionales. En este contexto han aparecido importantes técnicas numéricas entre las cuales se destacan los métodos de diferencias finitas, elementos de contorno y elementos finitos.

En particular, el análisis por elemento finito, FEA (*Finite Element Analysis*, por sus siglas en inglés) es el más poderoso y, en consecuencia, el más utilizado.

A continuación se realiza una somera descripción del mismo para luego comentar algunas de sus muchísimas aplicaciones en la ingeniería práctica.

3.1. Introducción básica al análisis por elemento finito

Se trata de un método general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello hace uso de la "discretización" o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas elementos finitos². Las propiedades materiales y relaciones gobernantes en estos elementos se expresan en función de los valores desconocidos en los nodos un sistema de figuras geométricas básicas que lo componen, Figura 3.1.

Una de las ventajas de este método es su facilidad de implementación en un programa computacional, que a su vez es una condición básica para su utilización ya que para el tratamiento de un problema en particular debe efectuarse un número muy elevado de operaciones para resolver sistemas algebraicos del orden de cientos o miles de ecuaciones. No obstante, esta cantidad no es una limitación con las computadoras estándar de hoy.

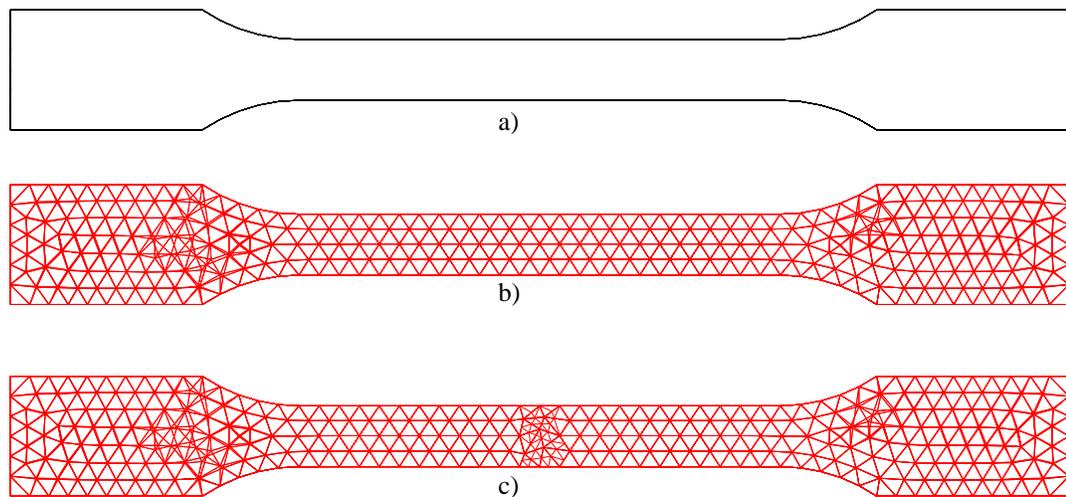


Figura 3.1

Aproximación por análisis de elemento finito de un sistema, a) contorno de una probeta mecánica, b) enmallado para una probeta sin soldadura y c) para una probeta soldada.

Las ideas básicas de este método se originaron en avances en el análisis estructural de la industria aeronáutica en la década del '50. En la década del '60 el método fue generalizado para la solución aproximada de problemas de análisis de tensión, flujo de fluidos y transferencia de calor. El primer libro sobre elementos finitos fue publicado en 1967 por Zienkiewicz y Cheung. En la década del '70 el método fue extendido al análisis de problemas no lineales de la mecánica del continuo. Hoy el método permite resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante un sistema de ecuaciones diferenciales.

En sus principios el método de los elementos finitos no llegó masivamente a la práctica de la ingeniería debido a la falta de disponibilidad de computadoras en los estudios de ingeniería y por el otro al requisito de conocimientos profundos no solamente de la técnica y de los modelos matemáticos pertinentes sino también de programación computacional. Actualmente, la situación es completamente diferente, ya que las modernas computadoras personales soportan sin inconvenientes poderosos programas de propósito general de fácil utilización.

Para tratar este tipo de problemas usamos las aproximaciones numéricas. En contraste a la solución analítica, que muestra el comportamiento exacto de un sistema en cualquier punto del mismo, las soluciones numéricas aproximan la solución exacta solo en puntos discretos o nodos.

El primer paso en cualquier procedimiento numérico es la discretización, este proceso divide el medio de interés en un numero de pequeñas subregiones y nodos, figura 3.1 b) y c).

Hay dos clases de métodos numéricos: primero, el método de las diferencias finitas y segundo, el método de los elementos finitos.

Con el método de las diferencias finitas, la ecuación diferencial es escrita para cada nodo y las derivadas son reemplazadas por ecuaciones diferenciales, con ello se logra un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas, aunque este método es fácil de entender y utilizar en problemas simples, se presentan dificultades al aplicarlo a geometrías complejas o condiciones de contorno complejas, esta situación es real para problemas con materiales con propiedades no isotópicos (que no tienen iguales propiedades en todas las direcciones).

En contraste, el método de los elementos finitos usa unas formulaciones integrales más que ecuaciones diferencias para crear un sistema de ecuaciones algebraicas, por otra parte una función continua aproximada se asume para representar la solución

para cada elemento, la solución completa se genera conectando o armando las soluciones individuales, permitiendo la continuidad de los límites interelementales.

3.1.1 Pasos básicos en el método de los elementos finitos

Se presenta los pasos básicos para el desarrollo del análisis por elementos finitos.

3.1.1.1 Fase de preprocesado

- Crear y discretizar la solución dominio en elementos finitos, esto es, subdividir el problema en nodos y elementos.
- Asumir una función que va a representar el comportamiento físico de un elemento, que es, una función continua aproximada que se asume para la solución del elemento.
- Desarrollar las ecuaciones para el elemento.
- Armar los elementos a representar en el problema completo, construir la matriz global de rigidez.
- Aplicar condiciones de contorno, condiciones iniciales y cargas.

3.1.1.2 Fase de solución

- Resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales simultáneas para obtener resultados nodales, tal como valores de desplazamientos en diferentes nodos o valores de temperaturas en diferentes nodos en un problema de transferencia de calor.

3.1.1.3 Fase de post-procesado

La obtención de más información en los puntos de interés se puede realizar modificando las condiciones iniciales, por ejemplo, los valores de tensiones o flujos de calor, mediante condiciones especiales y suposiciones.

En general hay diversos modos de enfocar el problema con los elementos finitos: primero, formulación directa; segundo, formulación usando la mínima energía potencial y por último, ponderado de las formulaciones residuales. Es importante notar que en los pasos básicos que se usan en el análisis por elementos finitos no se considera de importancia cómo se genera el modelo de figuras geométricas de los elementos finitos aunque siempre se busca la figura más simple.

3.2. La programación por el Mechanical Desktop™ de una probeta para el análisis de deformación

El Autodesk Mechanical Desktop™ es un software dedicado al diseño mecánico, es un poderoso modelador paramétrico geométrico de sólidos, ensamblajes y superficies para el diseño de partes complejas completamente integrado dentro de un procesador de gráficos del AutoCAD™.

En el modelado de piezas sólidas en 3D se pueden incluir propiedades físicas virtuales a los elementos diseñados para que sean aplicados a un análisis por elemento finito, puede realizar cálculos de deformación en 2D y 3D entre otras.

3.2.1. Modelación de una probeta mecánica

La modelación de la pieza mecánica para ensayarse empieza definiendo sus dimensiones en 3D. La figura 3.2 muestra una probeta modelada y sus dimensiones. Posteriormente, a la probeta sólida se aplica una operación de partición para formar un enmallado para el análisis por elemento finito.

La programación de parámetros se hizo considerando carga estática, los parámetros introducidos se muestra en la tabla 3.1.

Parámetro	Material	Valor	Unidades
Carga en el extremo 1		0 (fijo)	[kN]
Carga en el extremo 2		3.35; 5.15 y 7.3	[kN]
Material base	Acero A36	206.00	[GPa]
Material soldadura	Acero E6010	215.00	[GPa]
Temperatura de ensayo		20	[°C]
Tratamiento Térmico		ninguno	

Tabla 3.1

Parámetros introducidos para la prueba por FEA

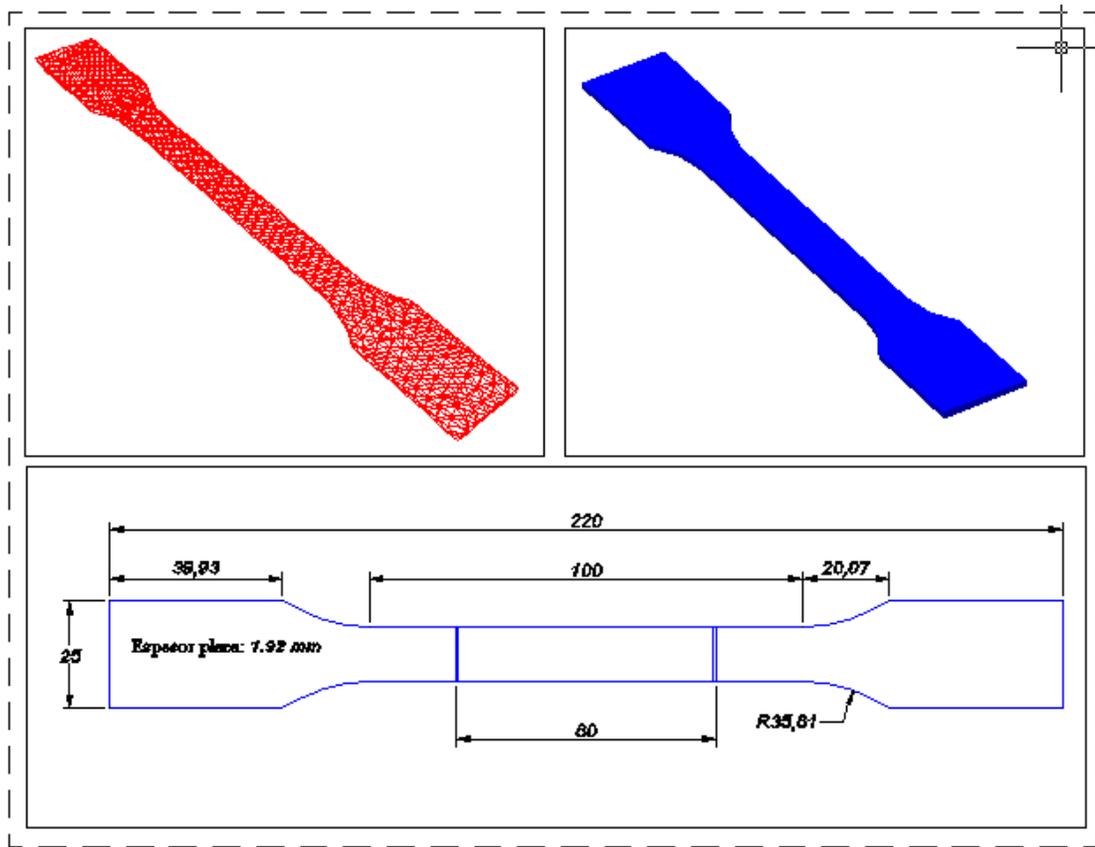


Figura 3.2

Modelación de la probeta mecánica para el análisis por FEA en 2D y 3D.

3.3. Resultados y predicciones de la simulación numérica

La simulación de la deformación se obtuvieron para una carga de 6.5 kN para la probeta soldada y la probeta no soldada. En las gráficas que se mostrarán, se observan el enmallado inicial, el enmallado deformado por la carga virtual y una escala en falso color indicando las deformaciones, la figura 3.3 muestra la deformación total de la probeta y la figura 3.4, las deformaciones para el elemento que capturará la cámara CCD.

Los resultados que se observan en la simulación predicen que se observará deformaciones de 0.16 mm a una carga de 7.3 kN y se producirán esfuerzos de 524 N/mm^2 esto corresponde a una deformación de entre 0.071 y 0.077 mm/mm en la parte central de la probeta, las deformaciones máximas, a 672 N/mm^2 , se esperarán de 0.0035 mm/mm . Desde ahora podemos decir que se espera que, en la probeta soldada, se observe una mayor deformación en los extremos y en la parte central las deformaciones serán muy parecidas.

