

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

***FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA INGENIERÍA CIVIL***

**TEMA:**

**"Medición de las deformaciones unitarias y desplazamientos de especímenes de laboratorio, mediante un software de procesamiento de imágenes"**

**AUTOR:**

**Calderón Coronel, Bryan Francisco**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Barros Cabezas, José Andrés**

**Guayaquil, Ecuador**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

### **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Calderón Coronel, Bryan Francisco**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

#### **TUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**Barros Cabezas, José Andrés**

#### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_

**Alcívar Bastidas, Stefany Esther**

**Guayaquil, a los 21 días del mes de Septiembre del año 2018**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Calderón Coronel, Bryan Francisco**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil, Medición de las deformaciones unitarias y desplazamientos de especímenes de laboratorio mediante un software de procesamiento de imágenes**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 21 días del mes de Septiembre del año 2018**

**EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**Calderón Coronel, Bryan Francisco**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

**Yo, Calderón Coronel, Bryan Francisco**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Medición de las deformaciones unitarias y desplazamientos de especímenes de laboratorio mediante un software de procesamiento de imágenes**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 21 días del mes de Septiembre del año 2018**

**EL AUTOR:**

f. \_\_\_\_\_

**Calderón Coronel, Bryan Francisco**

# REPORTE URKUND



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TRABAJO DE TITULO CALDERON.pdf (D40966835)  
**Submitted:** 8/24/2018 8:45:00 PM  
**Submitted By:** claglas@hotmail.com  
**Significance:** 6 %

Sources included in the report:

2017-01-23 recopilacion.doc (D25375998)

Instances where selected sources appear:

7

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y a todas las personas que me apoyaron incondicionalmente durante mi carrera, especialmente a la Sra. María Salvatierra Bravo, Gabriela Ormazábal Salvatierra, José Barros Cabezas, Carlos Alberto Vargas.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis de grado a mi familia, en forma de agradecimiento por todo el esfuerzo y cariño que me han brindado.



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

f. \_\_\_\_\_

**José Andrés Barros Cabezas**

TUTOR

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Luis Octavio Yépez Roca**

OPONENTE

f. \_\_\_\_\_

**Stefany Esther Alcívar Bastidas**

DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Hernández Barredo, Jaime Francisco**

DELEGADO DE COORDINADOR DEL ÁREA

# CONTENIDO

Capítulo 1 .....	2
1 Introducción .....	2
1.1 Antecedentes.....	3
1.1.1Historia sobre la correlación de imágenes.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	4
1.3 Alcance.....	4
1.4 Organización del Documento .....	5
Capítulo 2 .....	4
2 Marco Teórico.....	4
2.1 Correlación de Imágenes.....	4
2.1.1Criterios de Correlación.....	8
2.1.2 Matlab y la función cpcorr.m.....	11
Capítulo 3 .....	13
3 Procedimiento experimental .....	13
3.1 GIMP2 .....	14
3.2 FREESTUDIO.....	15
3.3 Proceso .....	15
3.4 Variables a considerar durante la captura de imágenes.....	22
3.4.1 Iluminación .....	22
3.4.2 Velocidad del ensayo .....	24
3.4.3Técnicas de pintura .....	25
Capítulo 4 .....	30
4 Análisis de resultados.....	30

4.1 Ensayo 1.....	30
4.2 Ensayo 2.....	30
4.3 Ensayo 3.....	31
4.3.1 Primera medición .....	32
4.3.2 Segunda medición.....	34
4.3.3 Tercera medición.....	35
4.3.4 Cuarta medición .....	36
4.3.5 Quinta medición .....	37
4.3.6 Sexta medición .....	38
4.4 Ensayo 4.....	41
4.4.1 Primera medición .....	42
4.4.2 Segunda medición.....	43
4.4.3 Tercera medición.....	45
4.4.4 Cuarta medición .....	46
4.5 Ensayo 5.....	50
Capítulo 5 .....	53
5 Recomendaciones y Conclusiones.....	53
5.1 Conclusiones .....	53
5.2 Recomendaciones .....	55
Referencias.....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Coordenadas de un subconjunto (sacado de documento publicado por Universidad Politécnica de Madrid (de la Ossa Pérez & Natario Vaquero, 2015).....	5
Figura 2 Transformación lineal que ocurre en las coordenadas de un subconjunto sacado de documento publicado por Universidad Politécnica de Madrid (de la Ossa Pérez & Natario Vaquero, 2015).....	8
Figura 3 Criterio de correlación cruzada normalizada y Criterio de normalizado de mínimos cuadrados .....	10
Figura 4 Esquema de la rejillas, dentro de la región de interés . .....	12
Figura 5 Ventana principal del software Free Studio .....	16
Figura 6 Ventana principal del convertidor de video en imágenes JPG.....	16
Figura 7 Ventana con la opción de cambiar el formato y las escalas. ....	17
Figura 8 Carpeta donde se debe escoger la primera imagen ya procesada para crear la lista de archivos.....	17
Figura 9 Ventana donde se muestra la lista de imágenes y se debe escoger la imagen base para crear la rejilla .....	18
Figura 10 ROI se ha marcado en el cuadro con la rejilla de color azul. ....	20
Figura 11 El recuadro de azul representa la región de interés , el input representa la resolución de la imagen que queremos analizar .....	19
Figura 12 Rejilla que reconocerá la posición original y como esta irá cambiando. ....	20
Figura 13 Función automate_image en proceso imagen 1804 de 9695. ....	21
Figura 14 Función Automate_image en proceso imagen 4136 de 9695.....	21
Figura 15 Ensayo realizado sobre un borrador (material flexible) con una carga puntual variable, con luz natural siendo las 10:14:04 de la mañana...22	
Figura 16 Posición de la luz creando una zona de sombra en ROI .....	23
Figura 18 Marcador de tinta verde claro sobre el espécimen( borrador flexible). ....	25
Figura 17 Marcador negro y Líquido corrector sobre el espécimen (borrador flexible) .....	26
Figura 19 Marcador de tinta roja sobre espécimen (borrador flexible).....	26

