

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

**Análisis de la tendencia del
desplazamiento en imágenes obtenidas por
interferometría en Aluminio 6061.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON ESPECIALIDAD EN
METROLOGÍA

PRESENTA:

Jaqueline Reynosa Guerrero.

ASESORES

Dr. Hugo Jiménez Hernández

Dr. Vicente Bringas Rico

Introducción.

Para la medición de deformación en materiales metálicos o no metálicos actualmente ya se cuenta con una diversidad de técnicas y equipos. Se tienen los métodos intrusivos como las galgas extensométricas o se tienen también los métodos no intrusivos como las técnicas con interferometría. Se ha optado por la técnica de interferometría debido a que el objetivo es no interferir con el fenómeno de deformación. Con el arreglo de interferometría se obtienen imágenes con diferentes patrones de moteado o franjas, en este caso se ha optado por tener imágenes con un patrón de moteado que nos permita tener una mayor textura en la imagen, para que, a partir de estas imágenes se obtenga de una referencia de la deformación del material para así calcular el desplazamiento numérico en una secuencia de imágenes, para lo cual se analiza el error del valor de desplazamiento a través de parámetros estadísticos.

1.1. Objetivos

Estimar el desplazamiento en imágenes digitales con un patrón de moteado debido a una deformación en una probeta de Aluminio 6061.

- Obtener imágenes de forma experimental para generar un patrón de moteado.
- Obtener el desplazamiento de las imágenes.
- Obtener la dispersión estadística de los datos del desplazamiento.

1.2. Hipótesis

Si la distribución probabilística de la magnitud de los vectores de desplazamiento tiene una tendencia normal, entonces se habrá encontrado el mejor valor aproximado del desplazamiento.

1.3. Justificación

Se realiza este trabajo para evaluar las variables que interfieren en el cálculo del desplazamiento y reducir el error en el cálculo del desplazamiento cuando se usan imágenes con un patrón de moteado obtenidas por interferometría.

1.4. Planteamiento del problema

Se requiere trabajar con imágenes generadas por interferometría para no interferir en el fenómeno natural de deformación del material en prueba, de esto, una vez que se han obtenido las imágenes moteadas se necesita emplear un método de cálculo de desplazamiento lo que ya está probado cuando el método converge, sin embargo se necesita evaluar las variables que interfieren en el algoritmo para disminuir el error en el cálculo del desplazamiento y el valor obtenido represente el valor físico de desplazamiento.

La tesis se organiza de la siguiente manera:

En el capítulo de Estado del arte se dá un panorama general de los sistemas que existen o se han estudiando en lo que respecta a desplazamiento con imágenes y las diferentes técnicas empleadas.

En el capítulo Fundamento teórico presento el principio del arreglo de interferometría, el análisis del desplazamiento con imágenes digitales y el análisis estadístico que se puede emplear.

Después en el capítulo Desarrollo del proyecto, se presenta lo que es el diseño y maquinado de los soportes de la experimentación, pruebas de obtención de imágenes con un patron de moteado, y pruebas para el cálculo del desplazamiento.

En el capítulo Estimación del desplazamiento, se presenta análisis de datos, prueba de normalidad, prueba de varianzas iguales y anova.

Finalmente en el último capítulo se muestran las conclusiones del trabajo realizado.

Estado del Arte

Para la deformación de materiales se utilizan diferentes arreglos experimentales que sirven para la obtención de una secuencia de imágenes que puedan representar un desplazamiento a través del tiempo y así como diferentes técnicas de visión por computadora realizar el análisis o mejora de la imagen.

2.1. Trabajos en cálculo de desplazamiento

Para el análisis del estado del arte se consideró que los trabajos tengan el mismo objetivo de calcular desplazamiento, que tengan la misma técnica de obtención de las imágenes, si es que cuentan con alguna técnica de mejora de la imagen, si se menciona el método por el cual se calcula desplazamiento y si se cuenta con un desplazamiento subpíxelico.

- Compensación de movimiento de cuerpo rígido en interferometría de moteado mediante técnicas fotográficas. En esta tesis el objetivo es desarrollar un método que permita compensar el movimiento en el plano del objeto, que ocurre después de desplazar éste, cuando se desean medir esfuerzos fuera del plano, usando un arreglo de interferometría speckle, usa la transformada de Fourier para luego compensar el desplazamiento en el plano y obtener el valor de la fase sin estas componentes. Este procedimiento permite reducir los errores presentes en las mediciones debidas al desplazamiento en el plano. El movimiento de un objeto en el espacio se puede separar en dos movimientos mutuamente independientes uno denominado en el plano (x,y) y otro fuera del plano (z) Se usa un arreglo de interferometría para medir desplazamientos fuera del plano debido a que el ángulo de iluminación no es nulo y las componentes en el plano aparecen como información de la fase obtenida, esto trae como consecuencia un error que en la medición

de la fase que no corresponde con el desplazamiento fuera del plano, entonces conociendo el movimiento en el plano se puede eliminar para solo tener el movimiento en el eje (z).

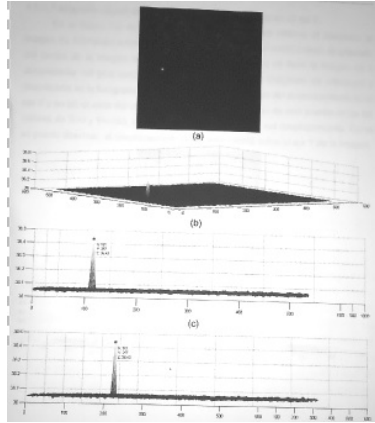


Figura 2.1: Imagen correlacionada.

- Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. En este artículo se utiliza un arreglo con sencibilidad en el plano de interferometría, para mejora de la imagen utiliza elementos de morfología digital, para la deformación de la probeta utiliza tensión, y el método para el cálculo del desplazamiento es por correlación de imágenes.[1]

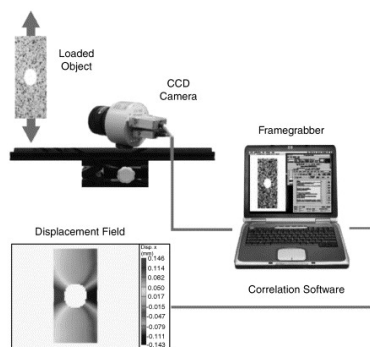


Figura 2.2: Prncio trabajo del sistema de correlación de la imagen digital.

- 3D ESPI System ($Q - 300$). Este dispositivo comercial pertenece a la marca Dante Dynamics, mide desplazamiento en 2D y 3D, para mejorar la imagen utiliza

binarización, y es normamente usado para deformaciones de probetas metálicas que estan sujetas a tensión o compresión. En el método de cálculo del desplazamiento utiliza la frecuencia de la longitud de onda del láser y el ángulo al que es incidido en la probeta. Se puede observar en la figura siguiente, éste es el modelo comercial de lo que se propone en la experimentación de este trabajo.[2]

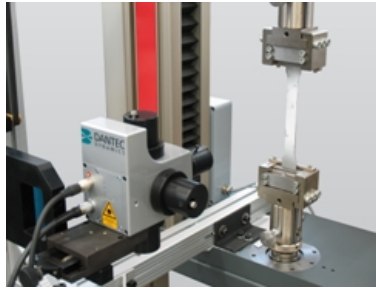


Figura 2.3: 3D ESPI System ($Q - 300$).

El 3D ESPI System ($Q - 300$) es un producto ya muy comercializado.

Aunque ya existen diferentes equipos o investigaciones para el cálculo de desplazamiento usando imagenes obtenidas por interferometría, se esta proponiendo una mejora en las imágenes adquiridas, y también un cálculo de desplazamiento subpixélico, basado en el concepto de disimilitud en la imagen.