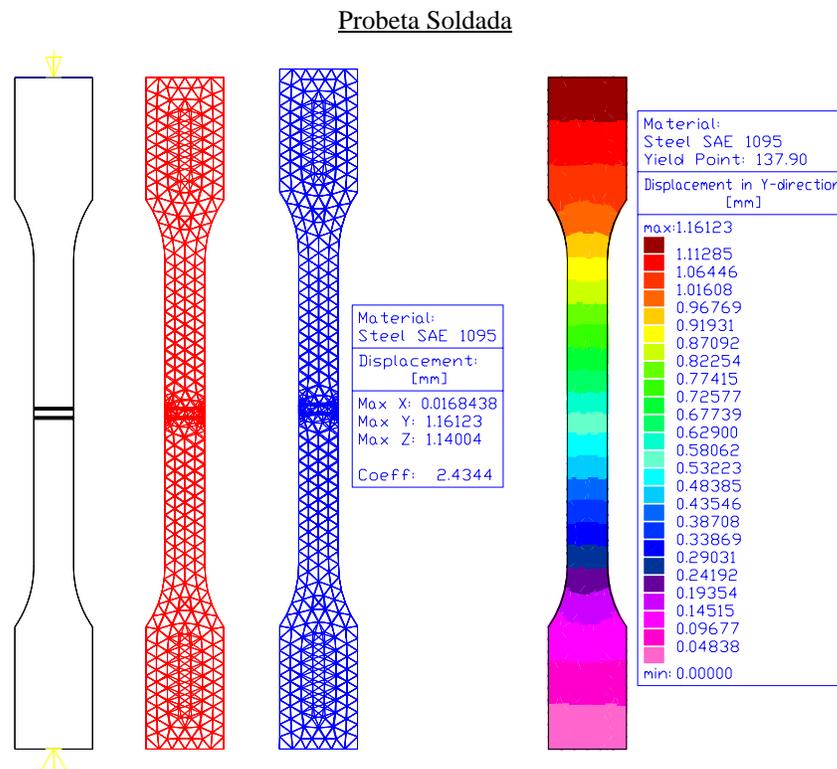


Figura 3.3 a

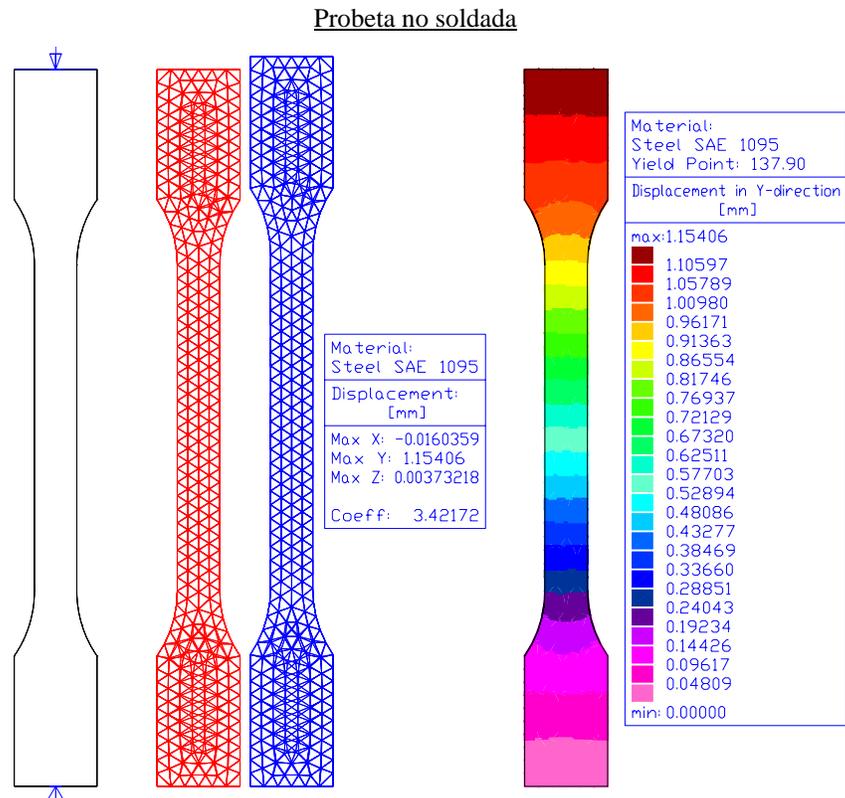


Figura 3.3 b

Deformación total de la probeta a una carga a la tensión de 7.3 kN

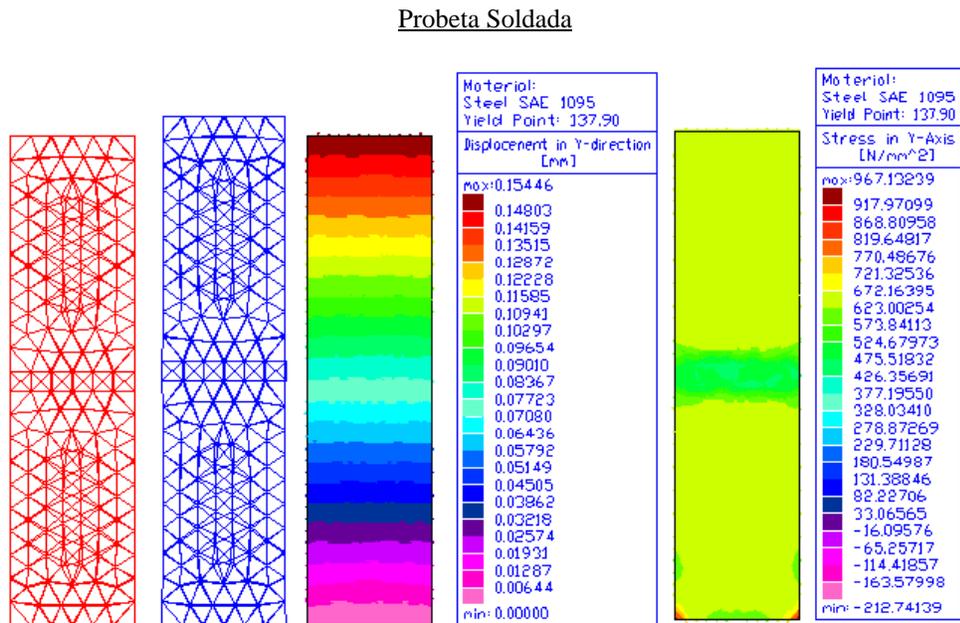


figura 3.4 a

Probeta no soldada

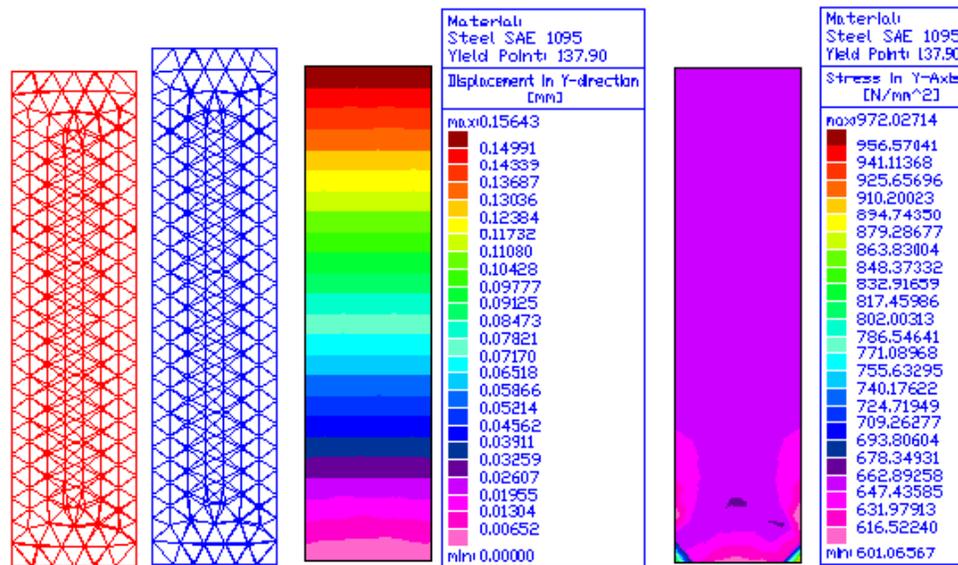


Figura 3.4 b

Simulación por FEA de las probetas sobre el área observada a una carga de 7.3 kN

3.4. Referencias

- (1) Eduardo Ghershman, “ *Introducción al análisis de elementos finitos*”. <http://www.geocities.com/lioraghershman/trapecio.htm>, octubre 2005.
- (2) Bertoline, Wieber, Miller y Moler, “ *Dibujo en ingeniería y comunicación Gráfica*”, segunda edición, ed. Mc Graw Hill. Pag. 346, 974.

4. Medición de la deformación uniaxial para uniones soldadas mediante la técnica ESPI en plano

Para enfatizar la importancia que tiene el estudio de la deformación en las uniones soldadas, recordemos que los cambios en la estructura molecular producida por la adición de material con propiedades mecánicas distintas al material base a temperaturas de fusión modifican la resistencia de la unión. En este capítulo se describe la técnica óptica utilizada para la medición de estas deformaciones en la unión soldada a través de un intervalo de tiempo.

4.1. Medición del desplazamiento en plano

En la sección 2.4 se muestra la técnica para la interferometría del moteado. Se utilizará esta técnica para determinar los desplazamientos en plano que sufre una unión soldada de una probeta mecánica.

La ec. [26] del capítulo 2 describe un interferograma que tiene el registro del desplazamiento en el argumento $\phi(x,y)$. La probeta es sometida a una fuerza la cual es aplicada de manera continua mediante una máquina universal. Se toma una serie de interferogramas, cada uno asociado a una deformación observada en función del tiempo. Estos interferogramas son capturados por una cámara CCD instalada en el eje óptico del sistema.

Utilizando la ec. [30] de la sección 2.5.1, se obtiene la fase asociada a los desplazamientos en dirección de v mediante la técnica de desplazamiento de fase, de tal manera que al utilizar la ec. [32] de la sección 1.4.2 en su forma aproximada⁽¹⁾, esto es considerando que e_x y e_z son igual a cero y considerando que ahora los desplazamientos esta asociado con ϕ podemos determinar el desplazamiento como:

$$v(x, y) = \frac{\phi(x, y)}{\bar{e}_y(x, y)} \quad [1]$$

Donde $e_y(x,y)$ es la componente del vector de sensibilidad $\vec{e}(x,y)$ en la dirección del eje y dada por la ec. [30] de la sección 1.4.2.

De acuerdo a la ec. [3] para y de la sección 1.2,

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v(x,y)}{\partial y} \quad [2]$$

se calcula numéricamente la derivada parcial del campo de desplazamiento $v(x,y)$ el cual fue obtenido por ESPI; posteriormente, utilizando La ley de Hook que relaciona los esfuerzos y las deformaciones en cierta dirección mediante la ec. [5] de la sección 1.2:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad [3]$$

donde E es el modulo de Young que para los aceros tiene el valor de 207 GPa, es posible obtener los esfuerzos.

La medición de la deformación se obtuvo a intervalos de tiempo relativamente cortos en un ensayo continuo a la tensión en una máquina universal para las probetas soldadas y no soldadas, estas últimas utilizadas como de referencia y control. A continuación se describe el sistema óptico utilizado durante las mediciones.

4.1.1. Sistema óptico propuesto

El sistema óptico propuesto consta de una fuente de iluminación correspondiente a un láser de 100 mW de He-Cd con una longitud de onda de 442 nm. El haz es dividido en dos haces mediante un divisor (BS) con película reflectora al 50%. Estos rayos son redirigidos mediante espejos (M3 y M4) hacia la probeta. Ambos haces son expandidos por objetivos de microscopios de 10X. El espejo M4 esta montado sobre

un piezoeléctrico el cual es utilizado para realizar el phase stepping. La figura 4.1 muestra un esquema del sistema óptico utilizado y sus dimensiones, no muestra el piezoeléctrico. Una cámara CCD de 8 bits captura las imágenes a una razón de 30 cuadros por segundo a escala de 255 niveles de gris. La máquina universal y el sistema óptico están montados en una mesa neumática para evitar vibraciones. La figura 4.1 muestra el arreglo óptico utilizado.

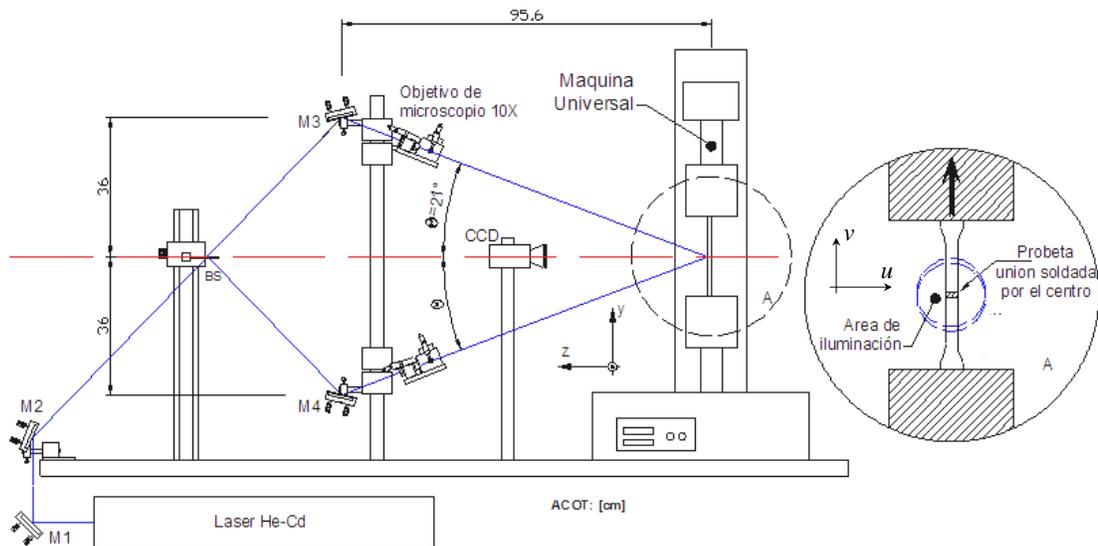


Figura 4.1

Arreglo óptico utilizado en la medición de la deformación para una unión metálica soldada.

4.1.1.1. Sensibilidad del sistema

La configuración del sistema adquiere parámetros propios que se deben calcular para determinar las correcciones o simplemente para obtener la resolución máxima que se puede esperar. De acuerdo a las dimensiones y equipo utilizado en el arreglo óptico utilizado se calcula los siguientes parámetros.

- El vector de sensibilidad. Sus componentes fueron calculados utilizando la ecuación [30] de la sección 1.4.2. En la figura 4.1 se tiene que las coordenadas

de las fuentes de iluminación con el sistema de referencia ubicada al centro de la probeta mecánica: $X_{s1} = 0$ mm, $Y_{s1} = -365$ mm, $Z_{s1} = -950$ mm, $X_{s2} = 0$ mm, $Y_{s2} = 365$ mm, $Z_{s2} = -950$ mm; el área de la superficie de la probeta iluminada es de 55×13 mm². Los resultados se observan en las siguientes gráficas, Figura 4.2.

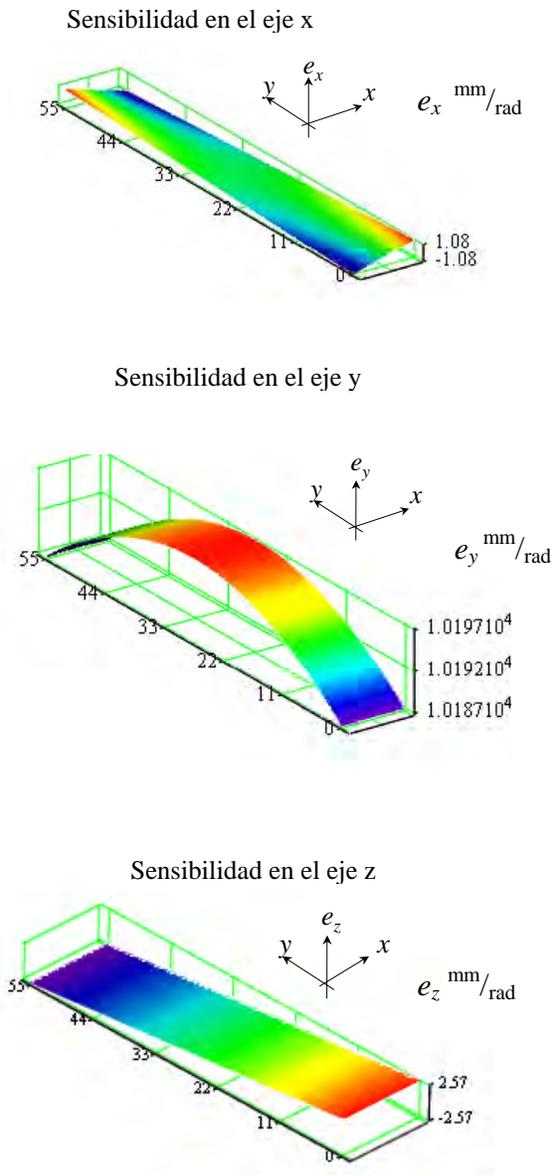


Figura 4.2

Componentes del vector de sensibilidad del sistema óptico mostrado en la figura 4.1. Puesto que solo la componente en y es mucho mayor, las componentes en el eje x y z se igualan a cero.

- El tamaño de la mota en las imágenes. Según la ec. [19] de la sección 2.2, el tamaño de la mota esperado será de $0.215 \mu\text{m}$ tomando en cuenta que λ es de 442 nm , $b = 0.022 \text{ m}$ y $D = 0.055 \text{ m}$.

4.1.2. Control de parámetros

El sistema ESPI es controlado por dos computadoras, una dedicada al sistema óptico, captura y procesamiento de imágenes y otra para el control mecánico de la máquina universal. Los ajustes de los parámetros de control se realizaron tomando en cuenta los valores límites de trabajo normal de los equipos para evitar dañarlos y obtener un intervalo de trabajo lo más amplio posible. Suponemos que los equipos utilizados están calibrados y que las mediciones obtenidas también están dentro de los límites de precisión que según los certificados de los fabricantes estiman. Los parámetros que se controlaron fueron: la velocidad de la cruceta de desplazamiento para la deformación de muestras mecánicas y las cargas aplicadas, la tasa de captura de imágenes por la cámara CCD y por último, el desplazamiento y posicionamiento del piezoeléctrico montado en M4.