Figura 21 Técnica de moteado (derecha) y puntos con ubicación referenciada (izquierda) sobre espécimen (madera). .....	27
Figura 22 Técnica de moteado (derecha) y puntos con ubicación referenciada (izquierda) sobre espécimen (madera). .....	28
Figura 23 Técnica de moteado (derecha) y puntos con ubicación referenciada (izquierda) sobre espécimen (madera). .....	28
Figura 24 Especimen sometido a la compresión simple. ....	31
Figura 25 Ubicación del segundo punto, primera medición. ....	32
Figura 26 Ubicación del primer punto, primera medición. ....	32
Figura 28 Ubicación del segundo punto, segunda medición. ....	34
Figura 27 Ubicación del primer punto, segunda medición. ....	34
Figura 31 Ubicación del primer punto, cuarta medición. ....	36
Figura 32 Ubicación del segundo punto, cuarta medición. ....	36
Figura 35 Ubicación del primer punto, sexta medición. ....	38
Figura 36 Ubicación del segundo punto, sexta medición. ....	38
Figura 37 Resultado de las diferentes mediciones, en los distintos puntos de referencia. ....	39
Figura 38 Carga aplicada en KN vs deformación unitaria durante el ensayo	40
Figura 39 Línea de tendencia de la mejor medición y la lectura de los strain gauges. ....	40
Figura 40 Especimen sometido a compresión simple. ....	41
Figura 42 Ubicación del primer punto, primera medición. ....	42
Figura 41 Ubicación del segundo punto, primera medición. ....	42
Figura 49 Resultados obtenidos en todas las mediciones, por el método tradicional de los strain gauges y la correlación de imágenes. ....	48
Figura 50 Resultados obtenidos de los strain gauges. Se representa el promedio de las cuatro mediciones, y la línea de tendencia del promedio. ...	49
Figura 51 Briqueta ensayada en la máquina N.A.T. ....	50
Figura 52 Resultados obtenidos de la máquina N.A.T. (registros 1 2,3,4,5,6,7,8,9,10). Medición por CID, representa los datos obtenidos mediante la correlación de imágenes. ....	51
Figura 53 Especimen sometido a compresión simple. ....	41
Figura 54 Ubicación del primer punto, primera medición. ....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de los datos y resultados del espécimen 1 .....	30
Tabla 2 Resumen de los datos y resultados del espécimen 2 .....	30
Tabla 3 Resumen de los datos y resultados del espécimen 3 .....	31
Tabla 4 Resultados obtenidos de los strain gauges.....	32
Tabla 5 Resultados de la primera medición.....	33
Tabla 6 Resultados de la segunda medición. ....	34
Tabla 7 Resultados de la tercera medición.....	35
Tabla 8 Resultados de la cuarta medición. ....	36
Tabla 9 Resultados de la quinta medición. ....	37
Tabla 10 Resultados de la sexta medición. ....	38
Tabla 11 Resultados obtenidos de los strain gauges en la segunda medición, al mismo espécimen. ....	41
Tabla 12 Resultados obtenidos de la primera medición .....	42
Tabla 13 Resultados obtenidos de la segunda medición .....	43
Tabla 14 Resultados obtenidos de la tercera medición .....	44
Tabla 15 Resultados de la cuarta medición.....	47
Tabla 16 Resultados obtenidos por el promedio de las cuatro mediciones, mediante la correlación de imágenes. ....	48
Tabla 17 Resumen de los datos obtenidos de la maquina N.A.T. ....	51
Tabla 18 Resumen de las características del espécimen (briqueta).....	51
Tabla 19 Resultados del error relativo porcentual, entre el último dato obtenido por el N.A.T. y el último obtenido de la correlación de imágenes.	52

## ABSTRACT

As technology moves forward, it is important to use the tools that technology itself provides to us. This work proposes a practical application of artificial vision, which is based on the processing of images and the use of algorithms and subroutines to determine, quantify and visualize an unlimited number of answers to the problems that constantly arise in any scientific field.

During the development of this investigation, mortars, wooden scale beams and asphalt briquettes, were tested on to determine its unitary deformations and displacements. Taking into account the different variables as illumination, test speed, painting techniques, capacity and recording quality. All these gave a result with a margin of error ranging between 5% and 45% when compared to traditional measuring methods.

Other universities have developed, with success, applications with similar techniques that reduce the cost of measurements that are made to different mechanical tests, with the use of measurements based on image processing.

**Key words:** *Image processing , artificial vision , strain, deformations, mechanical tests, dynamic tests.*

## RESUMEN

A medida que la tecnología avanza, es importante empezar a utilizar las herramientas que ella nos aporta. En el presente trabajo se plantea una aplicación práctica de la visión artificial, misma que se basa en el procesamiento de imágenes y uso de algoritmos y subrutinas para determinar, cuantificar y visualizar un número ilimitado de respuestas a los problemas que se planteen en cualquier campo científico.

Durante el desarrollo de esta investigación, se ensayaron morteros, vigas de madera a escala y briquetas de asfalto, para determinar sus deformaciones unitarias y desplazamientos. Tomando en cuenta las diferentes variables de luz, velocidad de ensayo, técnicas de pintura, capacidad y calidad de grabación. Los resultados muestran un margen de error que oscila entre el 5% y 45% al compararlos con los métodos tradicionales de medición.

Otras universidades han desarrollado, con éxito, aplicativos con técnicas similares que reducen el costo de las mediciones que se realizan a distintos ensayos mecánicos, con el uso de mediciones en base al procesamiento de imágenes.

**Palabras Claves:** *Procesamiento de imágenes, visión artificial, deformaciones unitarias, desplazamientos, ensayos mecánicos, ensayos dinámicos*

# Capítulo 1

## 1 Introducción

Durante mucho tiempo se han implementado un sinnúmero de técnicas para medir deformación y deflexiones en especímenes de laboratorio siendo estas técnicas invasivas como no invasivas; a medida que la tecnología ha ido avanzando se han ido mejorando dichas técnicas logrando así ser más efectivos al momento de los análisis de resultados, ¿pero son estas técnicas accesibles para la comunidad investigadora? Hoy en día se buscan alternativas en las cuales la instrumentación y el proceso económico no sean una barrera que impidan lograr dichos objetivos, buscando que los resultados sean comparables a los de un laboratorio de un país desarrollado.

Adicionalmente, los ingenieros deben tener herramientas para estimar la vida útil de una estructura y la necesidad de obtener un rendimiento confiable de datos, para optimizar los procedimientos de diseño y mantenimiento, y la necesidad de comprender mejor cómo funcionan las estructuras en términos de seguridad y aspectos de servicio, para garantizar la seguridad pública y evitar costosos reemplazos (Webb et al. 2015).

La correlación de imágenes digitales (conocida como DIC, por sus siglas en inglés) consiste en reconocer una imagen tomada con una cámara digital sobre cualquier tipo de superficie plana e incluso en 3D y asignar coordenadas a los píxeles de dicha captura, obteniendo como resultado el desplazamiento de dicho píxel. El proceso de reconocimiento de dichas coordenadas se las realiza mediante algoritmos en un software de programación llamado MATLAB (por "Matrix Laboratory") el cual nos facilita, por medio de algunas sub-rutinas, el proceso de correlación.

La siguiente investigación propone ensayar especímenes de laboratorio, de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, para medir deformaciones y deflexiones por medio de la técnica no invasiva llamada la correlación de imágenes digitales (CID). Se proveerá de un manual de procesos para que esta técnica se pueda implementar en el laboratorio.