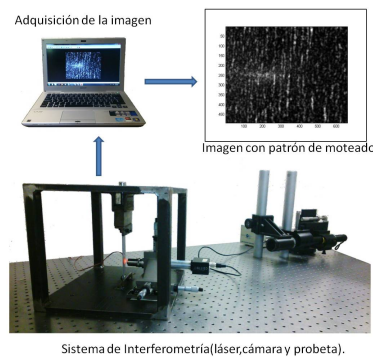


Figura 2.4: Sistema de interferometría y adquisición de la imagen.

Fundamento teórico.

En este capítulo se muestra el marco conceptual los términos de Interferometría, imágenes por computadora y las definiciones estadísticas para la evaluación de este trabajo.

3.1. Interferometría (Método de Moteado)

El desarrollo de la interferometría de moteado es útil en el análisis de vibración para usos industriales y medición de los campos de deformación. Existen arreglos interferométricos para la medición de deformaciones en el plano.[3]. El interferómetro de la figura 3.1 a) y b) corresponde a un interferómetro con sensibilidad en el plano (x,y) [4], [5], éste es el tipo de deformación que queremos detectar en la probeta de Al 6061.

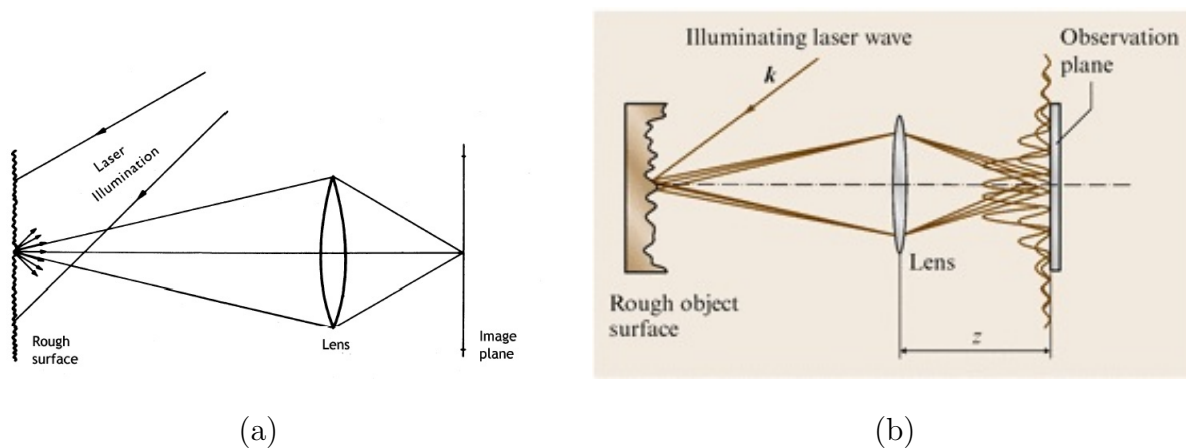


Figura 3.1: Interferómetro con sensibilidad en el plano (x,y) a) y b).

De este arreglo se obtiene la siguiente imagen que tienen el patrón de moteado.

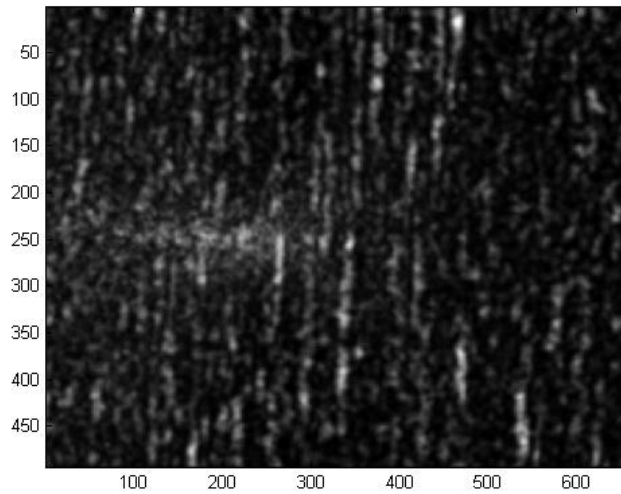


Figura 3.2: Imagen con patrón de Moteado

3.2. Visión por computadora

El procesamiento de imágenes tiene que ver con la adquisición, transmisión, procesamiento y representación de las imágenes. Las técnicas de proceso de imágenes se utilizan para mejorar la apariencia visual de las imágenes para un observador. El proceso digital de imágenes se puede dividir en las siguientes áreas:

- *Adquisición o captura.* Que se ocupa de los diferentes caminos para la obtención de imágenes; por ejemplo, utilizando cámaras digitales o digitalizando imágenes analógicas (fotografías).
- *Realce y mejora* son las técnicas que se usan para mejorar la apariencia visual de las imágenes para recuperar o restaurar las imágenes degradadas.
- *Segmentación* que se ocupa de la división de las imágenes en regiones o áreas significativas.
- *Extracción de características* que se ocupa de la detección y localización de entidades geométricas simples y complejas. Desde entidades simples como líneas y puntos, hasta geometrías complejas como curvas y cuádricas

En cuanto a la adquisición de la imagen se utiliza el arreglo de Interferometría arriba mencionado y para la mejora de la imagen se utiliza el suavizado que es una técnica que proporcionan una apariencia más suave de la imagen que es el hecho de eliminar el ruido. Uno de los operadores de suavizado es el filtro gaussiano.

- *Son una familia de filtros lineales con los pesos escogidos de acuerdo a la forma de una función gaussiana.*
- *son muy utilizados.*
- *Son buenos para eliminar el ruido.[6]*

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (3.1)$$

$$G(\mu, v) = e^{-(\mu-v)^2/2\sigma^2} \quad (3.2)$$

Dentro de la mejora de la imagen está definir los bordes de la imagen utilizando elementos de morfología. El objetivo de las transformaciones morfológicas es la extracción de estructuras geométricas en los conjuntos sobre los que se opera, mediante la utilización de otro conjunto de forma conocida denominado elemento estructurante. El tamaño y la forma de este elemento se escoge, a priori, de acuerdo la morfología del conjunto sobre el que va a interaccionar y de acuerdo a la extracción de formas que se desean obtener. Un ejemplo básico de elemento estructurante utilizado en la práctica se muestra en la figura:[7]

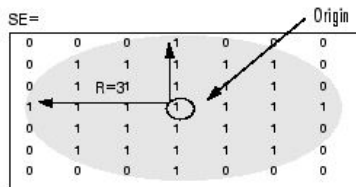


Figura 3.3: Elemento estructurante tipo círculo

La erosión de un conjunto X por un elemento estructurante Y se define como el conjunto de puntos o elementos x , pertenecientes a X , de forma que cuando el elemento estructurante Y se traslada a ese punto, el elemento queda incluido en X : [8]

$$\epsilon_Y(X) = \{x | Y_x \subseteq X\} \quad (3.3)$$

El efecto de una operación de erosión puede observarse en la figura 3.4, en la que un elemento estructurante Y , en forma de disco circular, hace desaparecer las estructuras de menor tamaño al elemento. [9]

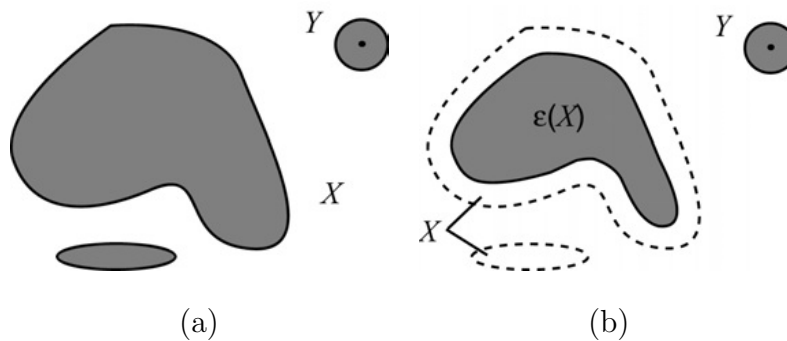


Figura 3.4: Efecto de la erosión

La dilatación es el conjunto de puntos origen del elemento estructurante Y tales que el elemento estructurante contiene algún elemento del conjunto X , cuando el elemento se desplaza por el espacio que contiene a ambos conjuntos:

$$\delta_Y(X) = \{x | Y_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (3.4)$$

3.2.1. Definición de característica de seguimiento

Podemos definir al borde de una imagen como puntos que tiene un alto valor del gradiente, mientras que las esquinas con puntos prominentes contenidos en una imagen son caracterizados por presentar también un alto valor del gradiente pero a diferencia de los bordes, este alto valor del gradiente no solo se manifiesta en una dirección sino en diferente.