Puesto que el ensayo es dinámico, y la técnica de desplazamiento de fase supone que la muestra ensayada esta en condiciones estáticas, la velocidad de deformación de la probeta versus la tasa de captura de imágenes para el desplazamiento de fase debe ser mucho menor de tal manera que la velocidad de deformación se pueda considerar casi cero con respecto a la tasa de captura de imágenes; por lo tanto, se debe de estimar el error producido por esta condición.

4.1.2.1. Velocidad de desplazamiento para la deformación.

La velocidad de la deformación de la probeta es seleccionada a $0.125 \text{ mm}/\text{min}$, es decir $2.083 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{s}$ este parámetro se registra en el programa de control *Instrom* que acompaña a la máquina universal. La muestra se fija firmemente por la parte inferior mientras que por la parte superior se sujeta por unas mordazas que la someterán a la tensión.

4.1.2.2. Ajuste de extensómetro.

El extensómetro registra la deformación entre dos marcas hechas sobre las probetas, cuya separación es de 2 pulgadas es decir, 50.8 mm. Estas marcas señalan el área bajo estudio la cual es registrada por la cámara CCD. El extensómetro tiene una resolución mínima de 0.0005 mm de acuerdo a las especificaciones del fabricante y es montado por la parte posterior de la probeta mediante dos navajas fijadoras firmemente presionadas sobre la muestra.

4.1.2.3. Control y optimización de desplazamiento de piezoeléctrico.

Para llevar a cabo la obtención de la fase, se utiliza un piezoeléctrico ubicado en M4 (figura 4.3), el cual es controlado por un generador de voltaje que a su vez es controlado por un programa creado en LabVIEW (ver el apéndice B). El piezoeléctrico nos permite ajustar el corrimiento de la fase para que sea de $2\pi/3$ entre imagen e imagen. En la calibración del piezoeléctrico, los desplazamientos se ajustaron de 0 a 4.8V, es decir de 0 a 4.8 μm , para la cual se observa un cambio de fase completo sobre la muestra con pasos de 1.6 μm correspondientes a los $2\pi/3$ entre imágenes. Los valores de los desplazamientos del piezoeléctrico se obtuvieron en un principio al graficar, mediante un programa creado en LabVIEW, el nivel de iluminación de un grupo de píxeles centrales de la imagen del interferograma correspondiente a la muestra cargada estáticamente cuando el piezoeléctrico realiza el corrimiento de fase; para este caso, no existe aumento en la frecuencia espacial de la

fase. Posteriormente se hizo un ajuste considerando que la prueba está en condiciones dinámicas, este ajuste se menciona con más detalle en la sección 4.1.2.5.

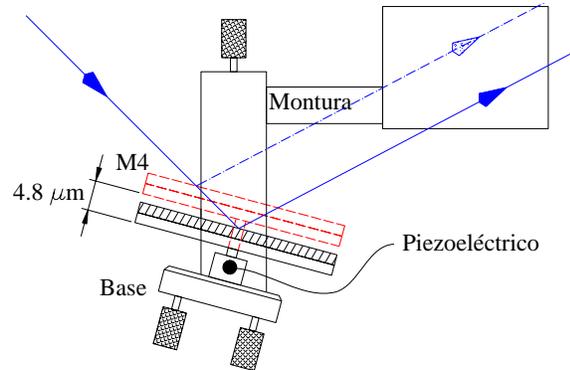


Figura 4.3

Montura del piezoeléctrico en el espejo M4

4.1.2.4. Razón de captura de imágenes y ajustes de la cámara CCD

La velocidad de captura de las imágenes corresponde a 30 imágenes por segundo, lo que corresponde a una imagen a cada 138.9 nm de deformación aproximadamente en la parte central de la muestra. La figura 4.4 muestra la gráfica de velocidades de deformación locales sobre la probeta.

Puesto que una imagen en video en el sistema NTSC (*National Television Standards Committee*) la captura se hace por renglones pares e impares, existe una diferencia de tiempo entre la captura de imágenes pares e impares; por lo tanto, para disminuir errores que ocasiona esta diferencia solo se trabajó con las líneas pares de la cámara CCD, por lo tanto los números de píxeles registrados en las imágenes se ven reducidos a la mitad a lo largo del eje x . Un programa elaborado en LabVIEW (ver apéndice B) controla la adquisición de imágenes para su procesamiento digital posterior. La imagen capturada de la escala de un vernier nos sirve para establecer la relación píxel por milímetros. La figura 4.5a muestra la imagen obtenida para establecer esta relación y la figura 4.5b muestra los resultados de la corrida de un programa elaborado en MathCAD para este fin. Este programa evalúa la intensidad

de la imagen en una sola línea. Posteriormente cuenta el total el total de píxeles y los mínimos (las líneas de la escala) de la imagen, así establece la relación entre las líneas de la escala (esto es cada 0.5 mm) y el total de píxeles de la imagen.

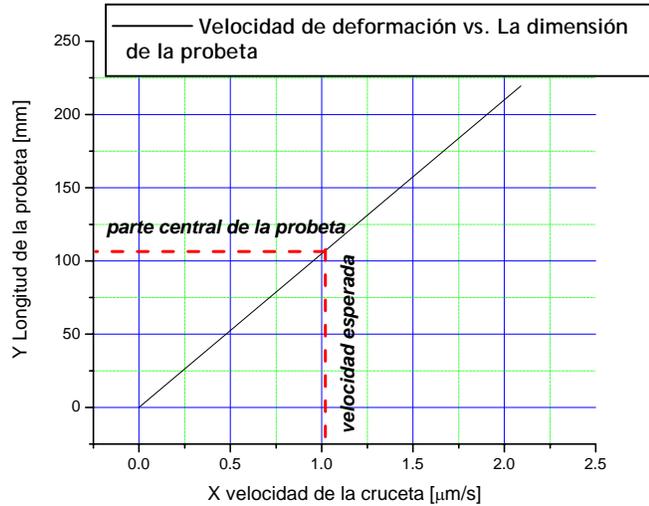
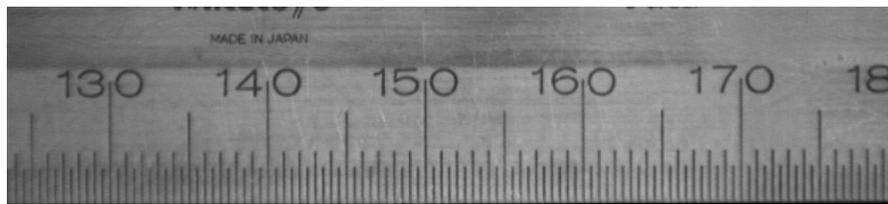
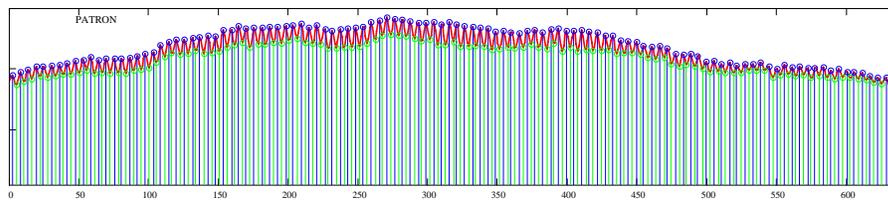


Figura 4.4

Gráfica de la velocidad de deformación local, la probeta está firmemente sujeta por la parte inferior (velocidad nula) y solo la parte superior es la que se desplaza a una velocidad constante ($2.083 \mu\text{m/s}$)



a)



b)

Total píxeles: 636, Total de franjas = 112.83 Relación [mm] por [píxel] = 0.089 [mm/Px]

Figura 4.5

Cálculos para estimar la relación píxel por milímetro, a) imagen para calibración y b) resultados de un programa que cuenta franjas y da como resultado la cantidad de píxeles por milímetro y viceversa.

4.1.2.5. Estimación del error causados por la dinámica de la deformación durante el proceso del phase stepping y el posicionamiento del piezoeléctrico

Como se mencionó en la sección 4.1.2, que la técnica de phase stepping supone condiciones estáticas. La deformación continua conlleva a un incremento en la frecuencia espacial del interferograma, empieza con la formación de una franja y conforme se deforma la probeta, la aparición de franjas continua hasta que ocurre la decorrelación. La figura 4.6 muestra un ejemplo del desarrollo temporal de la frecuencia asociada a la deformación en los interferogramas.

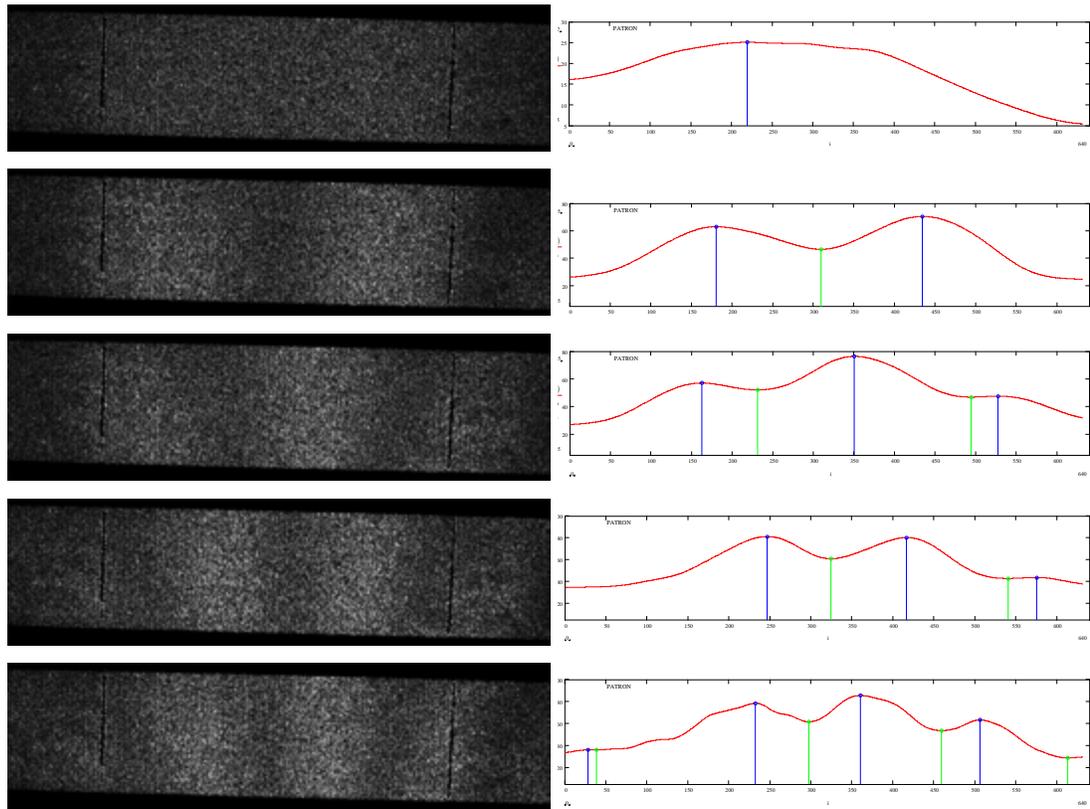


Figura 4.6

Evolución temporal de la interferencia para cada 12 cuadros a una velocidad de deformación de 0.125 mm/s y conteo de franjas.

El tiempo transcurrido en la realización del phase stepping de tres pasos fue de 100 ms. En ese tiempo la fase temporal va de 0.150 hasta 0.652 rad. Considerando lo anterior, se ajustó lo mejor posible el piezoeléctrico como se menciona en la sección 4.1.2.3 para establecer el paso correcto para la técnica de phase stepping. En la figura 4.7 se muestra la gráfica que representa la fase para cada imagen obtenida de los tres pasos del phase stepping para una muestra de 84 series.

En las 84 series de imágenes capturadas de tres pasos se ha repetido este proceso, la figura 4.8 muestra el aumento de la frecuencia espacial en la fase para cada imagen durante la evolución temporal de la medición de la deformación de la probeta, el error que se presenta considera el error de posicionamiento del piezoeléctrico durante el phase stepping y el aumento de la fase, esto es tomando en cuenta la separación en píxeles de la fase de la primera imagen del phase stepping (igual a 2π) y comparándola con las otras dos, el error corresponde a la diferencia en píxeles expresadas en radianes entre el periodo de la fase de la primera imagen y la segunda, y posteriormente con la tercera.

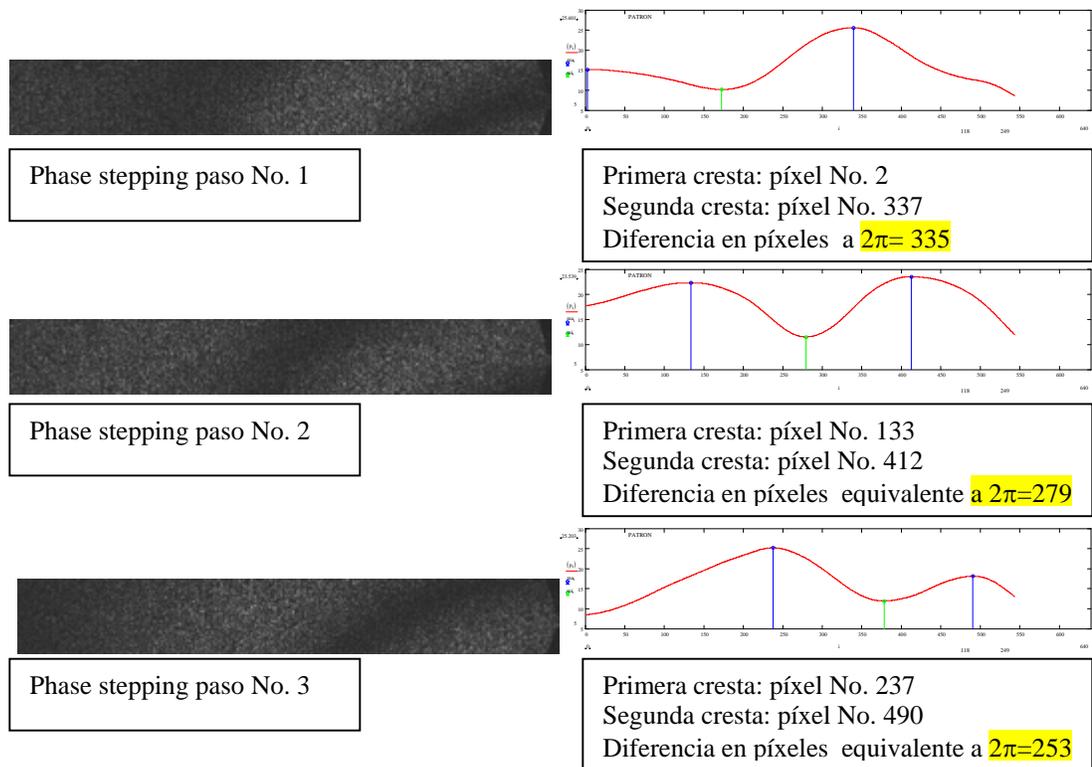


Figura 4.7 (continua)

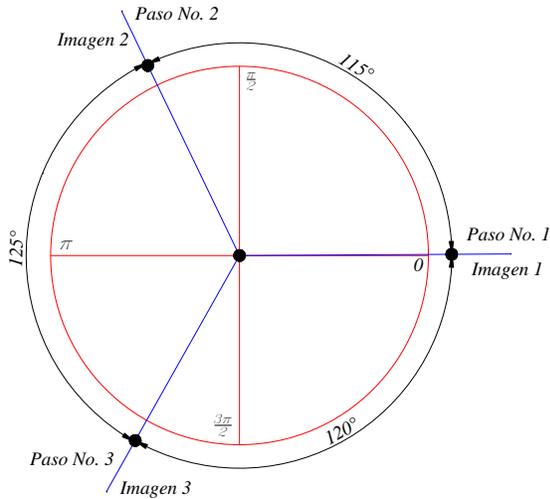


Figura 4.7 (continuación)

Muestra imágenes obtenidas del método phase stepping durante la medición para evaluar el aumento de la fase y encontrar el error para el ajuste del piezoeléctrico.