## **1.1 Antecedentes**

### **1.1.1 Historia sobre la correlación de imágenes**

Para comprender mejor qué significa la correlación de imágenes se deberá remontar a sus inicios. Todo comienza en los años cincuenta en que ya se practicaba una correlación de imágenes. El proceso no era automatizado y consistía en la aplicación de una correlación cruzada propuesta por Hobrough (1959). A medida que se va implementando la técnica, otros investigadores han ido proponiendo modificaciones para implementar la técnica para distintos campos de aplicación. En los años 60 y 70 se propone el uso de espectros de potencia que una imagen puede proporcionar; esta herramienta dispone de una estructura en la que el diseño de la correlación de imágenes es posible, proporcionando estimaciones en el intervalo de muestreo, en función del tamaño del punto del escáner y la nitidez esperada de la función de correlación (Bertram, 1963; Johnson and DiPentima, 1965; Hobrough and Hobrough 1970; Helava and Chapelle, 1972). En los años 80 diferentes investigadores comienzan a implementar el procesamiento de imágenes en materiales estructurales, se muestran técnicas de experimentación simples donde se localiza la zona plástica de placas de acero tipo 304 y un espesor de 0.05 pulgadas utilizando una máquina MTS, con una carga monótona de 5-kips. (C. Lee, 1987).

En aplicaciones más actuales, para nombrar un ejemplo, Skarzyński y Tejchman (2013) lograron investigar la influencia, en elementos de hormigón armado, en la

respuesta de desplazamientos y formación de fisuras y grietas de vigas sujetas a flexión pura, usando la técnica DIC. Los autores indican que lograron una alta eficacia midiendo deformaciones usando una función de correlación con distribución normal de Gauss.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Evaluar las deformaciones y desplazamientos de especímenes por medio de una herramienta computacional, en base a procesamiento de imágenes.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Implementar el uso de Software que logre medir las deformaciones unitarias en especímenes de laboratorio a partir de la correlación de imágenes.
- Implementar el uso de Software que logre medir desplazamientos en especímenes de laboratorio a partir de la correlación de imágenes.

## **1.3 Alcance**

Elaboración de un manual práctico para el laboratorio de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, en el cual se especifique el procedimiento para realizar mediciones de deformaciones unitarias a ensayos de cualquier tipo de espécimen de laboratorio.

Se desarrollarán ensayos para medir las deformaciones de especímenes de laboratorio mediante el procesamiento de imágenes con la ayuda de la

implementación de un software generado en MATLAB. Estas mediciones serán contrastadas con las obtenidas utilizando metodologías y herramientas convencionales.

## **1.4 Organización del Documento**

El presente trabajo de tesis, representa los resultados obtenidos de la implementación de un software, para medir tanto deformaciones unitarias como desplazamientos; haciendo una comparación con el método tradicional de medición de los strain gauges.

El documento se compone del Capítulo 1; que contiene la evolución de la técnica correlación de imágenes, los antecedentes con los inicios de la técnica de correlación de imágenes; y como esta ha ido progresando en las diferentes aplicaciones en el campo de la ingeniería.

En el Capítulo 2 se describe el criterio de la correlación cruzada normalizada y el criterio normalizado de mínimos cuadrados.

En el Capítulo 3 se explica la metodología usada durante los ensayos realizados, y como las diferentes variables se correlacionan con los resultados obtenidos.

En el Capítulo 4 se interpretan de resultados obtenidos mediante la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales.

En el Capítulo 5 se resumen conclusiones sobre los resultados obtenidos y la metodología utilizada en la investigación y se recomienda una segunda investigación bajo nuevas especificaciones técnicas.

Se Anexan al final del documento, imágenes de los diferentes procesos y ensayos realizados durante la investigación.

## Capítulo 2

### 2 Marco Teórico

#### 2.1 Correlación de Imágenes

Toda la explicación y descripción del uso y la aplicación de la correlación de imágenes del capítulo 2 se basa en documento publicado por Universidad Politécnica de Madrid (de la Ossa Pérez & Natarío Vaquero, 2015):

*La correlación de imágenes se basa específicamente en la obtención de regiones de interés (ROI, por sus siglas en inglés) en las cuales se producen desplazamientos y deformaciones de un espécimen de cualquier material.*

*La toma de muestras, sean estas de un video o de un grupo de imágenes, capturadas mientras los especímenes sufren deformaciones, van a ser usadas como entradas para el programa CID. El objetivo es generar una correspondencia en la cual se marquen puntos de referencia sobre la imagen sin sufrir ninguna deformación y la imagen o las imágenes que van siendo modificadas.*

*El programa se encarga de ir obteniendo subsecciones de la imagen de referencia, las cuales vamos a llamar subconjuntos, que sirven para determinar sus respectivas ubicaciones en las siguientes imágenes.*

*El proceso de generar subconjuntos, que no son nada más que coordenadas, ayuda a generar desplazamientos y deformaciones con respecto a su estado natural, las cuales van a depender mucho de variables como es la luz, la posición de los especímenes y la calidad de la imagen.*

En la Figura 1 se muestran las coordenadas de un subconjunto, las cuales están marcadas con cruces rojas.