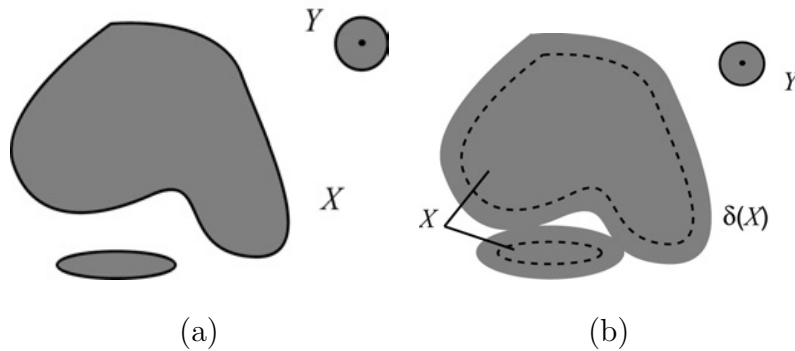


Figura 3.5: Efecto de la dilatación

Las esquinas pueden ser utilizadas en una amplia gama de aplicaciones tales como el seguimiento de un objeto en secuencia de video, para ordenar las estructuras de objetos en visión estereoscópica, como puntos de referencia en la medición de características geométricas de objetos o bien en la calibración de cámaras para sistemas de visión. Algunas de las ventajas de las esquinas sobre otras características obtenidas de una imagen no son la robustez al cambio de perspectiva así como su confiabilidad en su localización ante diferentes condiciones de luz.

Un algoritmo para la detección de las esquinas debe reunir algunos aspectos importantes tales como:

- *Detectar esquinas “importantes” de las “no importantes”.*
- *Detectar las esquinas en presencia del ruido propio de la imagen.*
- *Rápida ejecución para permitir su implementación en tiempo real .*

Como es de suponer, existen varios enfoques que son capaces de cumplir con estas características en donde la mayoría de ellos se basan en la medición del valor del gradiente en el punto que se considera como potencialmente esquina.[10].

La mayoría de los algoritmos utilizados para la detección de esquinas utilizan el criterio de la primera o segunda derivada sobre la imagen en la dirección x o y como aproximación del valor del gradiente.

El gradiente de una función continua $f(x,y)$ es un vector y su magnitud expresa la razón de cambio por unidad de distancia en la dirección del vector. El objetivo de los operadores gradiente es detectar cambios en los niveles de gris que tienen lugar en zonas o regiones reducidas. El gradiente y la magnitud se expresan por[6]:

$$grad[f(x, y)] = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right), \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) \right]^T \quad (3.5)$$

$$|grad[f(x, y)]| = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Los métodos basados en la primera derivada como el operador gradiente, constituyen los métodos con más proliferación dentro de la comunidad del análisis de imagen y la visión computacional. Se fundamentan en que un borde entre sí hay una discontinuidad en la función de la intensidad de la imagen, es decir, si la derivada de los valores de intensidad de la imagen es un máximo.

La ventana Prewitt tiene la siguiente estructura,

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

y tiene buena respuesta en los bordes horizontales y verticales, es poco sensible al ruido, proporciona la magnitud y dirección del borde, por otro lado tiene desventajas como mala respuesta en los borde diagonales , lentitud del cálculo y anchura del borde en varios pixeles.[6]

3.2.2. Desplazamiento en Imágenes

En la literatura existen muchos métodos para calcular el flujo óptico, los cuales pueden ser clasificados en tres grupos principalmente, aquellos basados en derivadas, aquellos basados en energía espacio temporal y finalmente los basados en suma de diferencias al cuadrado.

Una revision mas completa de flujo optico puede encontrarse en [11].[12]. El desplazamiento que se busca en las imagenes puede ser igualmente tratado como flujo óptico, así que por es que se utiliza ésta técnica. Se propone utilizar la información de la matriz $[G^T G]$, conocida también como tensor de estructura para detreminar los mejores puntos para realizar seguimiento. Entonces λ_1 y λ_2 son los eigen valores de $[G^T G]$ y se considera que un punto es candidato a representar una característica para seguimiento si $\min[\lambda_1 \text{ y } \lambda_2] > \lambda_e$, donde λ_e es un umbral, de acuerdo con esto, las esquinas de los objetos en movimiento son buenos puntos para realizar seguimiento [13]. La suma de diferencias al cuadrado, es una medida de proximidad entre dos imágenes consecutivas de una secuencia de video.

$$SSD(u, v) = \sum_{i \in L} [g_1(r_i + V_i) - g_2(r_i)]^2 \quad (3.7)$$

Los métodos de correspondencia, localmente encuentran el vector de desplazamiento $V = [u, v]$ entre dos imagenes g_1 y g_2 para una cierta posición $r = [x, y]$ minimizando la función SSD

$$SSD(V) = \sum_{s \in W} \omega(s) \times [g_1(r + s) - g_2(r + s + V)]^2 \quad (3.8)$$

donde $\omega(s)$ es la función de pesos. En esta función SSD, la suma es llevada a cabo de una ventana de tamaño $(2k + 1)^2$ centrada en $r = [x, y]$ y s son los puntos dentro de ω .

Muchos métodos basados en correspondencia realizan una búsqueda de un vector de desplazamiento (u, v) en un conjunto finito de pares y seleccionan aquel par que minimice la función SSD. Este método no tendrá problemas con derivadas pero la exactitud del método está limitada por la discretización del espacio de búsqueda. (Lo que en este trabajo se ha propuesto también una interpolación en los pixeles para que sea un cálculo subpíxelico.) El método de mínimos cuadrados[14], que consiste en encontrar el desplazamiento $\hat{V} = [\hat{u}, \hat{v}]$ que minimiza el residuo

$$\sum_{i \in W} [g_n(r_i + \hat{V}) - g_{n+1}(r_i)]^2 \quad (3.9)$$

donde $W, (W \subset L)$ es una pequeña ventana de la imagen, centrada en el punto para el cual

deseamos calcular el flujo optico o desplazamiento. Se aplica expansion en serie de Taylor y se obtiene un sistema sobredeterminado

$$(3.10) \quad \begin{pmatrix} D_x g_n(r_1) & D_y g_n(r_1) \\ D_x g_n(r_2) & D_y g_n(r_2) \\ \vdots & \vdots \\ D_x g_n(r_n) & D_y g_n(r_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D_t g_n(r_1) \\ -D_t g_n(r_2) \\ \vdots \\ -D_t g_n(r_n) \end{pmatrix}$$

en forma matricial, $G\hat{V} = e$, cuya solución es por mínimos cuadrados dada por

$$\hat{V} = [G^T G]^{-1} G^T e \quad (3.11)$$

Experimentación

En este capítulo se describe el método que se utilizan para el desarrollo del proyecto como son:

- Adquisición de las imágenes por Interferometría, que incluye realizar la experimentación para deformar el aluminio, armar el arreglo de interferometría, y seleccionar la imagen mejor tomada de la experimentación.