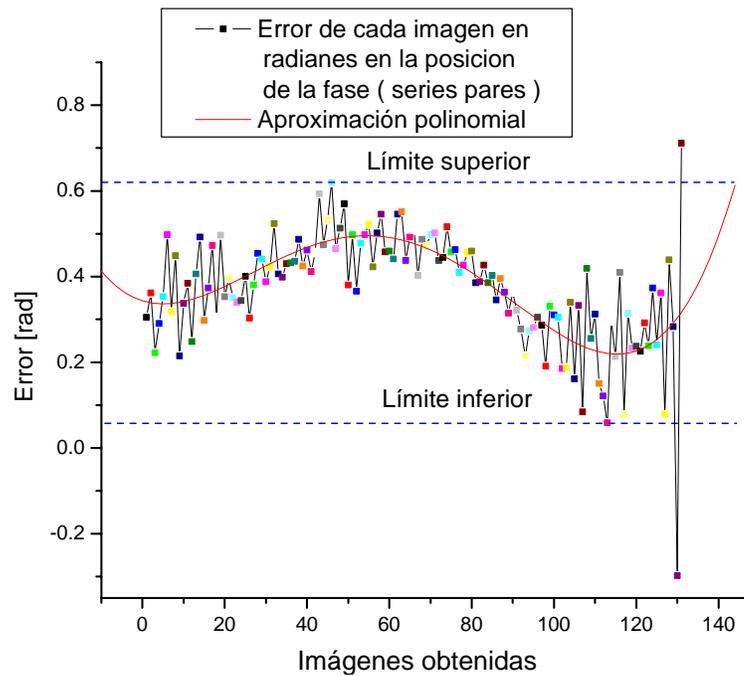


Figura 4.8

Aumento de la frecuencia espacial en la fase para las imágenes de las series pares, el error que se presenta considera el aumento de la fase y el error de posicionamiento del piezoeléctrico durante el phase stepping.

4.1.3. Puesta en marcha de la medición

Una vez corregido y ajustado lo mejor posible los instrumentos y de realizar mediciones previas para el ajuste del phase stepping, se monta la probeta que va a ser analizada en la máquina universal, se introduce una precarga para estabilizar el módulo de Young en una zona donde la pendiente en el diagrama carga-deformación permanezca constante. Encontramos que es suficiente una precarga a partir de 1.5 kN. (figura 4.9)

Una de las ventajas de la precarga es el ajuste de las mordazas sobre la probeta y la corrección de la inclinación que pudiera tener ocasionado por el montaje, también se asegura que las líneas de esfuerzo corran paralelamente con respecto a la sensibilidad del sistema óptico. La figura 4.9 muestra los diagramas de carga deformación para ambos tipos de probetas obtenidos en pruebas previas a la medición mediante la instrumentación y software que acompaña la máquina universal.

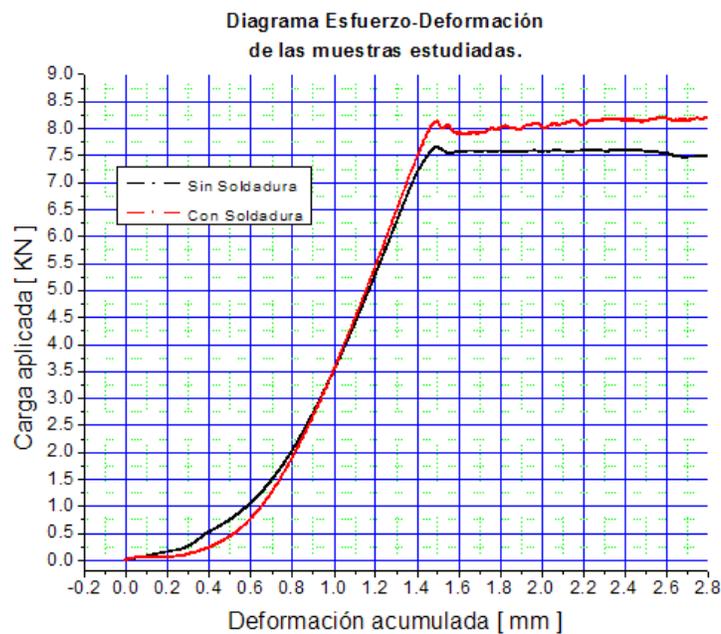


Figura 4.9

Diagrama Carga Deformación para las probetas utilizadas.

4.1.4. Obtención de imágenes.

La obtención de las imágenes y el phase stepping, se realiza a intervalos de tiempo constantes, a cada 4 segundos; Durante ese tiempo, la formación de franjas tiene un aumento en la frecuencia espacial constante mientras permanezcamos dentro de la zona elástica del material sin llegar a la zona de fluencia. La figura 4.10 muestra un esquema sobre la obtención de las imágenes durante la prueba. Las imágenes se fueron almacenando en la memoria de la computadora, ahí, simultáneamente un programa en LabVIEW realiza los cálculos para la obtención de la fase envuelta. En la sección 4.2. se analizan estos resultados

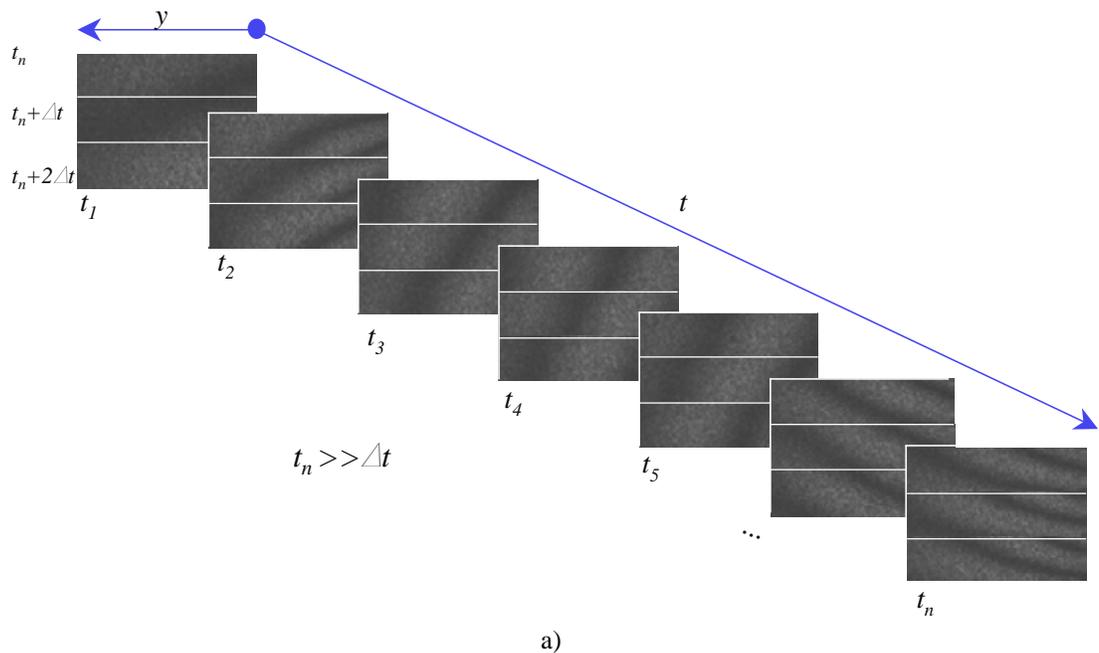


Figura 4.10 (continua)

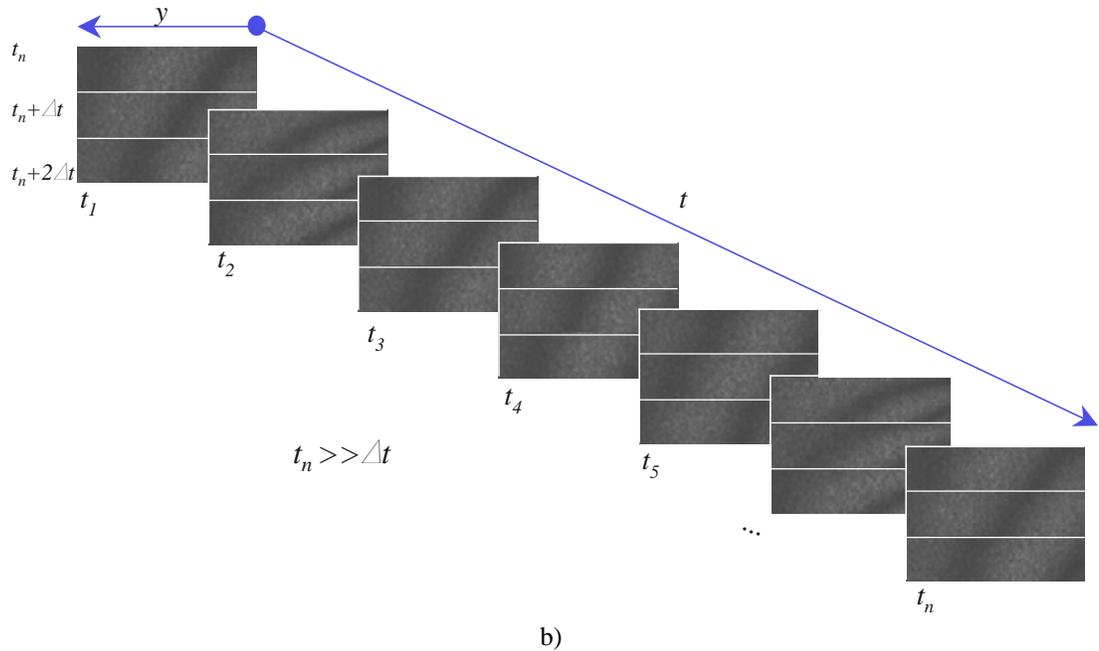


Figura 4.10 (continuación)

Obtención de las imágenes para la medición de la deformación para a) una probeta no soldada y para b) una probeta soldada; $t = 4, 8, 12, 16, \dots, 336$ [s], $\Delta t = 50$ [ms], $n = 1, 2, \dots, 84$ imágenes.

4.1.5. Discusión acerca de la técnica utilizada

Hasta este momento se ha podido comprobar que la técnica de la medición de la deformación en las condiciones descritas anteriormente se puede hacer en tiempo real o almacenar la información para un post-proceso, como en este caso. Esta técnica no pretende compararse con la técnica de TSPI (*temporal electronic speckle pattern interferometry*) puesto que utiliza un algoritmo distinto para evaluar la fase en un intervalo de tiempo continuo^{(2),(3)}. La desventaja de la técnica TSPI en comparación a la técnica presentada es que existe una rápida decorrelación que limita el rango de medición de la deformación del elemento mecánico. La técnica propuesta extiende su rango de medición de la deformación de manera indefinida.

El error introducido por el aumento en la frecuencia espacial de la fase, es pequeño comparado con el aumento de la deformación dentro del intervalo de la aplicación de la técnica de phase stepping. Se debe establecer un límite para determinar hasta dónde se puede tolerar ese error. Por ahora, este límite queda fuera de los alcances que pretende esta tesis.

Se ha intentado utilizar el método de Fourier para obtener la fase envuelta por cada interferograma, pero las bajas frecuencias espaciales y su aumento durante el ensayo mostradas en los interferogramas complica el filtrado en tiempo real de la frecuencia de la parte conjugada y la fase obtenida no es de buena calidad.

Proponer un método para la optimización y el control del piezoeléctrico establece un gran reto, establecer dónde posicionar el piezoeléctrico en una prueba dinámica resultó bastante complicado; la única información tangible hasta el momento sobre el posicionamiento se obtiene con la ubicación de la fase en los interferogramas obtenidos y posteriormente volver a repetir la medición. En este caso, el ajuste del piezoeléctrico se estableció a prueba y error.

4.2. Proceso matemático para la obtención de la deformación

La figura 4.11 muestra las fases envueltas para la probeta soldada y no soldada. Aplicando la técnica de corrimiento de fase implementada en un programa de LabVIEW (ec. [27], para tres pasos de la sección 2.5.1). Los ejemplos seleccionados fueron tomados de 84 imágenes correspondientes a las cargas de 3.3 kN, 5.2 kN y 7.3 kN. Estas cargas están situadas al principio, a la mitad y fin de la prueba para establecer gráficamente una comparación entre ellas de la evolución de la deformación. Una vez obtenida la fase envuelta para cada serie, se aplicó otro algoritmo en un post proceso para la obtención de la fase desenvuelta.

Utilizando la fase desenvuelta y la componente del vector de sensibilidad e_y , se obtiene la componente del vector desplazamiento a través de la ecuación [1] y finalmente la deformación a partir de la ec. [2] de la sección 4.1.

Las deformaciones obtenidas a partir de cada serie se suman para observar la evolución temporal de la deformación de las probetas. Ahí se observa cómo la soldadura modifica los patrones de deformación de una probeta soldada. También se obtiene la evolución temporal de la deformación de la probeta no soldada para utilizarla como referencia y comparación.

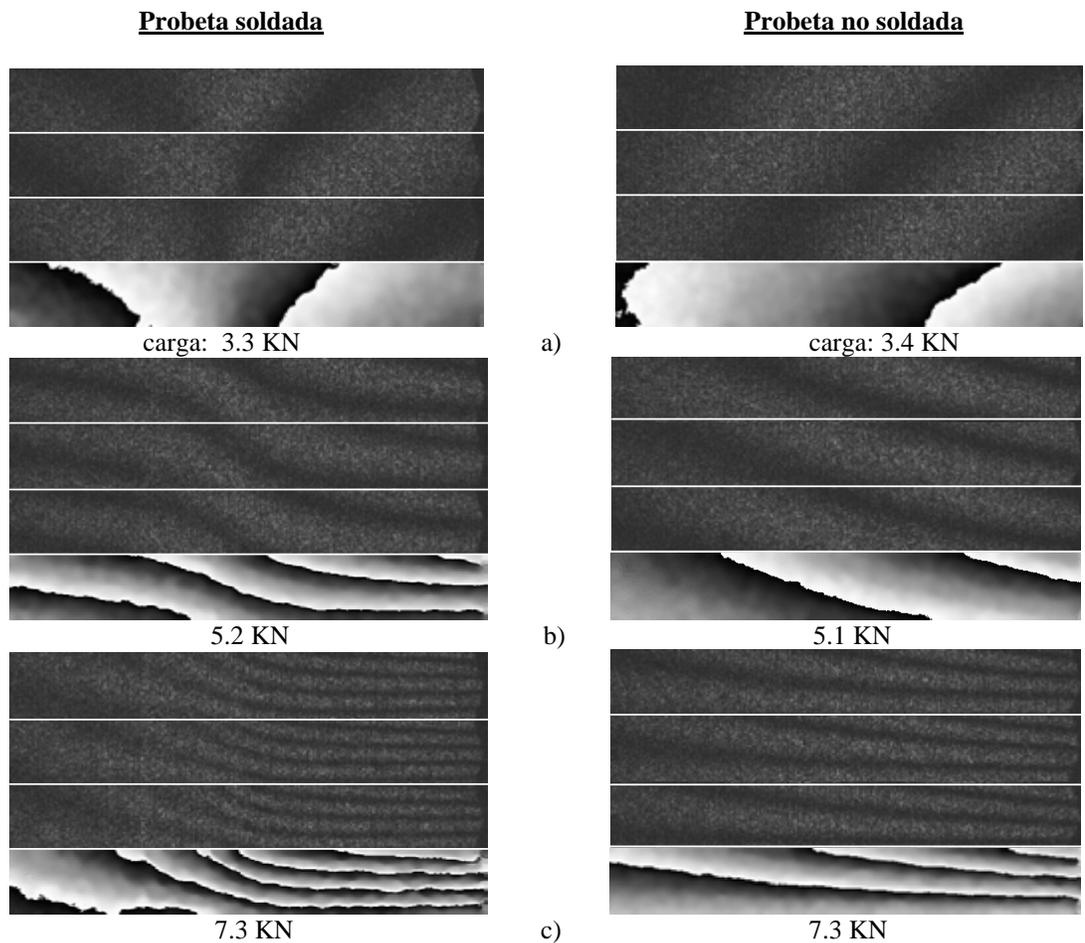


Figura 4.11

Ejemplos de los resultados obtenidos para tres series, imágenes de los tres pasos del phase stepping y la fase envuelta obtenida. a) a principios de la medición, b) a mediados y c) a finales.