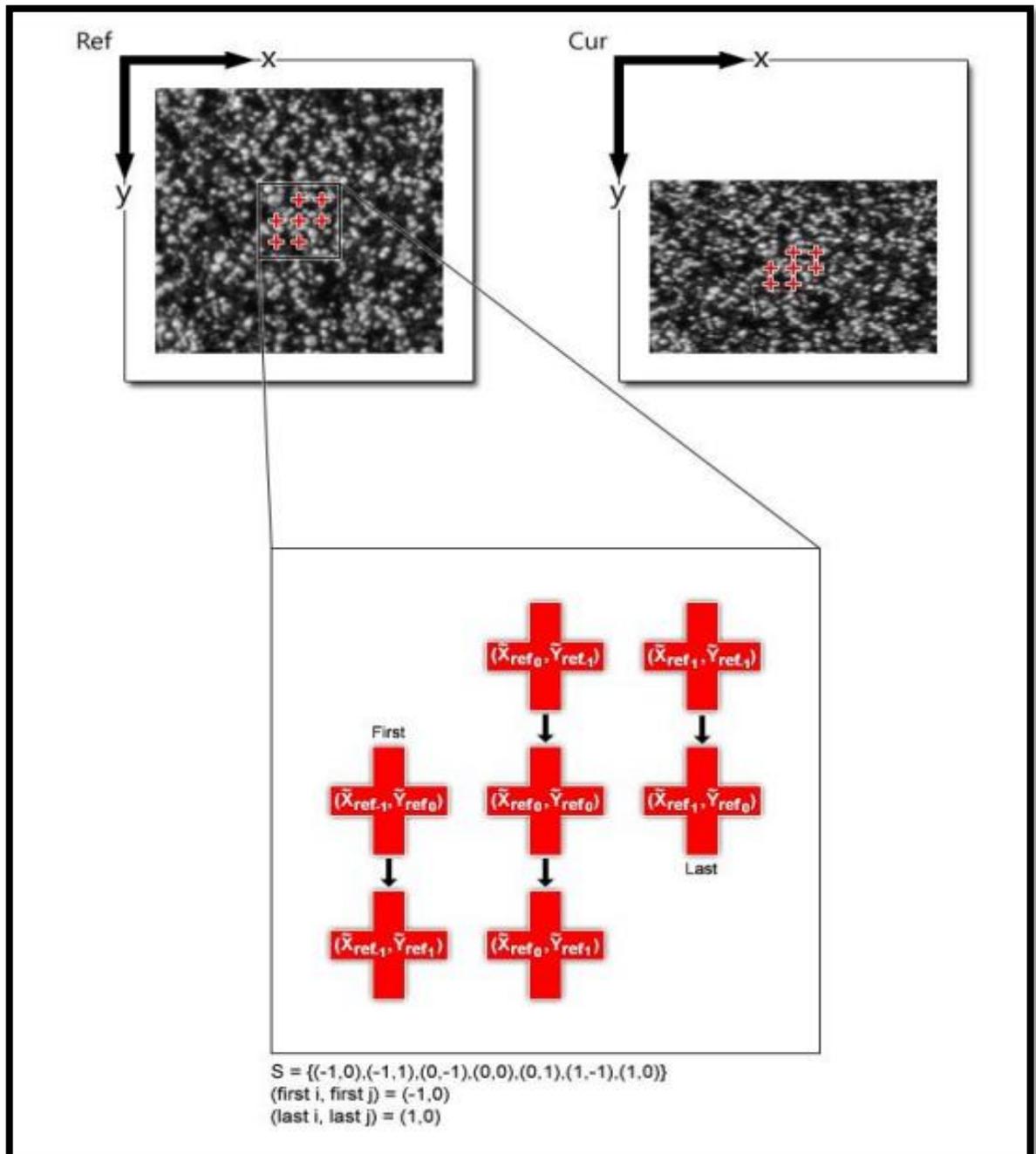


Figura 1. Coordenadas de un subconjunto (sacado de documento publicado por Universidad Politécnica de Madrid (de la Ossa Pérez & Natario Vaquero, 2015)

La restricción de pasar los puntos de referencia de la imagen base a las siguientes viene delimitada por una transformación lineal de primer orden. Las transformaciones se pueden realizar con funciones de segundo orden, para este efecto se puede utilizar la siguiente ecuación siempre y cuando se puedan predecir unas deformaciones pequeñas.

$$\in S \begin{cases} x_{curi} = x_{refi} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}}(x_{refi} - x_{refc}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{refi} - y_{refc}) \\ y_{curj} = y_{refi} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}}(x_{refi} - x_{refc}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{refj} - y_{refc}) \end{cases} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$p = \left\{ u \quad v \quad \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \right\}^T \quad \text{Ecuación 2}$$

De la ecuación 1 " $x_{refi}$ " e " $y_{refi}$ " son las coordenadas en "X" e "Y", de un punto del subconjunto de la imagen base, " $x_{refc}$ " e " $y_{refc}$ " son las coordenadas "X" e "Y" del centro del subconjunto de referencia inicial, " $x_{curi}$ ", " $y_{curj}$ " son las coordenadas "X" e "Y" del punto final del subconjunto, ("i", "j") son los índices usados para la localización relativa de los puntos del subconjunto con respecto al centro del subconjunto, que nos sirve para ver la concordancia entre los puntos del subconjunto en el estado actual y de referencia. "S" es el conjunto que contiene todos los puntos del subconjunto.

El subíndice "rc" que podemos ver en el a ecuación 1 pretende representar la transición entre la referencia y las coordenadas vigentes. Conjuntamente la ecuación 2 es la representación general del vector de deformación "p". Finalmente, la ecuación 1 puede ser expresada en forma de matriz como se expone a continuación:

$$\xi_{reci} + w(\Delta \xi_{ref;p_{rc}}) = \begin{Bmatrix} x_{refc}^t \\ y_{refc}^t \\ 1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + \frac{du}{dx_{rc}} & \frac{du}{dy_{rc}} & u_{rc} \\ \frac{dv}{dx_{rc}} & 1 + \frac{dv}{dy_{rc}} & v_{rc} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \Delta x_{refc}^t \\ \Delta y_{refc}^t \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 3}$$

De la ecuación 3 " $\xi$ " es un vector ampliado que dentro de él lleva las coordenadas "X" e "Y" de los puntos del subconjunto, " $\Delta x$ " e " $\Delta y$ " son las distancias entre un punto del subconjunto y el centro del subconjunto, " $W$ " es una función llamada "wrap" (deformar). Se permite también la deformación dentro de la configuración de referencias:

$$\in \mathcal{S} \begin{cases} x_{refi} = x_{refi} + u_{rr} + \frac{\partial u}{\partial x_{rr}}(x_{refi} - x_{refc}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rr}}(y_{refi} - y_{refc}) \\ y_{refj} = y_{refj} + v_{rr} + \frac{\partial v}{\partial x_{rr}}(x_{refi} - x_{refc}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rr}}(y_{refj} - y_{refc}) \end{cases} \quad \text{Ecuación 4} \quad (i, j)$$

Donde " $x_{refi}$ ", " $y_{refj}$ " son las coordenadas "X" e "Y" del punto final del subconjunto de referencia. El subíndice "rr" indica la transformación de la referencia del sistema de coordenadas inicial para el sistema de coordenadas final.

Se requiere encontrar el " $p_{rc}$ " óptimo, cuando " $p_{rr}$ " = 0, de tal manera que las coordenadas de " $x_{refi}$ ", " $y_{refj}$ " tengan una mejor concordancia con las coordenadas de " $x_{curi}$ ", " $y_{curj}$ " respectivamente.

En la Figura 2, se muestra la transformación lineal que ocurre en las coordenadas del subconjunto. “W” contiene el cambio de posición en “x” y “y” (“u” y “v” en la figura), deformaciones en dirección “x” con respecto a “x” y “y” ( $\frac{du}{dx}$  y  $\frac{du}{dy}$  en la figura), y las deformaciones en dirección “y” con respecto a “x” y “y” ( $\frac{dv}{dx}$  y  $\frac{dv}{dy}$  en la figura).

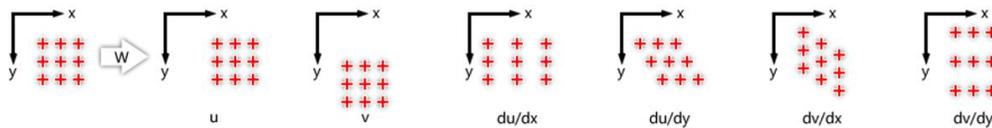


Figura 2 Transformación lineal que ocurre en las coordenadas de un subconjunto sacado de documento publicado por Universidad Politécnica de Madrid (de la Ossa Pérez & Natario Vaquero, 2015)

### 2.1.1 Criterios de Correlación

Los siguientes criterios de correlación pertenecen al documento publicado por Universidad Politécnica de Madrid (de la Ossa Pérez & Natario Vaquero, 2015)

Se debe crear una similitud entre la referencia final del subconjunto y el subconjunto actual. Esto es llevado a cabo comparando los valores de la escala de grises en el final de referencia de los puntos del subconjunto con los valores grises de los puntos finales del subconjunto actual. Las siguientes dos ecuaciones son las más utilizadas en la correlación de imágenes digitales.

$$C_{cc} = \frac{\sum_{(i,j) \in s} (f(x_{refi}, y_{refj}) - f_m)(g(x_{curi}, y_{curj}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in s} [f(x_{refi}, y_{refj}) - f_m]^2 \sum_{(i,j) \in s} [g(x_{curi}, y_{curj}) - g_m]^2}}$$

Ecuación 5

$$C_{LS} = \sum_{(i,j)} \left[ \frac{f(x_{refi}, y_{refj}) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(x_{refi}, y_{refj}) - f_m]^2}} - \frac{g(x_{curi}, y_{curj}) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(x_{curi}, y_{curj}) - g_m]^2}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde "f" y "g" son la referencia y la función de la imagen que está siendo procesada, respectivamente, y tenemos como resultado un valor de la escala de grises correspondiente a los punto específicos ("x", "y"), "f<sub>m</sub>" y "g<sub>m</sub>" son el valor medio de los valores de la escala de grises del final de referencia y subconjunto actual respectivamente y están definidas por:

$$f_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(x_{refi}, y_{refj}))}{n(s)} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$g_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(x_{curi}, y_{curj}))}{n(s)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde "n(s)" es el numero de elementos en "S".