Probar el algoritmo de desplazamiento que consta de:

- Algoritmo de realce y mejora
 - Selección de la mejor característica de seguimiento.
 - Algoritmo de seguimiento.
- El análisis estadístico que se explica en el capítulo siguiente.

En la diagrama de la figura 4.1 podemos observar la metodología que se siguió para la experimentación.

4.1. Adquisición de las imágenes por Interferometría.

Para adquirir las imágenes que representan el desplazamiento que se observa, se diseñó en CIDESI un soporte para poder deformar la probeta de aluminio como se muestra en la figura 4.2, del cual se sujeta la probeta de Aluminio 6061 que es a la que se le puede aplicar tensión o calentar a través de una celda peltier para poder obtener la deformación. La probeta de Al 6061 esta sujeta por ambos extremos y con las características de 2cm de ancho por 12 cm de largo para que al aplicar tensión se tenga un desplazamiento en una sola dirección.

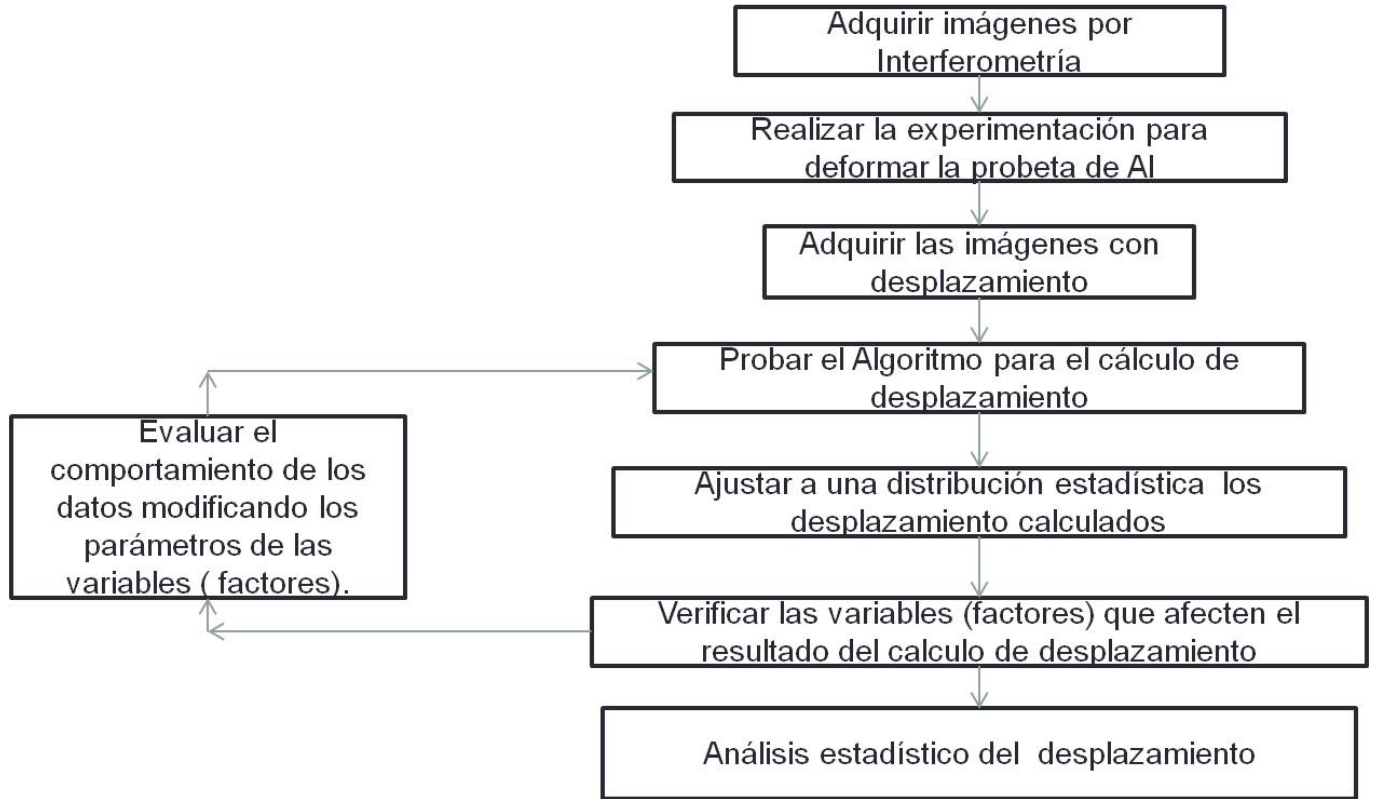
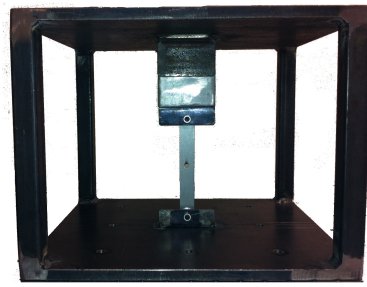


Figura 4.1: Metodología

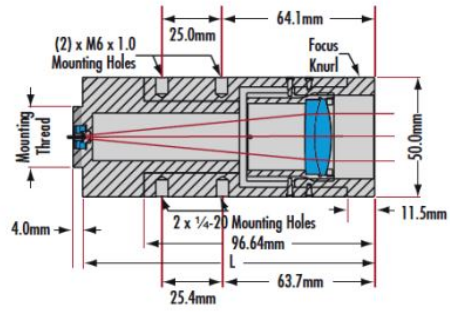
Para el arreglo de interferometría se utilizan un láser y su fuente marca Reo de Helium-Neon de 633 nm longitud de onda, un colimador marca Edmund Optics que está ensamblado en el láser figura 4.2 b) y soportados por un arreglo marca Edmund de avance micrométrico para la mejor alineación del láser, para la adquisición de la imagen se tiene una cámara Marca Allied RGB, un tubo adaptador maquinado en CIDESI de la cámara a un objetivo de microscopio marca Edmund de 40 u 80 aumentos, para soportar la cámara y eliminar vibraciones o desplazamientos que no son los desplazamientos del aluminio se utiliza una mesa micrométrica con movimiento en los ejes (x,y,z) .

Al hacer incidir el láser en la probeta de Al6061 como se observa en la figura 4.3, se refracta el rayo incidido en el aluminio hacia diferentes direcciones lo cual debido a la rugosidad del Al que para que se lleve a cabo el efecto de interferencia debe ser de mayor rugosidad que la longitud de onda del láser de 633 nm, entonces se interfieren los rayos refractados y se forma la imagen con un patrón moteado, el arreglo tiene sensibilidad en el plano (x,y) y



(a)

Complete Beam Expander



(b)

Figura 4.2: Soporte de probeta de ensayo a), Colimador b).

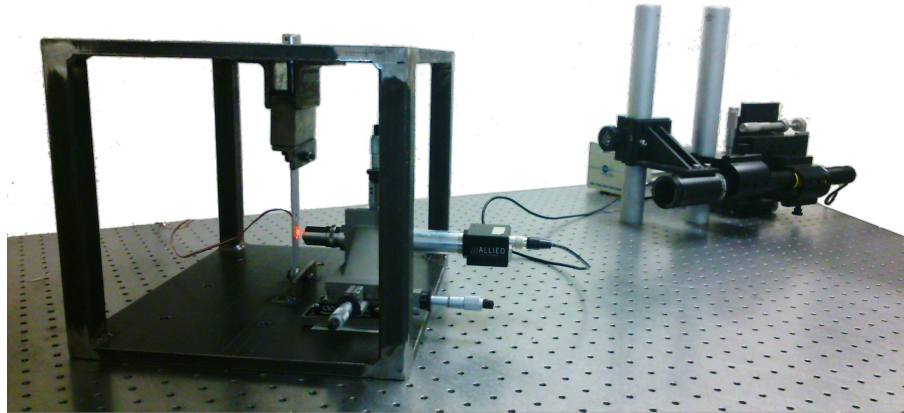


Figura 4.3: Interferómetro con sencibilidad en el plano (x,y)

se genera una imagen como la que se muestra en la figura 4.4.