4.2.1. Descripción de la programación del sistema para la técnica phase stepping de tres pasos para la obtención de la fase envuelta.

La captura de las imágenes se realizó con la programación del control de instrumentos reales y virtuales de tal manera que las imágenes sean corregidas en su contraste, brillo y tiempo entre cada phase stepping; una vez capturadas, se almacenaron directamente a la memoria RAM de la computadora previamente filtradas mediante un kernel de suavización. Una vez guardadas, ahí se hizo los cálculos necesarios del phase stepping y el resultado se almacena directamente en el disco duro. Los resultados se muestran en una gráfica en el monitor, figura 4.12.

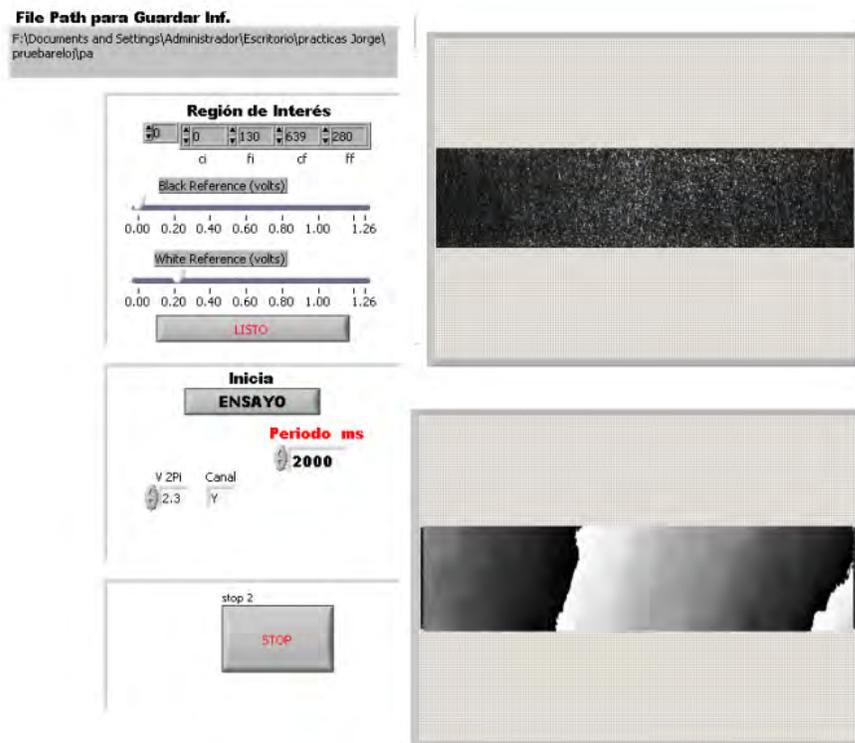


Figura 4.12

Display del programa para la captura de imágenes.

La componente e_y del vector de sensibilidad para el sistema se calculó con la ec. [30] de la sección 1.4.3. (figura 4.2). Una vez obtenida la fase y la componente e_y , es posible la obtención de la componente $v(x,y)$ del vector de desplazamiento a través de la ecuación [1] de este capítulo. La gráfica es mostrada en la figura 4.15. El interfaz del programa que calculó la componente $v(x,y)$ se muestra en la figura 4.13

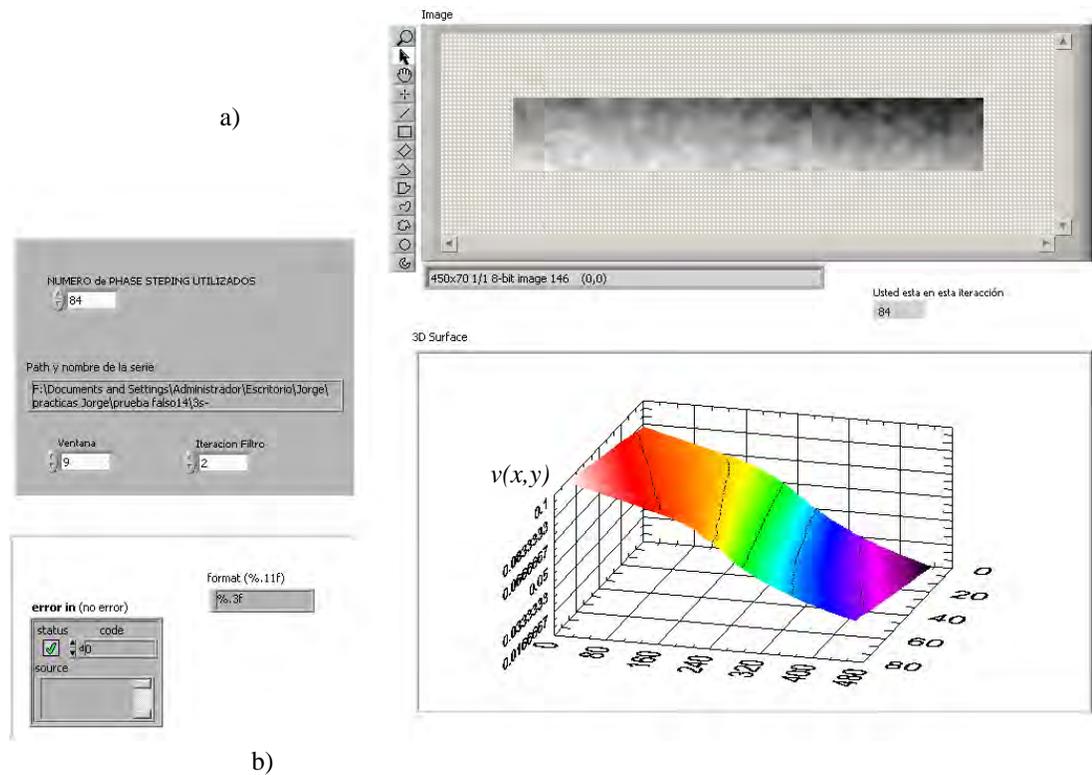


Figura 4.13

Interfaz del programa en LabVIEW que calcula, a partir de las imágenes capturadas: a) el desenvolvimiento de la fase, y b) los desplazamientos sufridos por la probeta aplicando la ec.[1] del presente capítulo.

4.2.2. Cálculo de la deformación.

Para calcular la deformación unitaria a partir de los desplazamientos obtenidos, se implementó otro programa en MathCAD que calcula la derivada de los desplazamientos con respecto a y . El algoritmo del programa⁽⁴⁾ esta basado en la ec. [2] del presente capítulo con $\Delta y = 0.089 \text{ mm}/\text{px}$ (ver figura 4.5) de tal modo que:

$$f'(y_{i,j}) = \frac{-f(y_{i,j+2}) + 4f(y_{i,j+1}) - 3f(y_{i,j})}{2\Delta y}, \quad \begin{cases} i = 1,2,3,\dots,63 \\ j = 1,2,3,\dots,560 \end{cases} \quad [4]$$

Donde i es el número de la fila y j el número de columna de la imagen en píxeles. La figura 4.14 muestra la fase envuelta y el desenvolvimiento de fase, los mapas de desplazamientos $v(x,y)$ según la ec.[1] de este capítulo se muestran en la figura 4.15 para las mismas tres cargas que tuvieron lugar en tiempos diferentes durante la medición para los casos de una probeta soldada y otra no soldada.

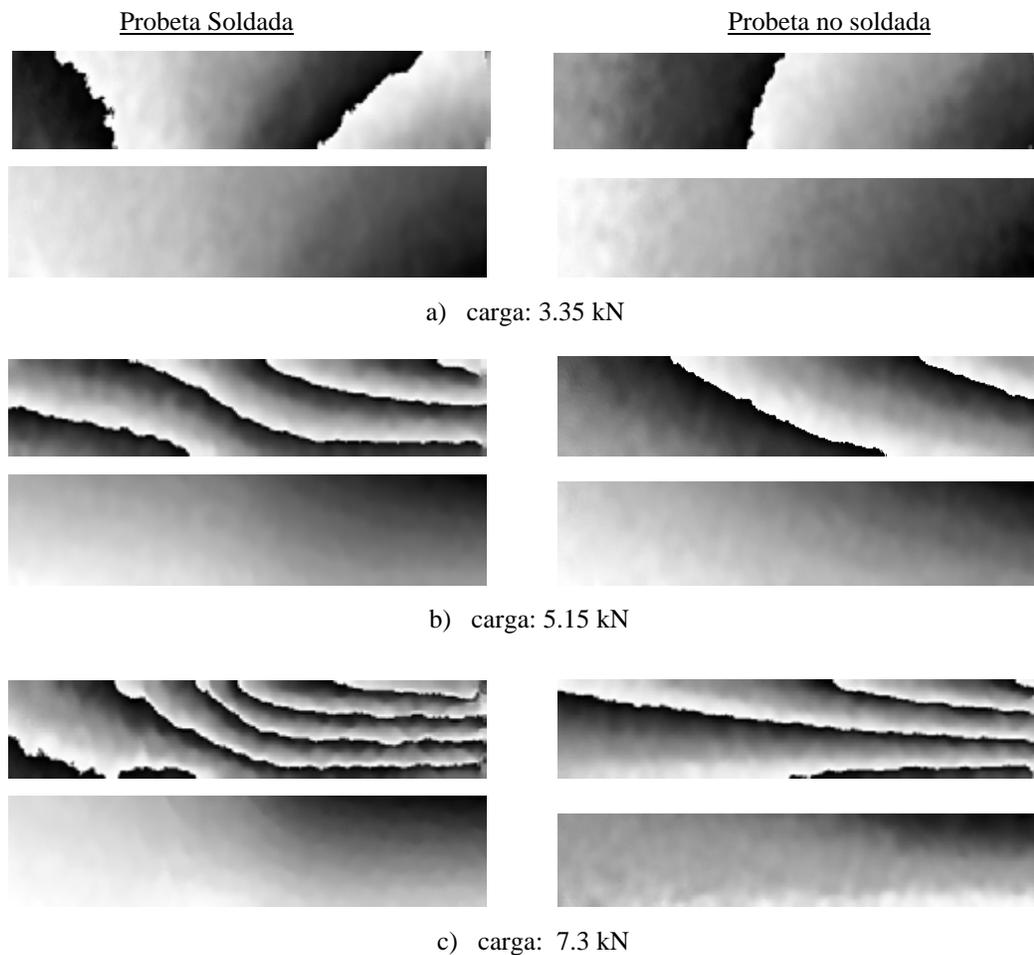


Figura 4.14
Fase envuelta y fase desenvuelta para probetas soldadas y no soldadas para las cargas de a) 3.35kN, b) 5.15 kN, c) 7.3 kN

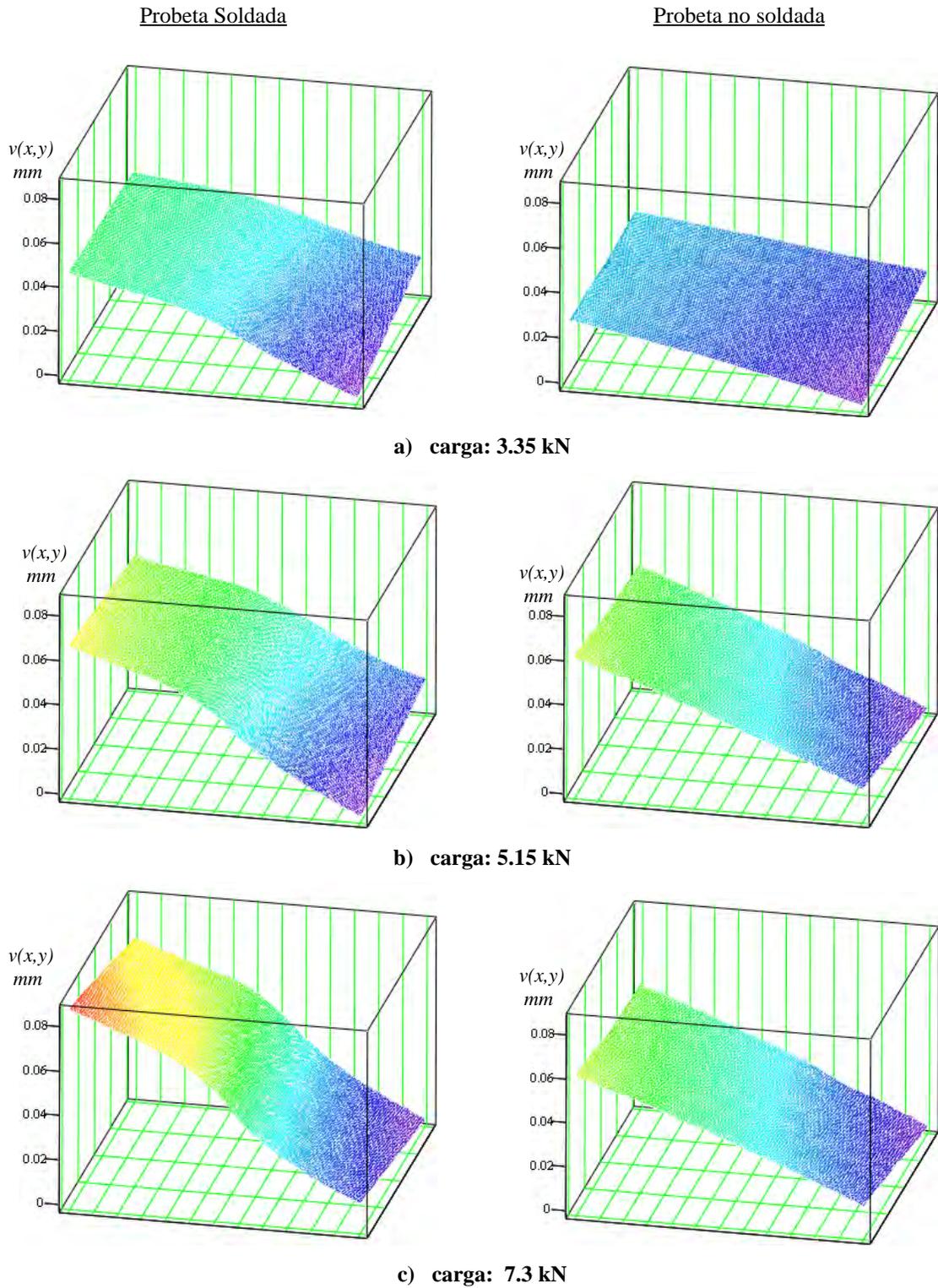
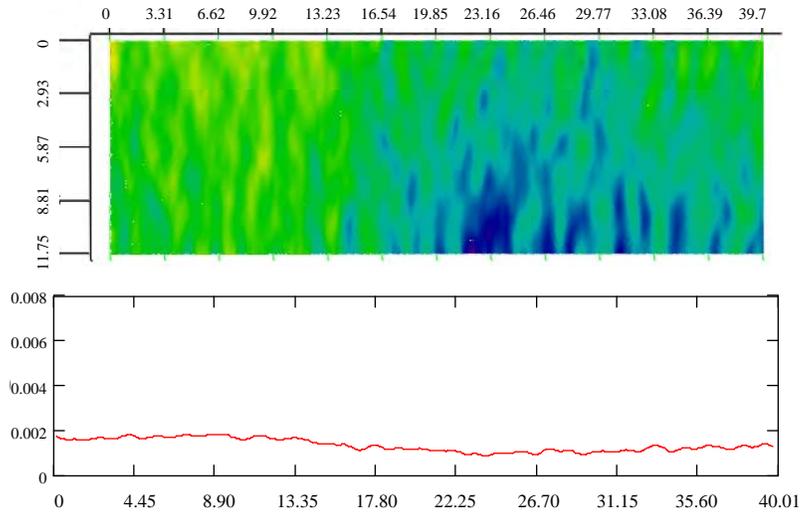