La ecuación 5 es el criterio de correlación cruzada normalizada cuando "C<sub>CC</sub>" es cercano a la unidad.

La ecuación 6 es el criterio normalizado de mínimos cuadrados e indica cuando  $C_{LS}$  es cercano a cero.

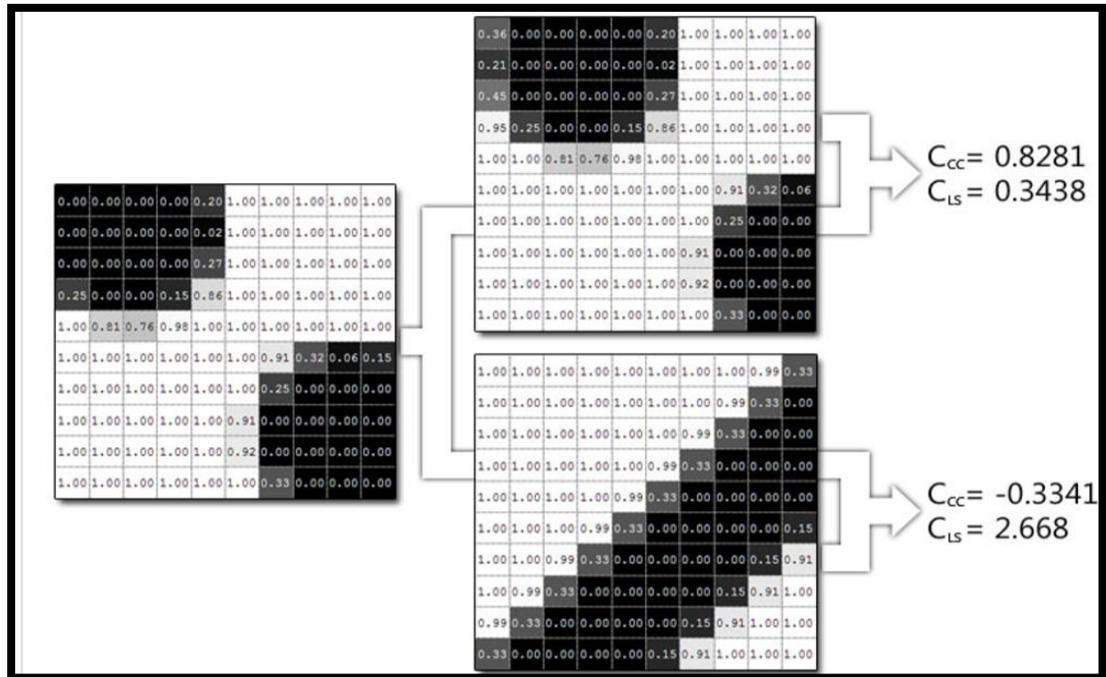


Figura 3 Criterio de correlación cruzada normalizada y Criterio de normalizado de mínimos cuadrados

En la figura 3 se puede observar la eficacia de las dos técnicas ya antes mencionadas. Los valores en escala de grises de la izquierda se comparan con los dos de la derecha.

- $C_{CC}$  es cercano a 1
- $C_{LS}$  es cercano a 0

Lo cual se puede comprobar con una simple inspección visual.

## 2.1.2 Matlab y la función cpcorr.m

A nivel mundial una infinidad de ingenieros y científicos usan MATLAB® para investigar, observar, crear modelos, sistemas, programas, para facilitar y transformar el mundo en el que vivimos. Su nombre es una abreviatura de “Matrix Laboratory”, laboratorio matricial. (MATLAB, 2018)

Matlab ha sido una plataforma la cual ha estado presente en muchos campos; como, por ejemplo, en medicina, ingeniería, economía, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica entre otros. Su uso no es complejo, MATLAB® se usa en cualquier clase de ingeniería para resolver cálculos, sin la necesidad de aprender un lenguaje de programación de alto nivel como lo es C++ o FORTRAN, por lo que se vuelve una herramienta computacional de uso tanto científico como ingenieril.

Esta plataforma es muy eficiente cuando de problemas hablamos sean estos científicos y de ingeniería. El lenguaje de MATLAB se basa en matrices lo que significa que es la manera más sencilla de representar las matemáticas computacionales. Cuenta con una caja de herramientas que son funciones que ya vienen incluidas en el software de MATLAB® y una de ellas es la función cpcorr.m.

Cpcorr.m es un algoritmo que se encarga de adaptar píxeles que se encuentren cerca del punto de control como un subconjunto, de una imagen deformada, también se encarga de asumir otro subconjunto aun más grande alrededor del punto de la imagen base (que no ha sido sometida a deformaciones). Dentro de la zona de análisis lo que busca el algoritmo es la relación de tamaños que existe entre la imagen base y la imagen deformada.

La figura 4 muestra un esquema típico de CID, en la cual se muestra una rejilla de color purpura, en este caso, es la región de interés. El cuadro azul representa

al subconjunto antes de la deformación en la imagen base y el cuadro rojo representa el subconjunto correspondiente después de ser sometido a una deformación. Mediante la correlación cruzada normalizada se obtiene un coeficiente, que se evalúa con la ecuación 5. El máximo coeficiente de correlación nos ayudará a determinar el desplazamiento actual.