Entonces se desarrolla el algoritmo de realce y mejora, que elimina el brillo y quita el ruido en la imagen, para esto entramos en lo que se llama visión por computadora terminamos con la interferometría ya que los cálculos del desplazamiento no se hacen considerando la longitud de onda, el proceso es el siguiente

- Entra Imagen1
- $ie = \text{filtromorfológico}(Imagen1);$

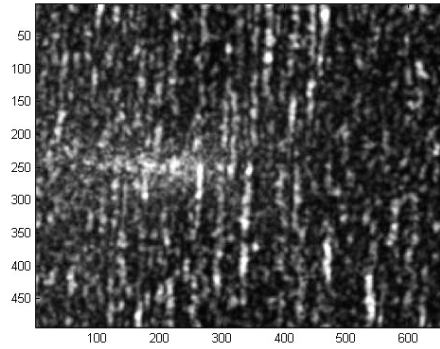


Figura 4.4: Imagen con patrón de Moteado

- `img1=filtrogaussiano(ie);`

Se muestra el resultado de la imagen 4.5 a) al aplicarle el filtro morfológico, imagen 4.5 b)

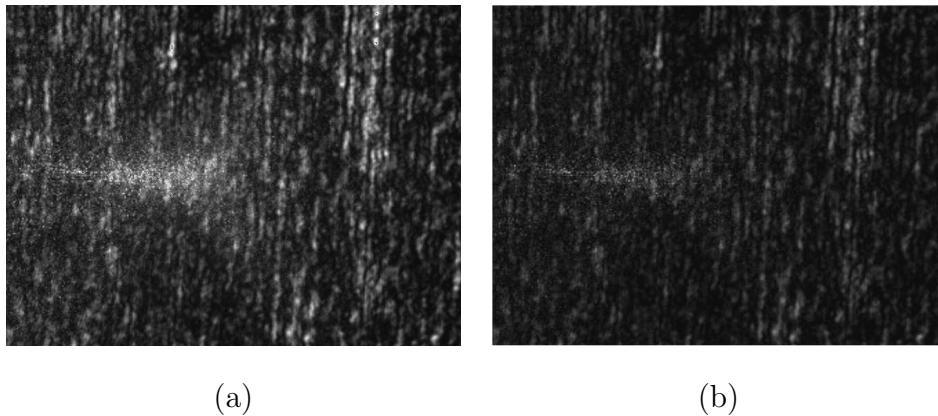


Figura 4.5: Imagen adquirida a), e imagen adquirida con filtro morfológico b).

Se muestra el resultado de la imagen 4.6 a) al aplicarle el filtro gaussiano 4.6.b).

El filtro morfológico ha quitado el brillo que se origina por el reflejo del lente que esta en el objetivo de microscopio, y el filtro gaussiano ha quitado el fondo negro. Con esto podemos observar que le podemos quitar información a la imagen original tanta como lo que se requiera o tanta como para perder la información fundamental y lo que se observa es que la información que se le entregue al código de seguimiento depende de los parámetros (elemento estructurante) de los filtros usados.

Seguimos en el algoritmo que calcula el desplazamiento y una vez que tenemos la imagen

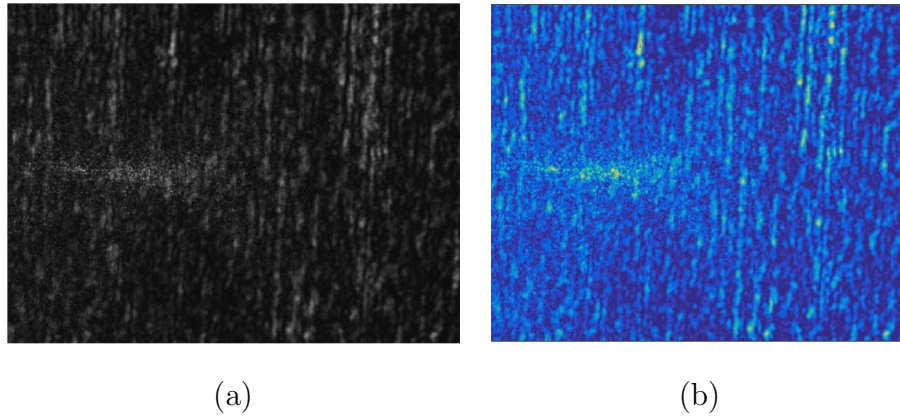


Figura 4.6: Imagen a), imagen con filtro gaussiano b).

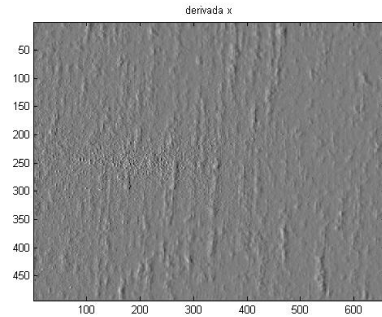
tratada, vamos a encontrar los puntos que serán de referencia para ser encontrados en la siguiente imagen que ya tiene un desplazamiento. Basándonos en el criterio del artículo "Good feature to track" [13], donde se aplican tensores para encontrar la mejor característica de seguimiento, refiriéndonos que son esquinas ya que son invariantes a rotación y tamaño. A continuación se muestra el pseudocódigo. [15]

- Se selecciona el tamaño de la ventana de seguimiento.
- Se aplica la primera derivada en x a la imagen1.
- Se aplica la primera derivada en y a la imagen1.
- se construye la matriz de tensores
- se calculan los eigenvalores

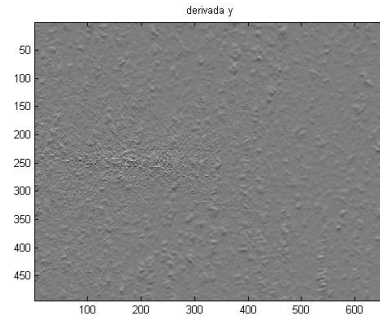
En la figura 4.7 a) se muestra el efecto sobre la imagen de la derivada en x y la dirección de la información que nos brinda la imagen, y en la figura 4.7 b) se muestra el efecto de la derivada en y en la imagen.

Una vez que se encuentran los eigenvalores de la matriz de tensores según el artículo "Good feature to track" [13], si λ_1 y λ_2 son diferentes de 0, se utiliza un umbral de los máximos para seleccionar a las mejores características de seguimiento en la imagen1.

Pseudocódigo de seguimiento.

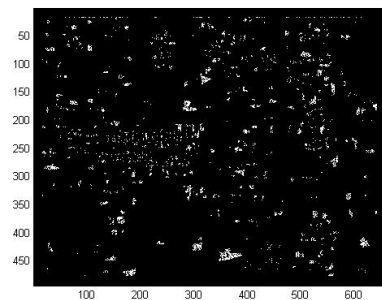


(a)

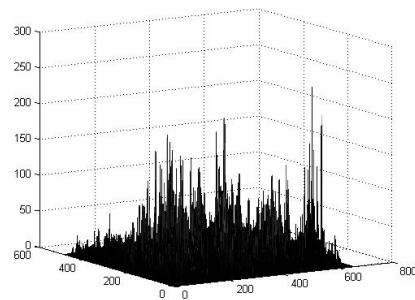


(b)

Figura 4.7: Derivada en x a), Derivada en y b).