Figura 4.15
Gráfica de desplazamientos $v(x,y)$ para probetas soldadas y no soldadas para las cargas de a) 3.35kN, b) 5.15 kN, c) 7.3 kN

Finalmente, la deformación según la ec. [2] de este capítulo en la figuras 4.16a, 4.16b y 4.16c para las mismas tres cargas que tuvieron lugar en tiempos diferentes durante la medición para los casos de una probeta soldada y otra no soldada.

a) carga: 3.35 kN

Probeta soldada (Escala en mm)



Probeta No soldada (Escala en mm)

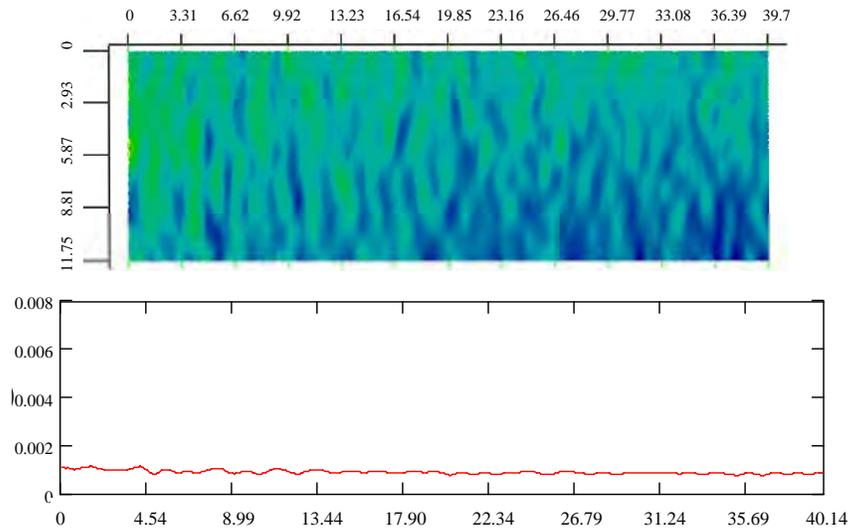
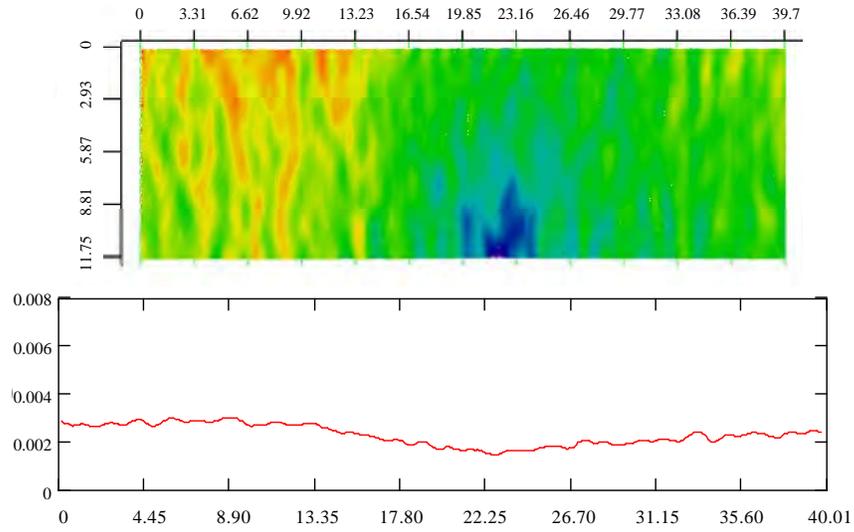


Figura 4.16a

Gráfica de deformación para probetas soldadas y no soldadas, para las cargas de 3.35kN, la figura en falso color representa la deformación sobre la superficie, la gráfica es el promedio de la misma deformación de la superficie

b) carga: 5.15 kN

Probeta soldada (Escala en mm)



Probeta No soldada (Escala en mm)

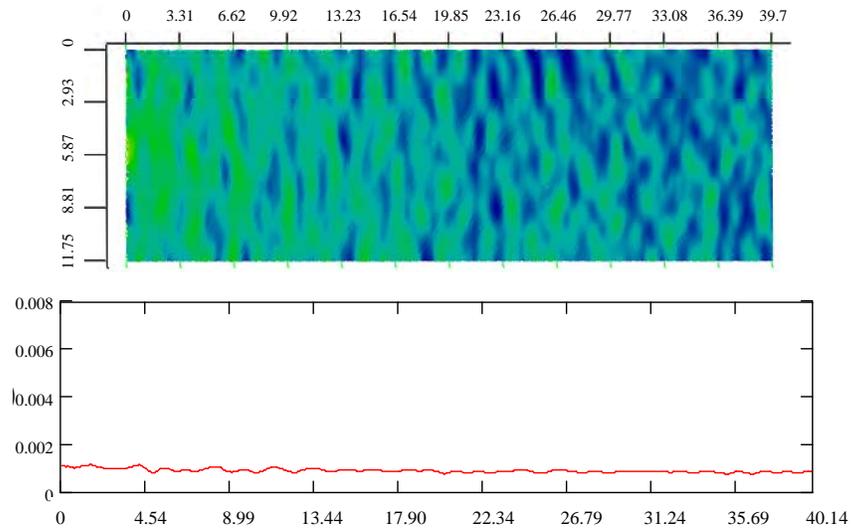
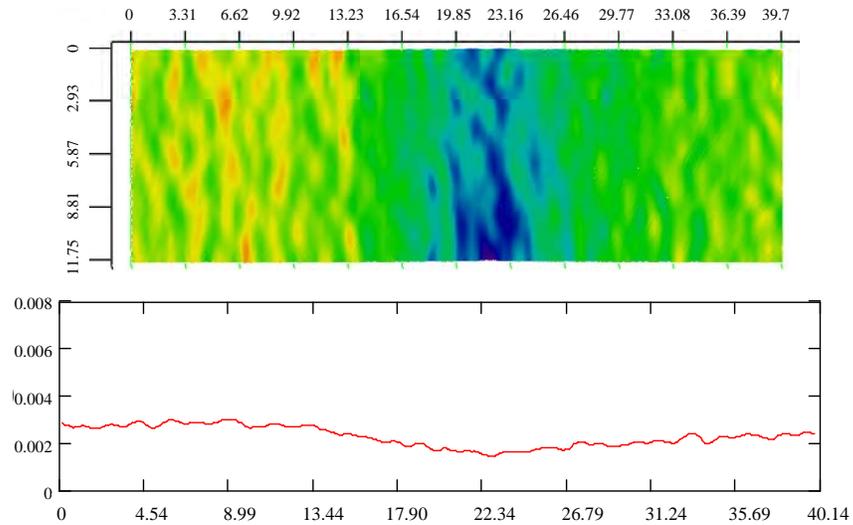


Figura 4.16b

Gráfica de deformación para probetas soldadas y no soldadas, para las cargas de 5.15 kN, la figura en falso color representa la deformación sobre la superficie, la gráfica es el promedio de la misma deformación de la superficie

c) carga: 7.3 kN

Probeta soldada (Escala en mm)



Probeta No soldada (Escala en mm)

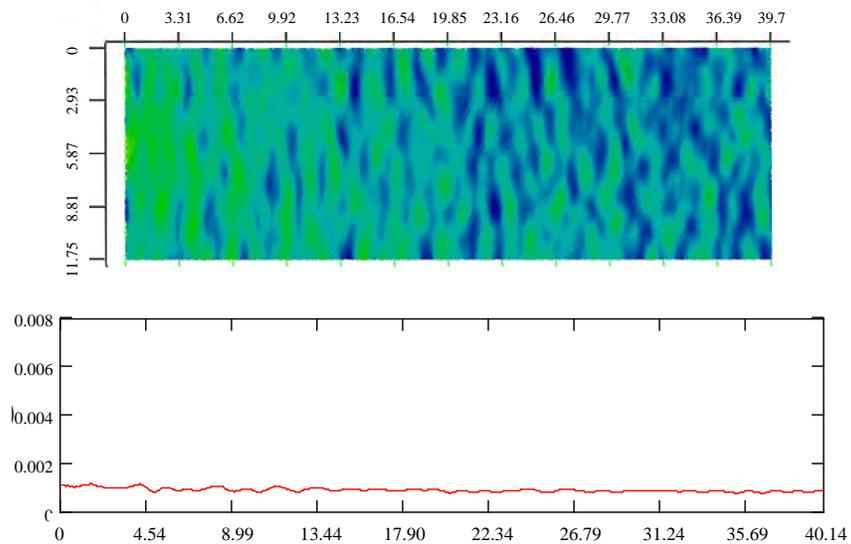


Figura 4.16 c

Gráfica de deformación para probetas soldadas y no soldadas, para las cargas de 7.3 kN, la figura en falso color representa la deformación sobre la superficie, la gráfica es el promedio de la misma deformación de la superficie

Los resultados mostrados en las figuras 4.16a 4.16b y 4.16c, representan la deformación de las probetas soldada y no soldada de cada imagen de la figura 4.14. Observamos que en la probeta soldada, la deformación en la soldadura es menor comparada con el material base que está a su alrededor. Esta a su vez, muestra que la deformación aumenta a mayor ritmo desde la soldadura hacia los extremos. Para la probeta no soldada, la deformación es uniforme.

Sumando la deformación de cada imagen a la anterior, se puede observar la evolución temporal de la deformación, La figura 4.17 nos muestra el promedio de la deformación total acumulada, para la probeta soldada de 0 hasta 7.3 kN y la figura 4.18 para la probeta no soldada, también desde 0 hasta 7.3 kN

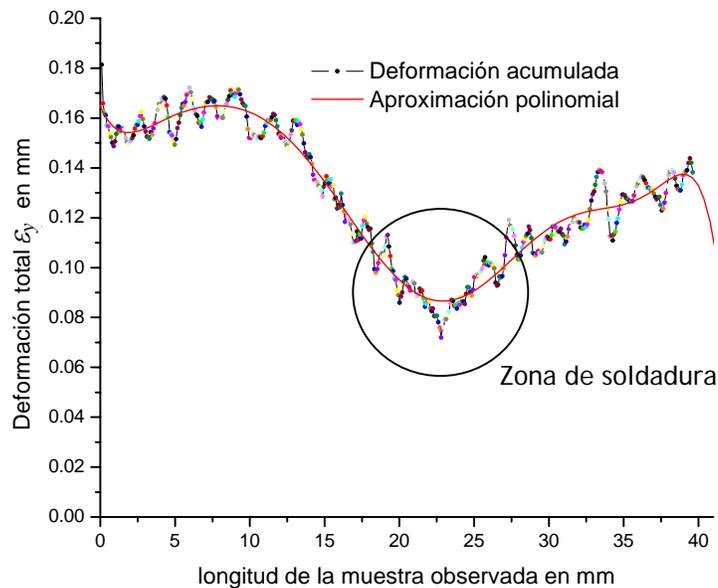


Figura 4.17

Promedio de la deformación total acumulada para una probeta soldada hasta 7.3 kN

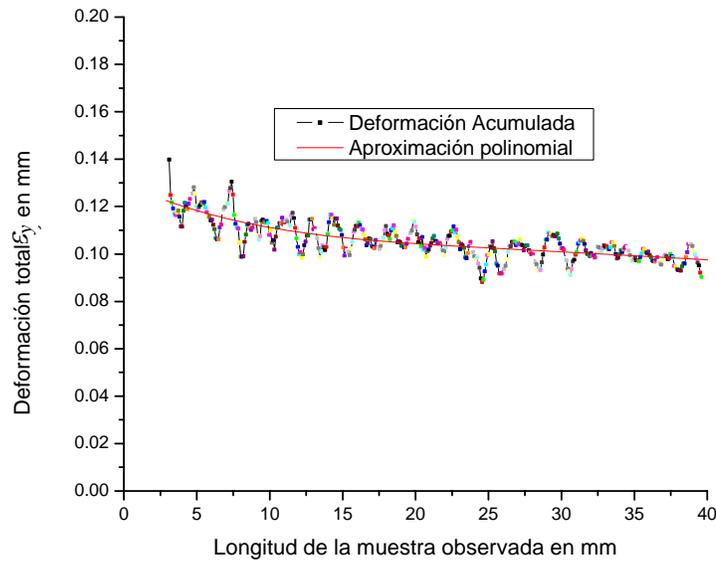


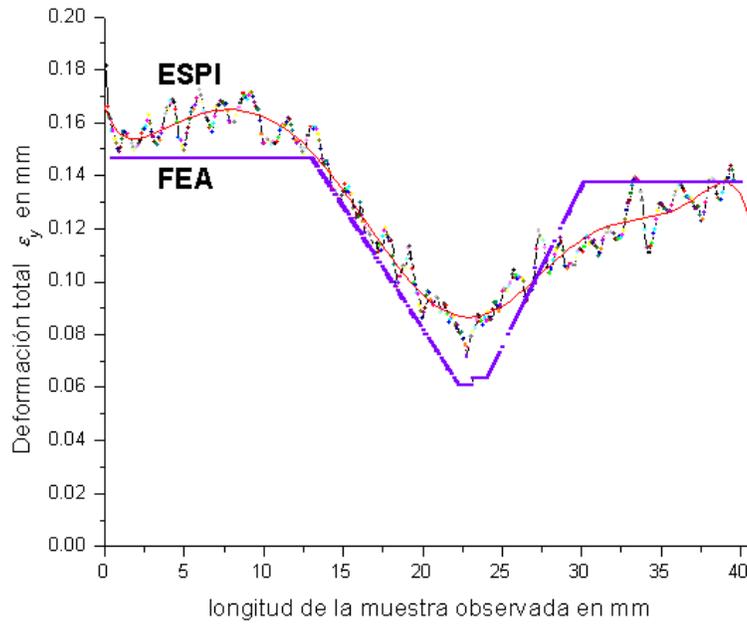
Figura 4.18

Promedio de la deformación total acumulada para una probeta no soldada hasta 7.5 kN