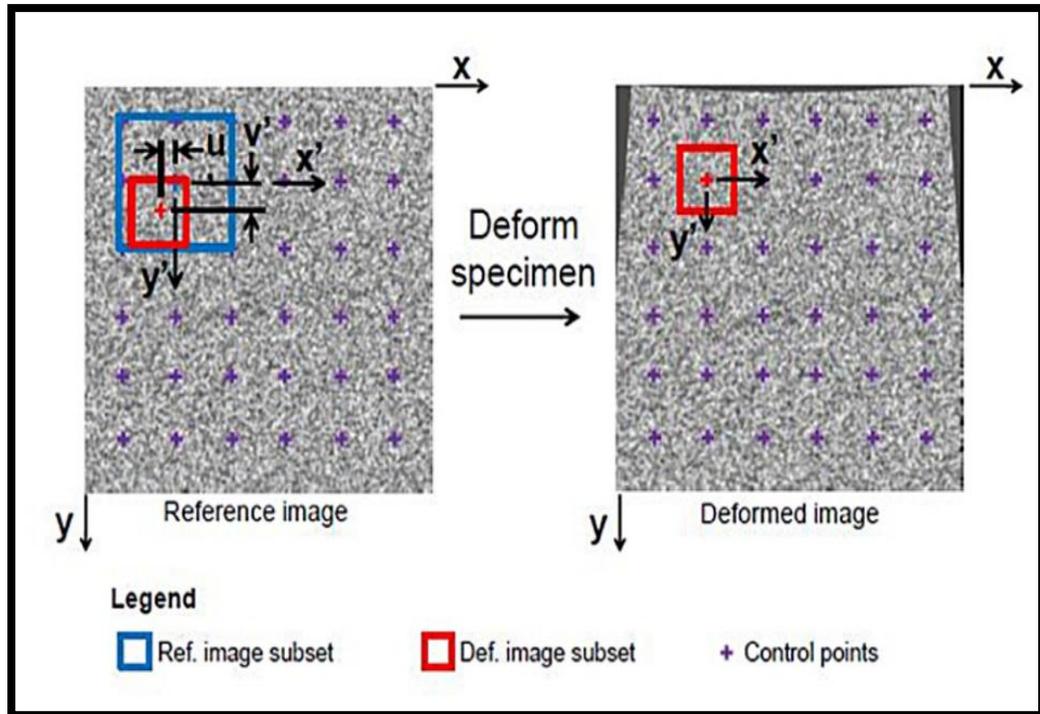


Figura 4 Esquema de la rejillas, dentro de la región de interés .

## Capítulo 3

### 3 Procedimiento experimental

#### Equipos

Los equipos que se utilizaron durante la tesis son los siguientes:

Cámara Sony Tipo NEX5-N Alpha :

- MODO DE GRABACIÓN DE VÍDEO: AVCHD  
1.920 x 1.080 (50p, 28 M, PS), 1.920 x 1.080 (50i, 24 M, FX), 1.920 x 1.080 (50i, 17 M, FH), 1.920 x 1.080 (25p, 24 M, FX), 1.920 x 1.080 (25p, 17 M, FH)
- MODO DE GRABACIÓN DE VÍDEO: MP4  
1.440 x 1.080 (25 fps, 12 Mbps), VGA (640 x 480, 30 fps, 3 Mbps)

Trípode:

- Hama PROFIL 72
- Sony VCT-R640

Máquinas de laboratorio

- Máquina de compresión CONTROLS, capacidad 2000 KN fabricación italiana.
- Máquina de flexión CONTROLS, capacidad 50 KN fabricación italiana.
- Equipo Nottingham Asphalt Tester, para ensayos dinámicos.

## Lámparas

- Lámpara Fluorescente tipo OSRAM; 120 V, 20 W, Mod. DULUX EL T 20W/865
- Lámpara Led tipo Maviju, GD-F024-1B,10W.

El siguiente procedimiento experimental, consiste en el uso de tres diferentes Softwares; GIMP2, FREESTUDIO y MATLAB. Los cuáles serán descritos a continuación.

### **3.1 GIMP2**

Este programa fue desarrollado como un ejercicio de semestre en el club informático de la Universidad de Berkeley por dos estudiantes llamados Spencer Kimball y Peter Mattis en 1995. Actualmente cuenta con un gran número de voluntarios que siguen desarrollando el software. Inicialmente GIMP (por sus siglas en inglés, (GNU Image Manipulation Program) fue diseñada en sistema Unix con el objetivo de trabajar en GNU/Linux como una herramienta para trabajar con imágenes y de libre acceso a sus licencias, compitiendo con el software comercial Phtoshop desarrollado por Adobe Systems. (GIMP2, 2018)

Esta herramienta fotográfica multiplataforma es un acrónimo de GNU y es capaz de hacer cualquier tipo de tareas de manipulación de imágenes como, por ejemplo; retoque fotográfico, composición de imágenes y creación de imágenes. (GIMP2, 2018)

Una de las grandes ventajas que tiene es que se encuentra disponible para casi todos los sistemas operativos, incluyendo Microsoft Windows o Mac OS X (Darwin) de Apple. Es una aplicación de software libre que se encuentra respaldada bajo Licencia Pública General (GPL por sus siglas en inglés, General Public License) que garantiza a los usuarios acceder y modificar el código fuente del que se construyen los programas.

## **3.2 FREESTUDIO**

Free Studio es un paquete multimedia que fue desarrollado por DVDVideoSoft. bajo la programación de C++ y C Sharp, y representa un conversor de videos. Su lanzamiento oficial fue en el año 2008 bajo una licencia de freeware lo que significa que está disponible libremente sin ninguna restricción, actualmente está disponible solo para el Sistema operativo de Microsoft Windows.

Su aplicación ha sido un éxito, en instituciones como College of Information System & Technology, Collegue of Humanities and Science, donde estudian la aplicación de nuevas tecnologías en las nuevas generaciones que son más conocidas como generación “y” o la generación del milenio. El uso de estas aplicaciones resulta ser más eficiente cuando se trabaja con dichas generaciones al momento de aprender alguna asignatura de cualquier tipo. ( Bennett, Carpe, & Lundeberg, 2015)

## **3.3 Proceso**

El proceso que se detalla a continuación se basa en un video de la plataforma YOUTUBE. (4Snarecrash, 2013)

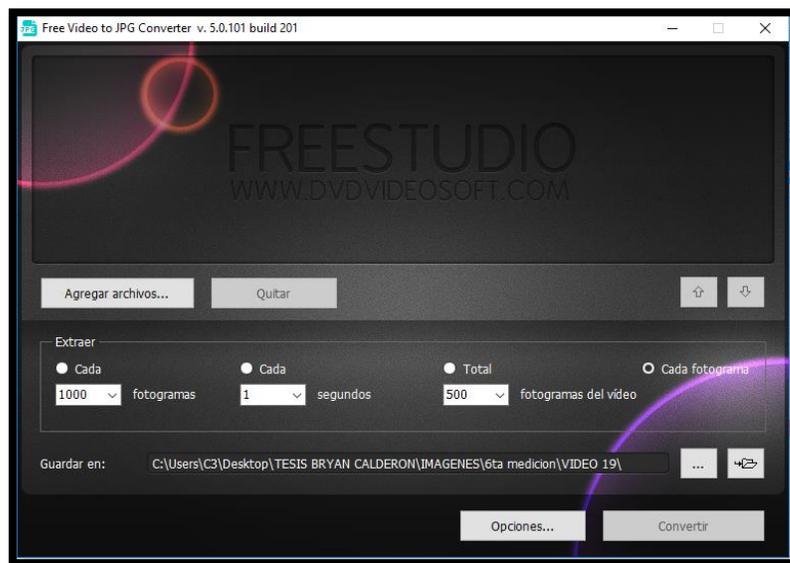
El proceso experimental comprende:

1. Pintar el espécimen, en la zona donde se efectuará la medición.
2. Tomar video del ensayo, con la cámara enfocando un espacio definido. Para este efecto es imperativo el uso de un trípode para asegurar que el movimiento captado proviene exclusivamente del ensayo.
3. La distancia que existe entre la cámara y el espécimen no es importante, las equivalencias de pixeles en unidades de distancia se basan en las dimensiones reales del espécimen y de la calidad en pixeles de la imagen.