(a)



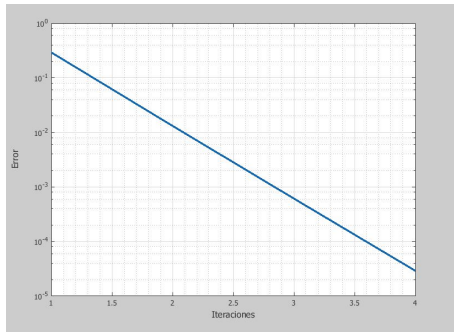
(b)

Figura 4.8: Reperentación de los máximos a), Mesh de los máximos b).

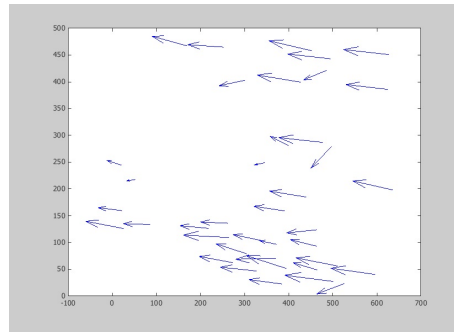
- Reconoce la posición de la característica seleccionada.
- Calcula el gradiente de la imagen1.
- Interpola la posición de la característica seleccionada para tener una posición más exacta (más pequeño que un pixel).
- Interpola entre la posición de la característica seleccionada y la posición que resultado del gradietnte de la imagen1.
- Construye la matriz de tensores.
- Calcula el vector de desplazamiento por mínimos cuadrados.[13]

- Si el error es muy grande regresar al punto tres para disminuir la diferencia entre la característica seleccionada y el resultado del gradiente.

En la figura 4.9 a) se ha graficado el error del hecho de acercarse con cada iteración a la característica seleccionada en la imagen 1, o lo que en el artículo de referencia se plantea como minimizar la disimilitud, y en la figura 4.9 b) se tienen los vectores de desplazamiento finales, lo que nos da entrada al siguiente capítulo ya que la tendencia del desplazamiento y la magnitud dependen de los parámetros del algoritmo.



(a)



(b)

Figura 4.9: Gráfica del error a), Vectores de desplazamiento encontrados b).

Análisis Estadístico y resultados

A lo largo del periodo de experimentación y muestreo se observó que se tienen tres variables que afectan la información que se le entrega al algoritmo que calcula el desplazamiento, una es cuando se le quita el brillo a la imagen o lo que es el contraste, que consta del filtro morfológico formado por la erosión y la dilatación (top hat) de un elemento estructurante que no es más que el tamaño y forma de una ventana de seguimiento por toda la imagen.

$$\varepsilon_{\lambda}(f) \leq f(x) \leq \delta_{\lambda}(f)$$

Donde $\varepsilon_{\lambda}(f)$ es la erosión, $\delta_{\lambda}(f)$ es la dilatación y $f(x)$ la imagen.

La otra variable es la intensidad en donde se aplica el filtro gaussiano del cual tiene como parámetros una ventana de un determinado tamaño que hace el recorrido y el valor de sigma que será el parámetro determinante de la intensidad de color resultante.

$$P(g(x, y) - \sigma < f(x, y) < g(x, y) + \sigma) = 70\% \quad (5.1)$$

$$P(g(x, y) - 2\sigma < f(x, y) < g(x, y) + 2\sigma) = 90\% \quad (5.2)$$

Otra variable que se detectó en el algoritmo es que a los máximos se les asigna una región para proporcionar información alrededor de un máximo entonces se aplica otro elemento de morfología que es la dilatación con un elemento estructurante tipo disco.

Al variar los parámetros de estas tres variables se obtienen valores de desplazamiento muy diferentes en magnitud y dirección, por lo que se propone una tabla de los parámetros mas representativos de las variables y una aleatorización (n^r) de los parámetros para evaluar los resultados.

| | | | |
|--------------|--------------|-----------|------------|
| Contraste | 10(A1) | 20(A2) | 30(A3) |
| Intensidad | 13, 0.5 (B1) | 13,1 (B2) | 9, 0.5(B3) |
| Agrupamiento | 9 (C1) | 13(C2) | 31(C3) |

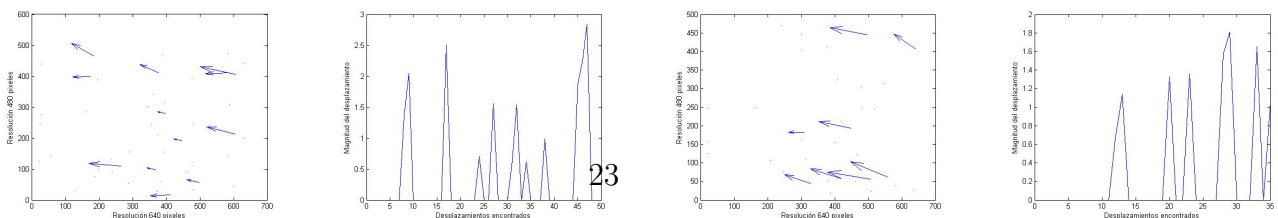
Cuadro 5.1: parametros

Aleatorización.

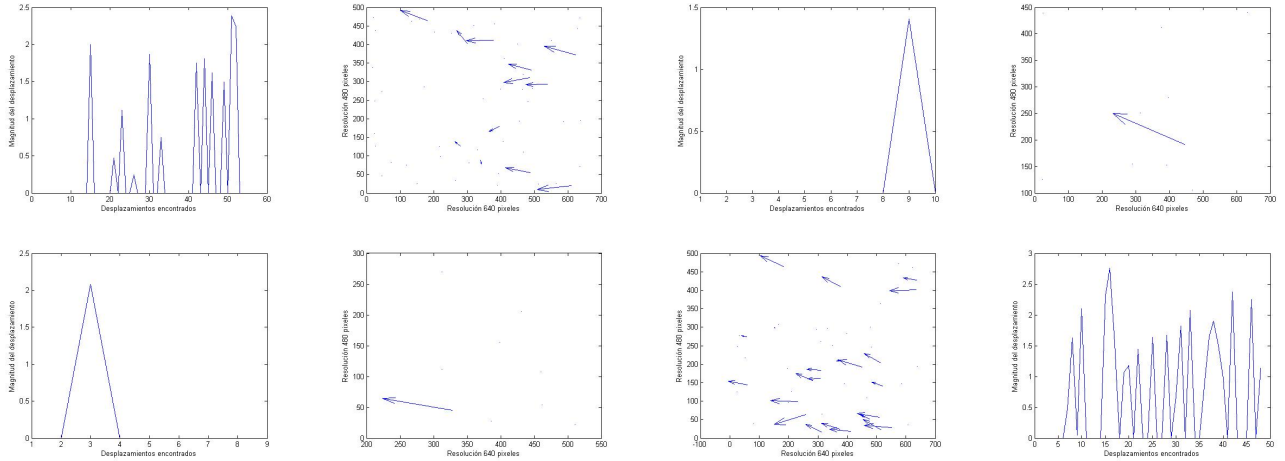
| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 |
| B1 | B1 | B1 | B1 | B1 | B1 | B1 | B1 | B1 |
| C1 | C1 | C1 | C2 | C2 | C2 | C3 | C3 | C3 |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 |
| B2 | B2 | B2 | B2 | B2 | B2 | B2 | B2 | B2 |
| C1 | C1 | C1 | C2 | C2 | C2 | C3 | C3 | C3 |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 | A1 | A2 | A3 |
| B3 | B3 | B3 | B3 | B3 | B3 | B3 | B3 | B3 |
| C1 | C1 | C1 | C2 | C2 | C2 | C3 | C3 | C3 |

Cuadro 5.2: Vectores de desplazamiento a), b), c).