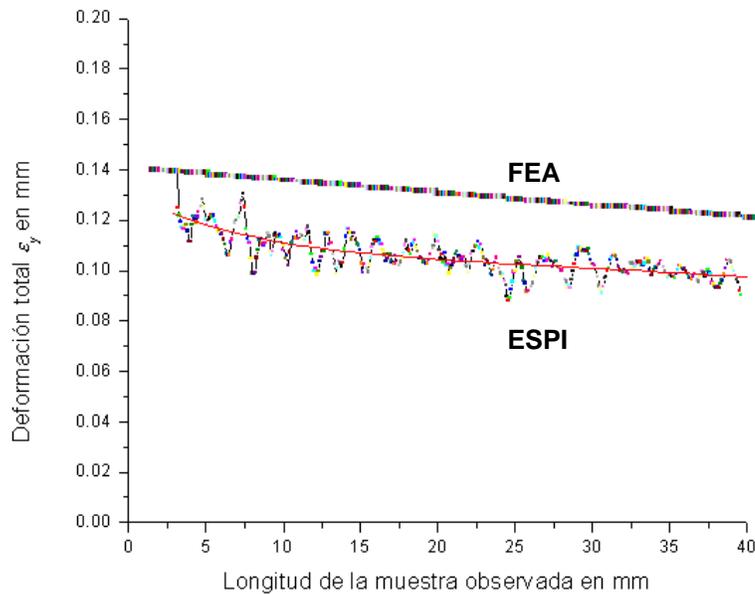
4.3. Comparación de mediciones obtenidas de ESPI vs. FEA

La figura 4.13 muestra una comparación de los datos obtenidos por la técnica ESPI y la técnica FEA. Refiérase también a las figuras 3.3 en el capítulo 3 para la probeta soldada. La gráfica de deformación para el sistema FEA se obtuvo promediando la suma por renglón de los resultados obtenidos de la simulación de la probeta virtual. En la comparación entre los dos métodos se observa que concuerdan en aproximación los resultados; Aunque existen variaciones en los resultados, estos los podemos atribuir a la poca flexibilidad del método FEA al definir las características de tipo de material para cada nodo. En la probeta soldada, existe una zona de transición entre el material base y el material de la soldadura, el elemento simulado por FEA no existe esta zona de transición debido a limitaciones del software empleado. En la frontera de la soldadura existe un cambio repentino en las propiedades de los nodos; es decir, existe un cambio en el tipo de materiales virtual de un nodo a otro. Aún así, la aproximación obtenida por FEA se apega a las mediciones obtenidas por ESPI. Por otro lado, el ruido inherente y poco filtrado por kernel de suavización del patrón de

motas observado en las probetas, nos obliga a realizar aproximaciones polinomiales de buena calidad que se ajustan de manera muy aceptable al promedio de la deformación total de las probetas utilizadas.



a)



b)

Figura 4.13

Comparación entre las técnicas ESPI y FEA para la deformación de a) una probeta soldada y b) no soldada. La simulación por FEA se hizo a una carga de 7.3 kN

4.4. Referencias

-
- (1) Amalia Martinez, J.A. Rayas, “ Evaluation of error in the measurement of displacement vector components by using electronic speckle pattern interferometry”, Opt. Comm. (2006), accepted.
 - (2) Xide Li, Yizhang Yang, Gang Tao, Rongxian Li, “*Deformation analysis with temporal speckle pattern interferometry*” Tsinghua University, Opt. Eng. **40**(2) 310–317 (February 2001)
 - (3) Manuel Servin, Abundio Davila, and Juan Antonio Quiroga, “*Extended-range temporal electronic speckle pattern interferometry*”, applied optics Vol. 41, No. 22 (August 2002)
 - (4) Steven C. Chappra, Raymond P. Canale, “*Métodos numéricos para ingenieros*” Ed. Mc. Graw Hill. 1987, pg 87-93.

5. Conclusiones Generales

Los resultados mostrados revelan la necesidad de considerar las soldaduras cuando el diseñador mecánico evalúa teóricamente su trabajo. El objetivo de esta tesis fue mostrar esta importancia y se ha cumplido. La técnica mostrada puede utilizarse para evaluar la evolución de la deformación en elementos mecánicos y así revelar sus comportamientos frente a la deformación.

En lo particular, la técnica ESPI utilizada en un evento dinámico ofrece una alternativa más para evaluar la evolución de las deformaciones en tiempos discretos casi en tiempo real y prolongados.

La técnica propuesta funciona satisfactoriamente y cumple con los objetivos propuestos de medir la deformación local de elementos mecánicos, aunque todavía falta hacer más estudios teóricos del efecto del aumento de la frecuencia espacial en la técnica de phase stepping.

El control de los instrumentos también juega un papel importante en la obtención de una medida precisa, y lo más exacta posible.

5.1. Acerca de la técnica basada en ESPI en plano para la obtención de la deformación en un evento dinámico

La técnica ESPI tiene la ventaja que ofrece buenas aproximaciones en las mediciones en el orden que va de unos cuantos nanómetro hasta cientos de micrómetros. En la utilización de pruebas estáticas de la deformación, se debe tener mucho cuidado con la decorrelación, que ciertamente pone un límite en el rango de la medición. La utilización de esta técnica de la manera propuesta en esta tesis, amplía los rangos de medición más allá de lo que la técnica simplemente no puede hacer en estados estáticos; así el rango de medición se puede extender a varios milímetros según la capacidad de memoria de almacenamiento de imágenes y la velocidad de

deformación de la muestra. Esta técnica difiere en esencia de una técnica similar, basada también en ESPI conocido como TSPI, *temporal Speckle pattern interferometry*, en que esta última observa la evolución y el aumento de la frecuencia espacial de las franjas hasta que no se pueda distinguir una de otra u ocurra la decorrelación; en dado caso, esta técnica también está limitada a deformaciones en el orden de unos cuantos micrómetros.

Entre los parámetros más importantes a cuidar de esta técnica es el control del piezoeléctrico y su posicionamiento. La calidad con que se haga estos pasos influirá en los resultados. Como se mencionó anteriormente, hace falta hacer un estudio teórico más completo acerca del efecto de la frecuencia espacial de la fase en el proceso del phase stepping controlado por el piezoeléctrico.

La conclusión más importante del sistema propuesto, es que se ha empezado a desarrollar un método óptico de buena calidad para ser implementado en ensayos no destructivos y ensayos dinámicos de materiales para ingeniería. Los resultados obtenidos con este método pueden ser bien aprovechados para la caracterización de materiales y posteriormente, ser considerados en los cálculos del diseño mecánico.

5.2. Conclusiones acerca de los resultados obtenidos

Se observó que la evolución de la deformación en las probetas soldadas difiere bastante con respecto a la deformación en las probetas no soldadas. Es común en la práctica de la ingeniería no considerar las soldaduras como elementos separados que pudieran ocasionar deformaciones diferentes a la que podría ocasionar un elemento idéntico sin soldadura. Se ha demostrado que existen variaciones hasta del 40% (figura 5.17 y 5.18) en la deformación lo que obviamente incrementa el esfuerzo a la tensión presente en las inmediaciones de la soldadura aplicada. La zona de transición entre el material base y la soldadura es la parte donde se recibe el incremento de esfuerzo. Esta zona equilibra la relación de deformación entre una soldadura que se

deforma poco en comparación al material base; esta observación nos lleva a concluir que en el caso de existir una falla en la unión soldada de la probeta justamente se produciría entre 10 y 20 mm de la sección observada. (Refiérase nuevamente a la figura 5.17)

Los resultados ponen en evidencia que es necesario considerar las soldaduras en el diseño de elementos de máquinas y en elementos que han sido reparados con soldadura. Es importante considerar estos efectos en la deformación para el cálculo de factores que limiten el esfuerzo admisible de diseño.

Es interesante observar la pendiente que se observa de la deformación en la probeta no soldada, figura 5.18. Se puede concluir que la parte que menos se deforma es la que se encuentra fijada firmemente en la base de la máquina universal mientras que el otro extremo, la que más se ha deformado, corresponde a la dirección en la que sujeta la mordaza móvil. En las figuras 5.17 y 5.18 se observa el mismo fenómeno. Esto se debe a la isotropía en la composición molecular de la probeta y que el extremo que se desplaza absorbe más energía que aquella que se encuentra inmóvil firmemente sujeta. (por lo general en cualquier sistema físico, la parte del cuerpo que esta en contacto con alguna fuente de energía o trabajo como es el caso , absorbe más de energía que la que no lo está)

5.3. Aplicación de la óptica para el análisis de la mecánica de materiales

La óptica ha mostrado ser una herramienta poderosa en la metrología. En las pruebas mecánicas no destructivas donde está involucrados algún tipo de cambio físico del elemento mecánico, se le puede asociar algún cambio en la intensidad luminosa, cambio en la fase óptica o simplemente la manera en cómo refleja la luz para efectuar mediciones. La técnica mostrada en esta tesis puede servir para la medición y caracterización de varias propiedades físicas de los materiales como:

- Modulo de Young
- Relación de Poison
- Coeficientes térmicos
- Fatiga de elementos mecánicos
- Transferencia de calor
- Deformaciones. Cálculos de factores de concentración de esfuerzos
- Evolución y localización de microfracturas

5.4. Propuesta para proyectos futuros

Para trabajos futuros, se propone:

- La investigación teórica de los efectos del aumento de la frecuencia espacial en la técnica de phase stepping.
- La utilización de una técnica alterna al phase stepping para la evaluación de la deformación es estados dinámicos que puedan simplificar el método propuesto y minimizar los errores producidos por el aumento de la frecuencia espacial que surge durante el proceso esta técnica.
- Implementación de un prototipo miniaturizado para la medición de deformación en elementos mecánicos *en sitio*.
- Y como el trabajo más inmediato, ajustar la técnica mostrada para la medición tridimensional de la deformación en eventos dinámicos.

A. Procesamiento digital de imágenes

A.1. Programación para la obtención de la fase envuelta y fase desenvuelta.

Programación en MathCAD para la obtención de la fase envuelta con n pasos

```
fase_npasos (p, vv, vh, it, ns) :=
  for i ∈ 0.. p
    Pi ← concat(ns, num2str(i))
  for i ∈ 0.. vv - 1
    for j ∈ 0.. vh - 1
      hi,j ←  $\frac{1}{vv \cdot vh}$ 
    d ← 0
    n ← 0
    for k ∈ 0.. p
      Imk ← READBMP(Pk)
      Imk ← completa(Imk)
      Imk ← Convolution(Imk, h, it)
      if 0 < k < p
        n ← n + Imk · sin( $\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{p}$ )
        d ← d + Imk · cos( $\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{p}$ )
      na ←  $\left[ \frac{(Im_0 - Im_p)}{2} \right] \cdot \cot\left[ \frac{(2 \cdot \pi)}{p} \right]$ 
      da ←  $\left[ \frac{(Im_0 + Im_p)}{2} \right]$ 
      n ← na - n
      d ← da + d
       $\Phi \leftarrow \text{atan2}(n, d + 0.000001)$ 
```

```
pasos := 6
ventana_filtro_v := 9   ventana_filtro_h := 9   iteraciones_filtro := 10
p := pasos
vv := ventana_filtro_v   vh := ventana_filtro_h   it := iteraciones_filtro
ns := "PS_"
t := READBMP("PS_0")
i := 0.. vv - 1   j := 0.. vh - 1
hi,j :=  $\frac{1}{vv \cdot vh}$ 
```

Programación en MathCAD para la obtención de la fase desvuelta.

$$\text{Dtan}(\text{Dc}, \text{Ds}) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. \text{rows}(\text{Dc}) - 1 \\ \quad \text{for } j \in 0.. \text{cols}(\text{Ds}) - 1 \\ \quad \quad \text{Dtan}_{i,j} \leftarrow \text{atan} \left(2 \cdot \frac{\text{Ds}_{i,j}}{\text{Dc}_{i,j}} + 0.0001 \right) \\ \text{Dtan} \end{array} \right.$$

Dtan := Dtan(Dc, Ds)

Dtan := normal(Dtan)

Dtan := Unwrapp(Dtan, m, 1)

Dtan := submatrix(Dtan, 225, 405, 0, 631)

ima_desnvuelta := Dtan

A.2. Programa utilizado para el calculo de la deformación y filtrado

$$\text{filtro}(a, n) := \left| \begin{array}{l} \text{for } s \in 1..n \\ \quad \text{for } i \in 2.. \text{rows}(a) - 2 \\ \quad \quad \text{for } j \in 2.. \text{cols}(a) - 2 \\ \quad \quad \quad a_{i,j} \leftarrow \text{median} \left(a_{i-1,j-1}, a_{i,j-1}, a_{i+1,j-1}, a_{i-1,j}, a_{i,j}, a_{i+1,j}, a_{i-1,j+1}, a_{i,j+1}, a_{i+1,j+1} \right) \\ \quad \text{for } i \in 2.. \text{rows}(a) - 2 \\ \quad \quad \text{for } j \in 2.. \text{cols}(a) - 2 \\ \quad \quad \quad b_{i,j} \leftarrow \frac{-a_{i,j+2} + 4a_{i,j+1} - a_{i,j}}{0.0892} \\ \quad b \leftarrow b + |\text{min}(b)| \\ \quad b \end{array} \right.$$

A.3. Kernel para la suavización de superficies.