- Una vez que se obtiene el video se lo debe procesar. Free Studio transforma el video, en imágenes “JPG” que según la calidad del video o los frames, efecturá el cambio.



*Figura 5 Ventana principal del software Free Studio*



*Figura 6 Ventana principal del convertidor de video en imágenes JPG*

En la Figura 6 se puede observar la ventana principal de convertidor de video en imágenes en el formato JPG, en la opción “agregar archivo” se escoge el video de análisis y se lo extrae según los fotogramas o según los segundos, las imágenes serán salvadas en una carpeta que haya sido seleccionada.

- Transformar el formato JPG, en formato TIF. Para llegar a este paso se debe utilizar el siguiente software de apoyo “GIMP 2”, en el cual se arrastra la primera imagen de la carpeta donde están todas las imágenes extraídas del video de análisis y se toma de la pestaña de opciones el botón de video, la opción “frames convert”, automáticamente saldrá una

ventana con la opción de convertir el formato, escoger el formato TIF y la opción de escala de grises.

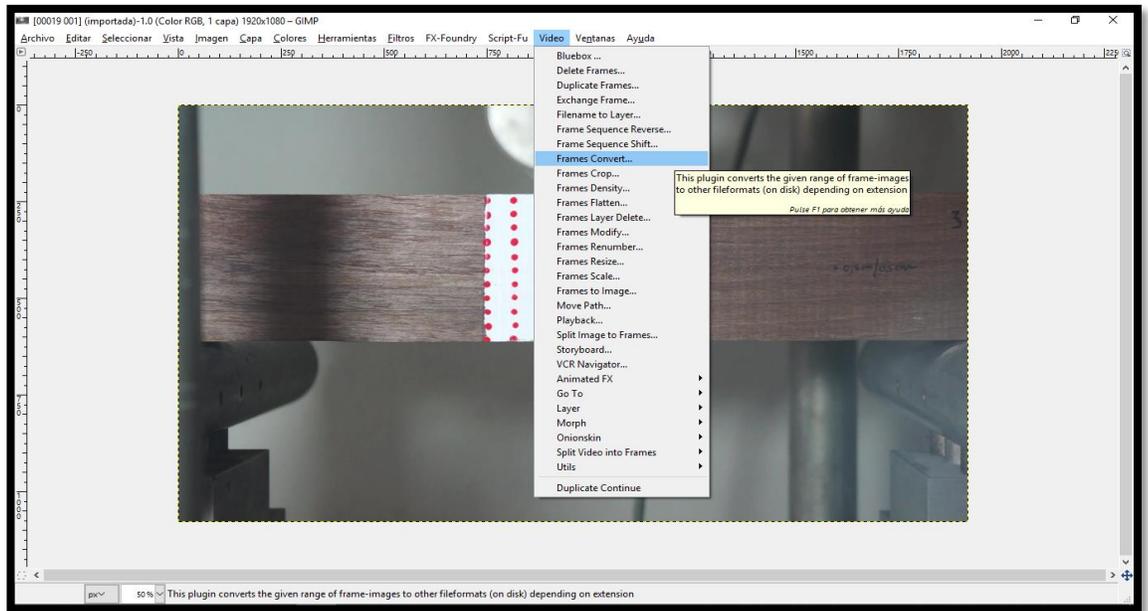


Figura 7 Ventana con la opción de cambiar el formato y las escalas.

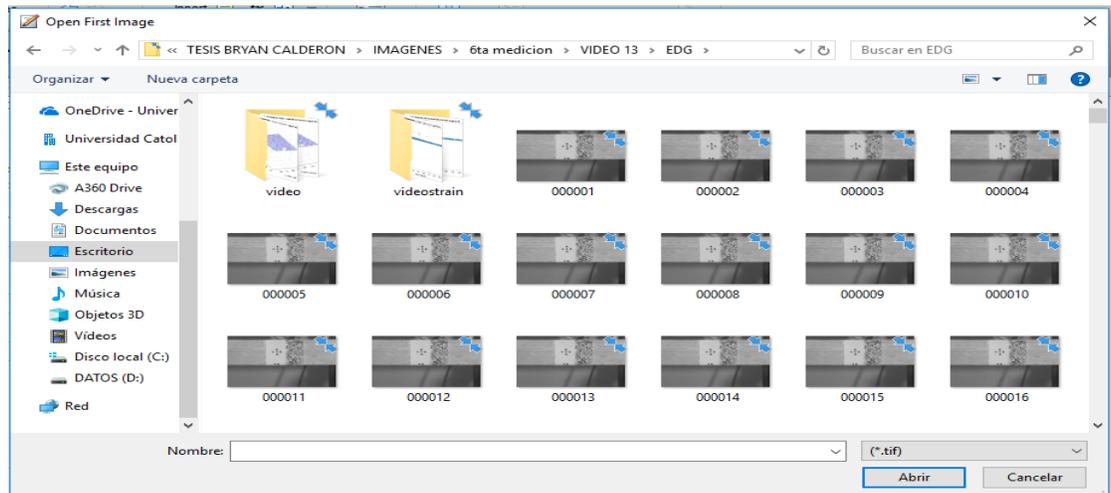
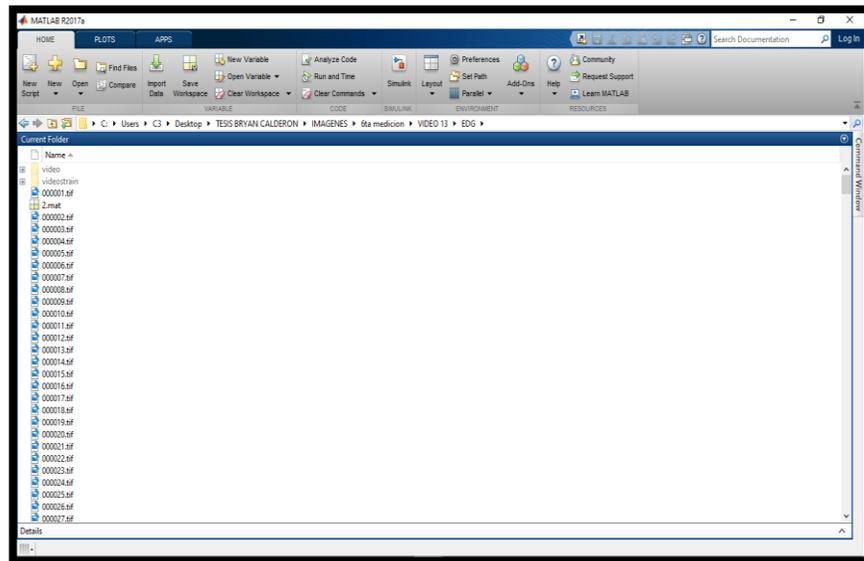
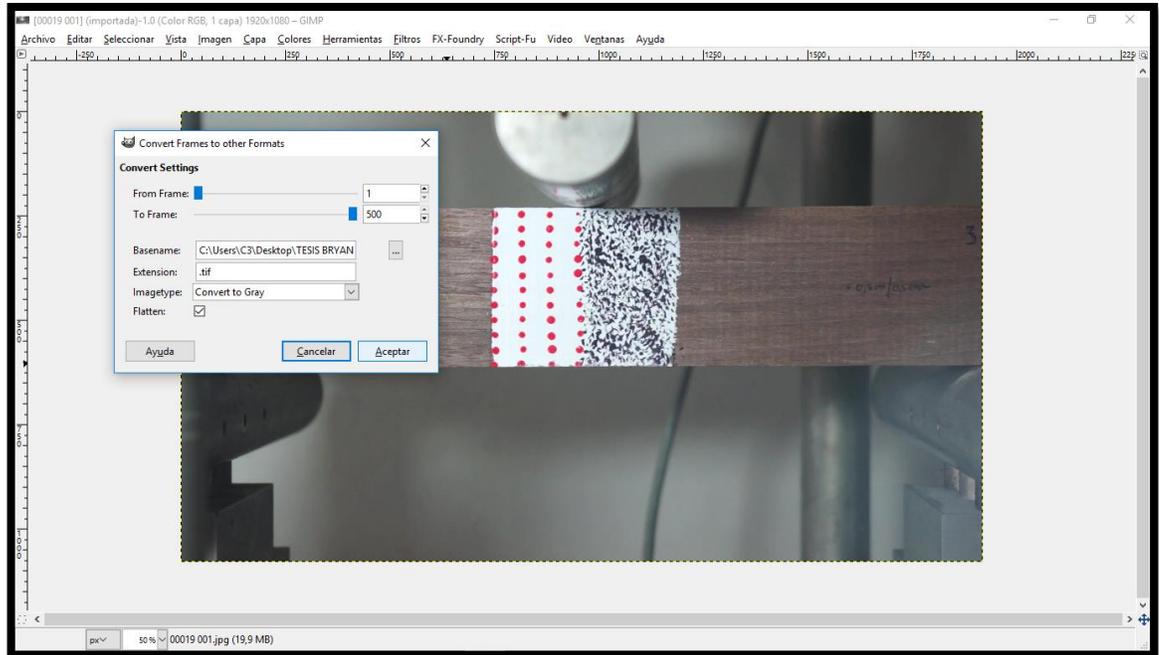