Tres variables a escoger de tres tipos dio como resultado 27 combinaciones posibles, ejecutando el algoritmo con cada combinación, en algunos casos no converge el método, en otros casos se observa que los resultados son muy pocos, también hay casos en los que hay mucha dispersión en los datos. Se ponen algunos ejemplos en la imagen 5.3.

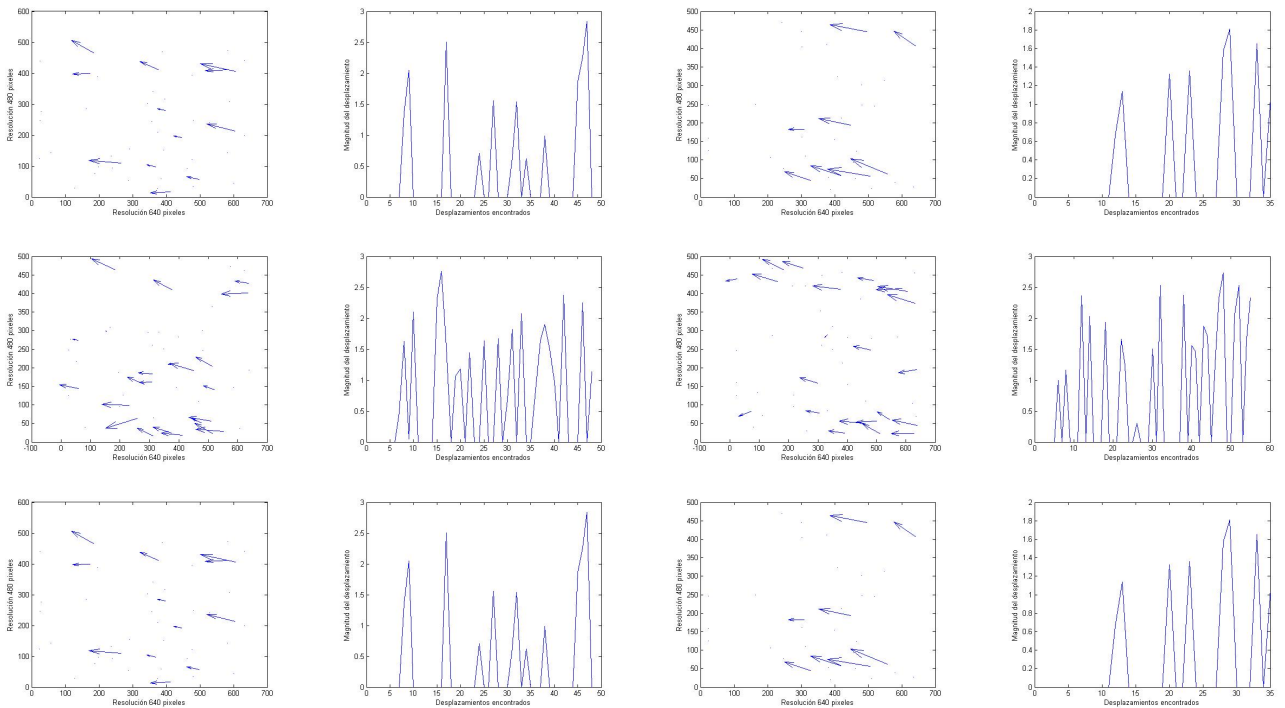


Continua...



Cuadro 5.3: Ejemplos de los resultados de las combinaciones.

De lo cual las mejores combinaciones fueron las combinaciones 1,2,10,11,19 y 20 como se muestra en 5.4.



Cuadro 5.4: Mejores combinaciones.

Así mismo los valores de desplazamiento de dichas combinaciones.

| 1 | 2 | 10 | 11 | 19 | 20 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1.359550637 | 0.65727151 | 0.473866239 | 0.993656946 | 1.359550637 | 0.65727151 |
| 2.049153788 | 1.136262669 | 1.62891635 | 1.165378469 | 2.049153788 | 1.136262669 |
| 2.501161651 | 1.326553959 | 0.047438388 | 2.363220564 | 2.501161651 | 1.326553959 |
| 0.708446723 | 1.359038163 | 2.104320135 | 2.03000762 | 0.708446723 | 1.359038163 |
| 1.558099852 | 1.569303143 | 2.310549748 | 1.930056493 | 1.558099852 | 1.569303143 |
| 0.640042454 | 1.80970974 | 2.755763225 | 1.662508629 | 0.640042454 | 1.80970974 |
| 1.53710079 | 1.652301716 | 1.536686989 | 1.237215356 | 1.53710079 | 1.652301716 |
| 0.622420314 | 1.058968526 | 1.063755821 | 0.306274273 | 0.622420314 | 1.058968526 |
| 0.984417987 | | 1.179268801 | 1.500983778 | 0.984417987 | |
| 1.860888125 | | 1.439790374 | 2.528532998 | 1.860888125 | |
| 2.261826118 | | 1.634946525 | 2.369209545 | 2.261826118 | |

Cuadro 5.5: Magnitud de desplazamiento.

Finalmente calculamos la desviación estándar del conjunto de datos.

| | 1 | 2 | 10 | 11 | 19 | 20 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| s | 0.7733 | 0.5872 | 0.9563 | 0.8652 | 0.7733 | 0.5872 |

Cuadro 5.6: Desviación estándar.

Conclusiones.

Podemos concluir que de los parámetros fueron

| | |
|--------------|--------------|
| Contraste | 20(A2) |
| Intensidad | 13, 0.5 (B1) |
| Agrupamiento | 9 (C1) |

Cuadro 6.1: Parámetros finales.

Haciendo una corrida se obtienen las imágenes siguientes.

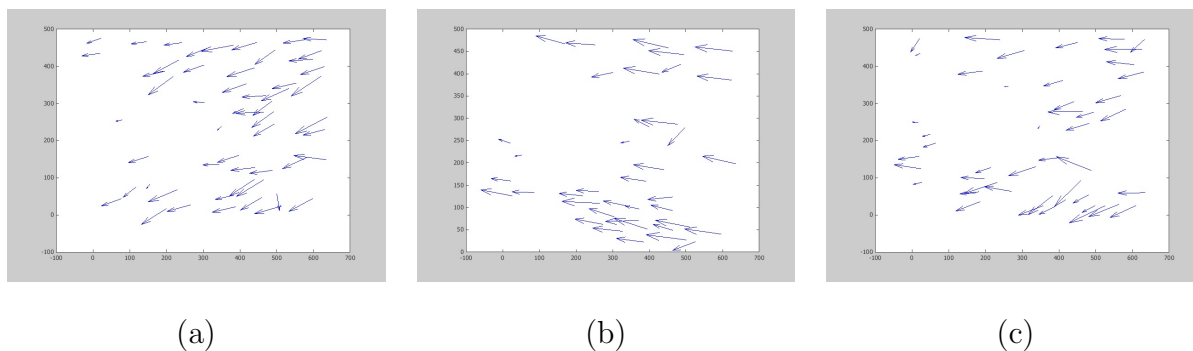


Figura 6.1: Vectores de desplazamiento a), b), c).

Y su valores de desplazamiento son los siguientes.

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 0.542030712 | 0.372145544 | 0.106131270 |
| 0.286289771 | 0.323056544 | 0.118616814 |
| 0.582780671 | 0.266204449 | 0.307493411 |
| 0.588399994 | 0.11613942 | 0.299134509 |
| 0.666048502 | 0.369701639 | 0.373730488 |

Continua...