Filtro de la media

$$\text{Filtro}(M) := \left| \begin{array}{l} M_p \leftarrow M - M \\ \text{for } m \in 1.. \text{rows}(M) - 2 \\ \quad \text{for } n \in 1.. \text{cols}(M) - 2 \\ \qquad \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 M_{m+k, n+l} \\ M_{p, n} \leftarrow \frac{\qquad \qquad \qquad}{9} \\ M_p \end{array} \right.$$

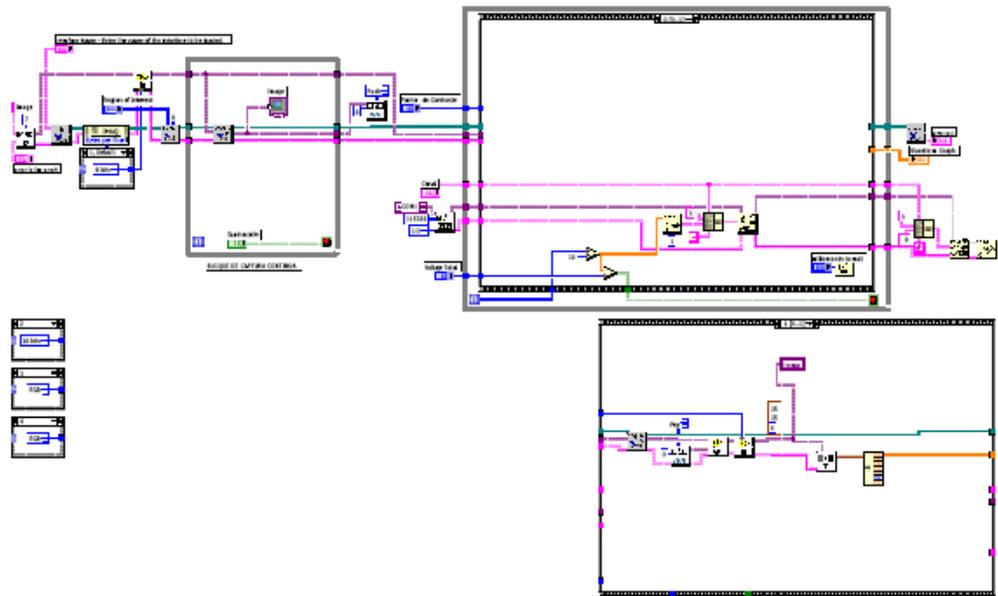
Filtro de la mediana

$$\text{filtro1}(a, n) := \left| \begin{array}{l} \text{for } s \in 1.. n \\ \quad \text{for } i \in 2.. \text{rows}(a) - 2 \\ \quad \quad \text{for } j \in 2.. \text{cols}(a) - 2 \\ \qquad a_{i, j} \leftarrow \text{mean}(a_{i-1, j-1}, a_{i, j-1}, a_{i+1, j-1}, a_{i-1, j}, a_{i, j}, a_{i+1, j}, a_{i-1, j+1}, a_{i, j+1}, a_{i+1, j+1}) \\ a \end{array} \right.$$

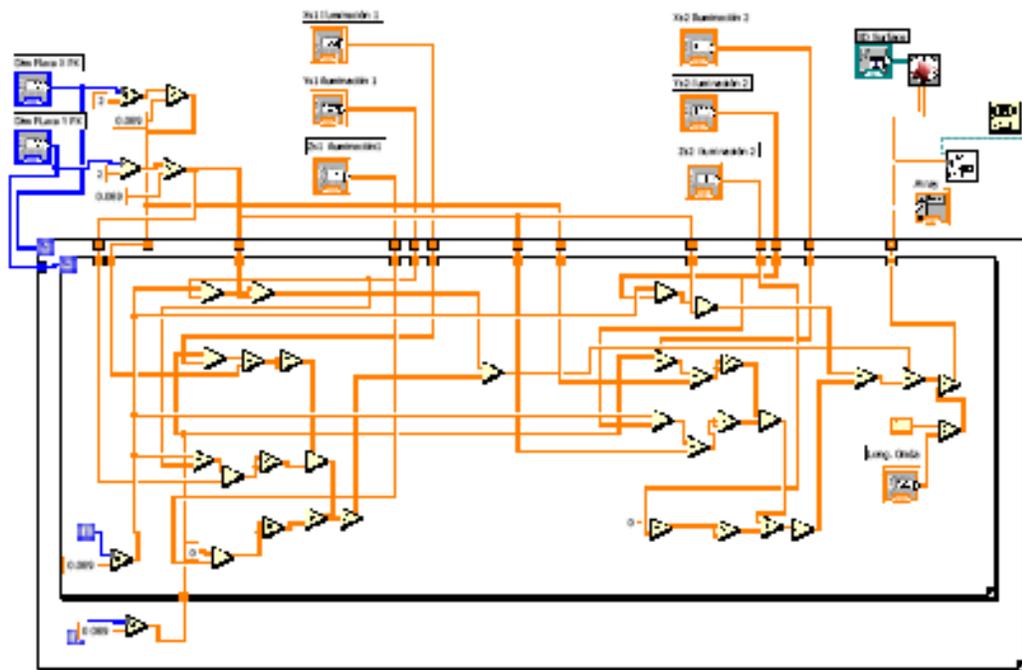
B. Programas utilizados en LabVIEW

B.1. Programas para para la adquisición de imágenes

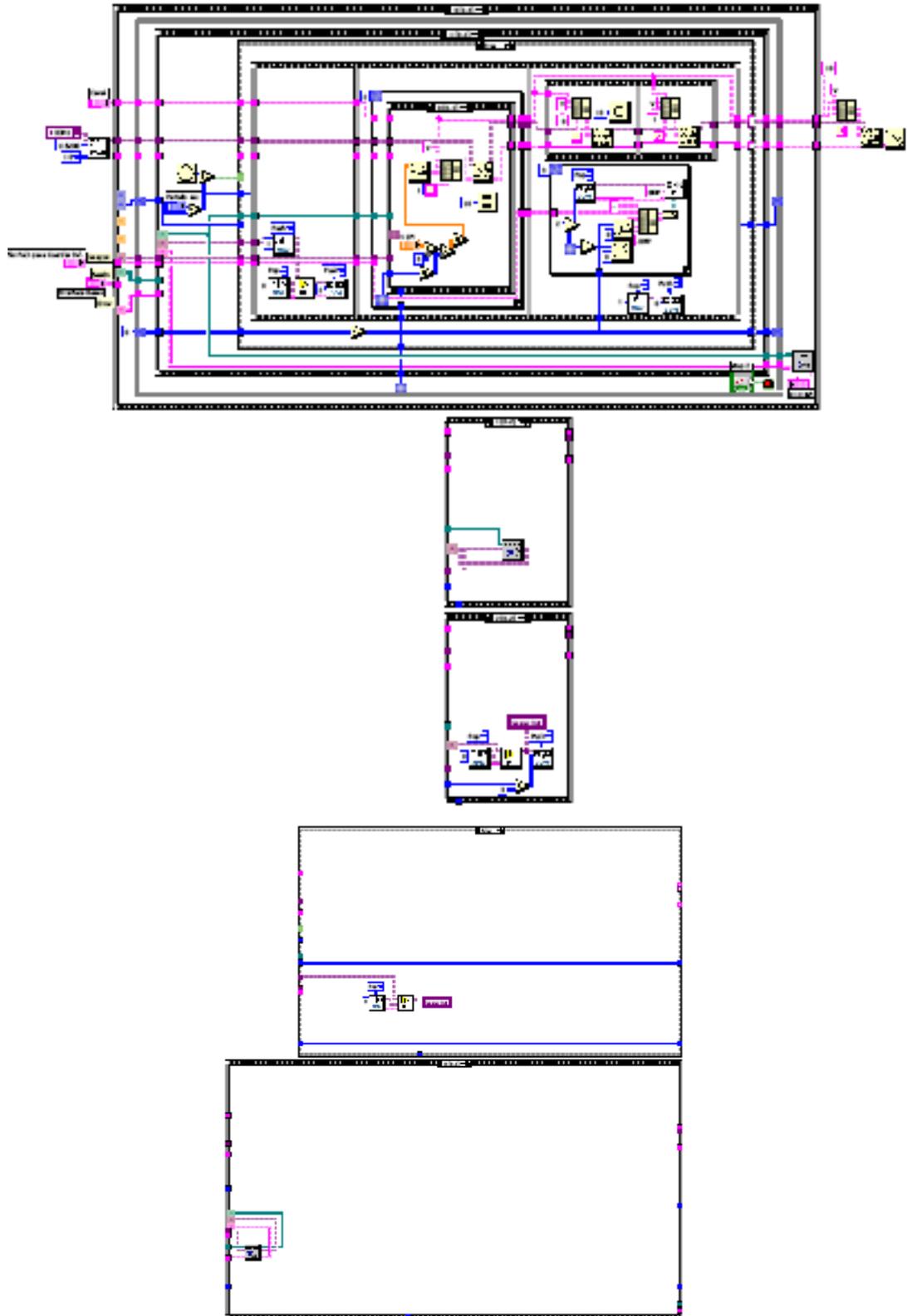
Programa que calcula el periodo de la fase para utilizar la técnica de corrimiento de fase.

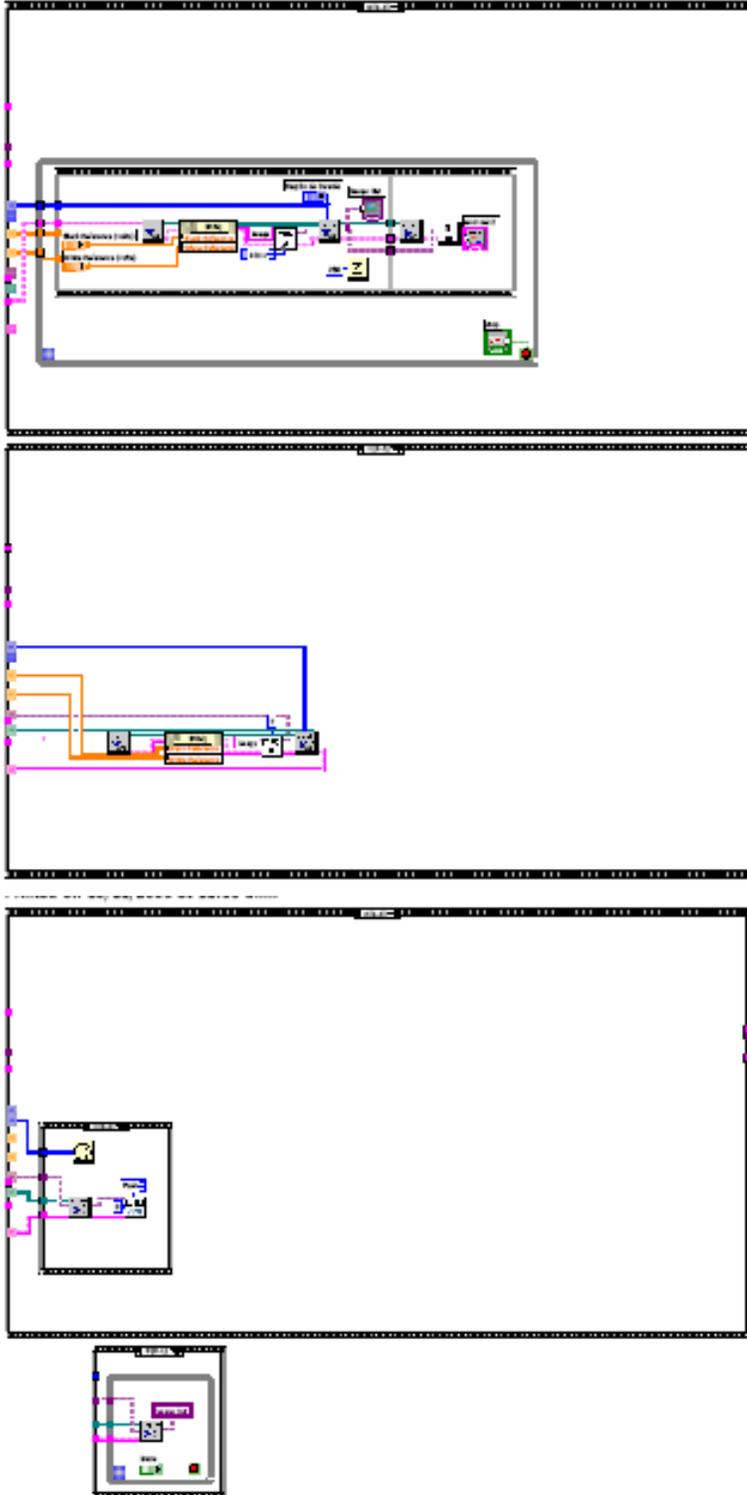


Programa que calcula el vector de sensibilidad para el sistema óptico propuesto

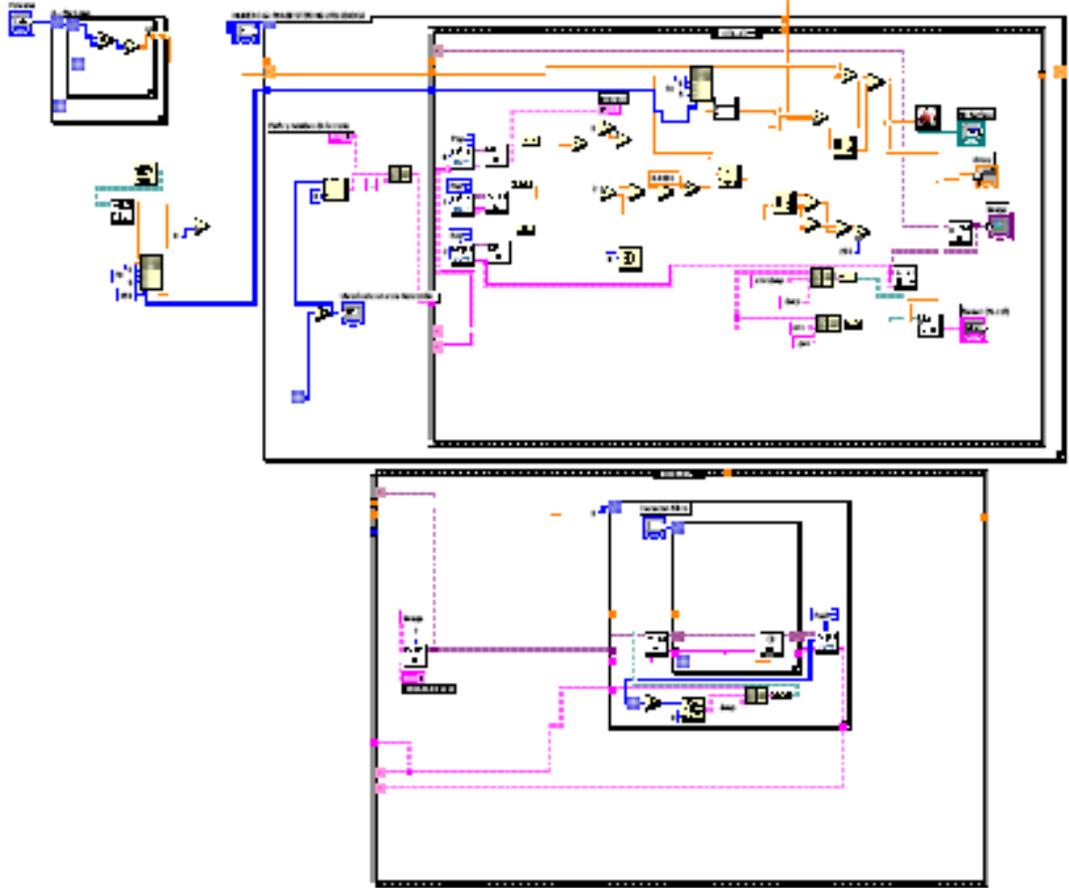


Programa que captura las imágenes





Programa que procesa matemáticamente las imágenes capturadas.



C. Trabajos derivados delo proyecto de maestría**C.1. Participación en Congresos**

- 2do. Taller de Procesamiento de Imágenes y Óptica, 21 y 22 de Noviembre 2005, CIMAT, Guanajuato, Guanajuato.
- 3er Encuentro, participación de la Mujer en la Ciencia, 18 y 19 de Mayo 2006, León Guanajuato.
- 3er. Taller de Procesamiento de Imágenes y Óptica, 10 y 11 de Agosto 2006, CIMAT, Guanajuato, Guanajuato.
- XLIX Congreso Nacional de Física, 16 al 20 de Octubre 2006, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.

C.2. Memorias in Extenso

- Jorge Parra-Michel, Amalia Martínez, J. A. Rayas. “*Análisis por Interferometría electrónica de moteado de la deformación uniaxial en uniones soldadas*”, 3er Encuentro, participación de la Mujer en la Ciencia, 18 y 19 de Mayo 2006, León Guanajuato.
- Jorge Parra-Michel, Amalia Martínez, J. A. Rayas. “Utilización de la técnica ESPI con sensibilidad en plano en la obtención de la deformación uniaxial en uniones metálicas soldadas”, 3er. Taller de Procesamiento de Imágenes y Óptica, 10 y 11 de Agosto 2006, CIMAT, Guanajuato, Guanajuato.

- Jorge Parra-Michel, Amalia Martínez, J. A. Rayas. " Utilización de la técnica ESPI con sensibilidad en plano en la obtención de la deformación uniaxial en uniones metálicas soldadas", XLIX Congreso Nacional de Física, 16 al 20 de Octubre 2006, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.