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 0.459726777 | 0.288805802 | 0.470746387 |
| 0.626450161 | 0.267455469 | 0.367801775 |
| 0.705655257 | 0.092459718 | 0.269165731 |
| 0.605789687 | 0.504021116 | 0.465699094 |
| 0.780405542 | 0.398413701 | 0.467966257 |
| 0.871250043 | 0.521993431 | 0.454894319 |
| 0.405744662 | 0.550262063 | 0.56339783 |
| 0.422317776 | 0.430225066 | 0.338537932 |
| 0.68119675 | 0.553851228 | 0.435573047 |
| 0.532107291 | 0.313190308 | 0.455440755 |
| 0.371818651 | 0.43352369 | 0.655248217 |
| 0.519115353 | 0.37678651 | 0.345883884 |
| 0.577040134 | 0.197568237 | 0.625498063 |
| 0.293263385 | 0.383112277 | 0.427434598 |
| 0.102523246 | 0.461397254 | 0.312981249 |
| 0.406693337 | 0.414132098 | 0.305631038 |
| 0.528367806 | 0.580368567 | 0.577724806 |
| 0.431631451 | 0.512512653 | 0.554139835 |
| 0.432387292 | 0.334986438 | 0.413575048 |
| 0.613275355 | 0.398225336 | 0.336913188 |
| 0.407493996 | 0.210006426 | 0.53280559 |
| 0.538570638 | 0.444333149 | 0.559121033 |
| 0.815033734 | 0.459610367 | 0.571361906 |
| 0.711400727 | 0.426990038 | 0.425466425 |
| 0.510169812 | 0.520546471 | 0.938290141 |
| 0.596083617 | 0.431847613 | 0.536007398 |

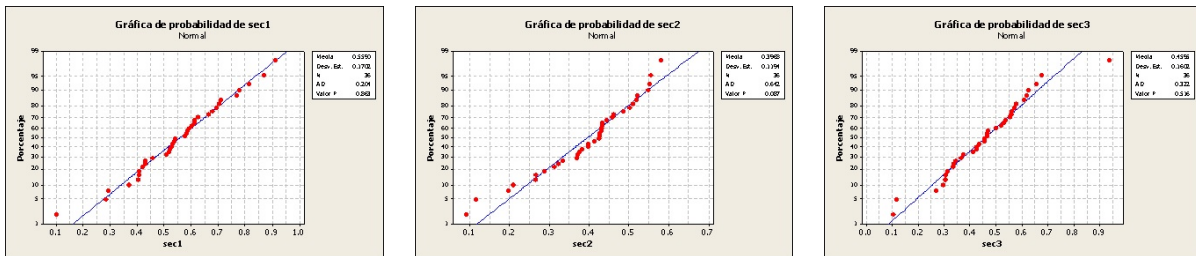
Continua...

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 0.770678113 | 0.426041612 | 0.521052955 |
| 0.694570254 | 0.486941473 | 0.619639678 |
| 0.912979098 | 0.555588386 | 0.677213693 |
| 0.522891382 | 0.43380985 | 0.610163140 |
| 0.611399104 | 0.427943528 | 0.501369022 |

Cuadro 6.2: Magnitud de los vectores de desplazamiento a), b), c).

Para analizar la magnitud primeramente verificamos si los datos son normales.

Para esto hay dos pruebas que podemos utilizar , la de Anderson-Darlin o la de lilliefors.



(a)

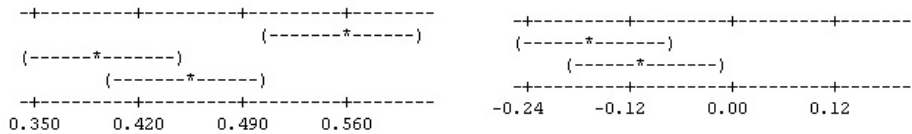
(b)

(c)

Figura 6.2: Gráficas de normalidad a), b), c) respectivamente.

En las gráficas se observa la tendencia lineal y el valor de de p-value mayor a 0.05.

En las gráficas de intervalos podríamos pensar que la secuencia 1 está fuera de la media de las otras dos secuencias sin embargo al hacer una comparación con las otras dos secuencias podemos ver que si es significativa y que también la consideraremos como buena.



(a)

(b)

Figura 6.3: Grafica de Intervalos a), comparación con la sec 1 b).

Por último se muestran los estadísticos media, desviación estándar y moda.

| Variable | Media | Desv.Est. | Varianza |
|----------|--------|-----------|----------|
| sec1 | 0.5590 | 0.1702 | 0.0290 |
| sec2 | 0.3968 | 0.1194 | 0.0143 |
| sec3 | 0.4595 | 0.1602 | 0.0257 |

Cuadro 6.3: Vectores de desplazamiento a), b), c).

Se concluye que el valor del desplazamiento calculado depende de los parámetros de las variables que interfieren en proporcionar información al seleccionar el mejor punto de referencia (característica) o lo que llamamos esquina que son el tamaño del elemento estructurante, el suavizado que se le dé a la imagen con el filtro gaussiano, y el tamaño del cúmulo alrededor del máximo como región de búsqueda, también se concluye que se necesita un mejor control al obtener los desplazamientos físicos para no tener algún tipo de vibraciones que afecte la toma de desplazamientos.

Bibliografía

- [1] D. Lecompte, A. Smits, S. Bossuyt, H. Sol, J. Vantomme, D. Van Hemelrijck, and A. Habraken, “Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation,” *Optics and lasers in Engineering*, vol. 44, no. 11, pp. 1132–1145, 2006.
- [2] T. Siebert and M. J. Crompton, “Application of high speed digital image correlation for vibration mode shape analysis,” in *Application of Imaging Techniques to Mechanics of Materials and Structures, Volume 4*, pp. 291–298, Springer, 2013.
- [3] A. Martínez, J. Rayas, and J. Madrid Garay, “Medición de la evolución temporal de los campos dinámicos de desplazamiento mediante interferometría de moteado para una probeta de latón,” *Revista mexicana de física*, vol. 56, no. 3, pp. 262–267, 2010.
- [4] M. Vannoni and G. Molesini, “In-plane, out-of-plane, and time-average speckle interferometry experiments with a digital photcamera,” in *OPTO-Ireland*, pp. 617–626, International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [5] W. N. Sharpe Jr and W. N. Sharpe, *Springer handbook of experimental solid mechanics*. Springer, 2008.
- [6] M. Jiménez, J. Antonio, B. Arias Pérez, D. González Aguilera, and J. Gómez Lahoz, “Procesamiento avanzado de imágenes digitales, 2010-11,” 2010.
- [7] E. V. C. Jimenez and D. Z. Navarro, “Visión por computador utilizando matlab y el toolbox de procesamiento digital de imágenes,” 2007.

- [8] P. Soille, *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2 ed., 2003.
- [9] F. G. Ortiz Zamora, *Procesamiento morfológico de imágenes en color: aplicación a la reconstrucción geodésica*. 2002.
- [10] E. Cuevas, D. Zaldívar, and M. Pérez, “Procesamiento digital de imágenes con matlab y simulink,” *Alfaomega Ra-Ma (México)*, 2010.
- [11] S. S. Beauchemin and J. L. Barron, “The computation of optical flow,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 27, no. 3, pp. 433–466, 1995.
- [12] F. Calderón Solorio, M. Zaleta, and J. Luis, “Un nuevo algoritmo para el calculo de flujo optico y su aplicacion al registro de imagenes,” *Computacion y Sistemas*, vol. 6, no. 3, pp. 213–226, 2003.
- [13] J. Shi and C. Tomasi, “Good features to track,” in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. Proceedings CVPR’94., 1994 IEEE Computer Society Conference on*, pp. 593–600, IEEE, 1994.
- [14] C. Tomasi and T. Kanade, *Detection and tracking of point features*. School of Computer Science, Carnegie Mellon Univ. Pittsburgh, 1991.
- [15] E. Trucco and A. Verri, *Introductory techniques for 3-D computer vision*, vol. 201. Prentice Hall Englewood Cliffs, 1998.