Figura 8 Carpeta donde se debe escoger la primera imagen ya procesada para crear la lista de archivos.

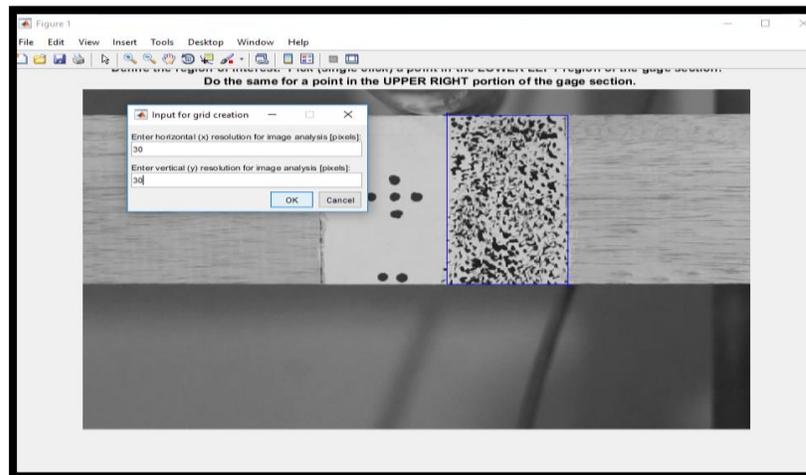
6. Una vez que las imágenes hayan sido modificadas e incluso recortadas para tener una mejor visión de la región de interés, podemos dar paso al programa MATLAB en el cual se debe seguir los siguientes pasos. Las subrutinas que han sido adquiridas fueron desarrolladas por Chris Eberl, Robert Thompson, Daniel Gianola, Sven Bundschuh (2012).
7. La primera subrutina es Filelist\_generator.m, es un código para construir una lista de 9999 ó menos nombres de archivos. Se escoge la primera imagen de la carpeta y automáticamente genera la lista de imágenes, se debe tener en cuenta que los nombres de los archivos requieren tener un orden secuencial para que la subrutina encaje de manera progresiva.
8. Cuando tenemos la lista de archivos creada, el siguiente paso es crear una rejilla dentro de la región de interés. La cual hace base dentro de la primera imagen como dice el código Grid\_generator.m.



*Figura 9 Ventana donde se muestra la lista de imágenes y se debe escoger la imagen base para crear la rejilla*

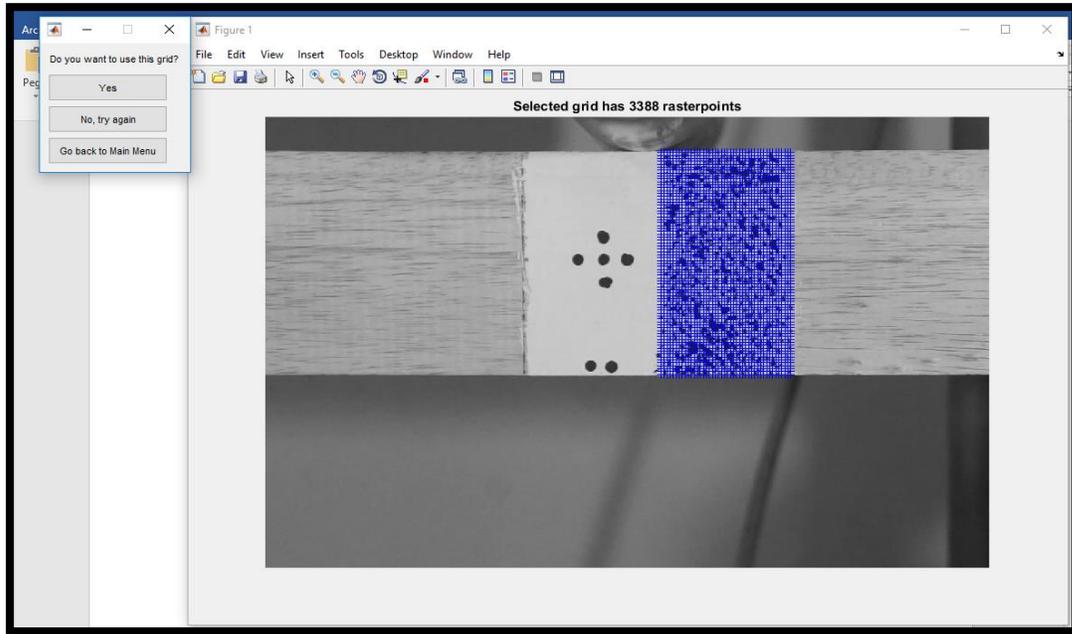


*Figura 10 Ventana que presenta a cuantas imágenes se desea cambiar el formato y tipo.*

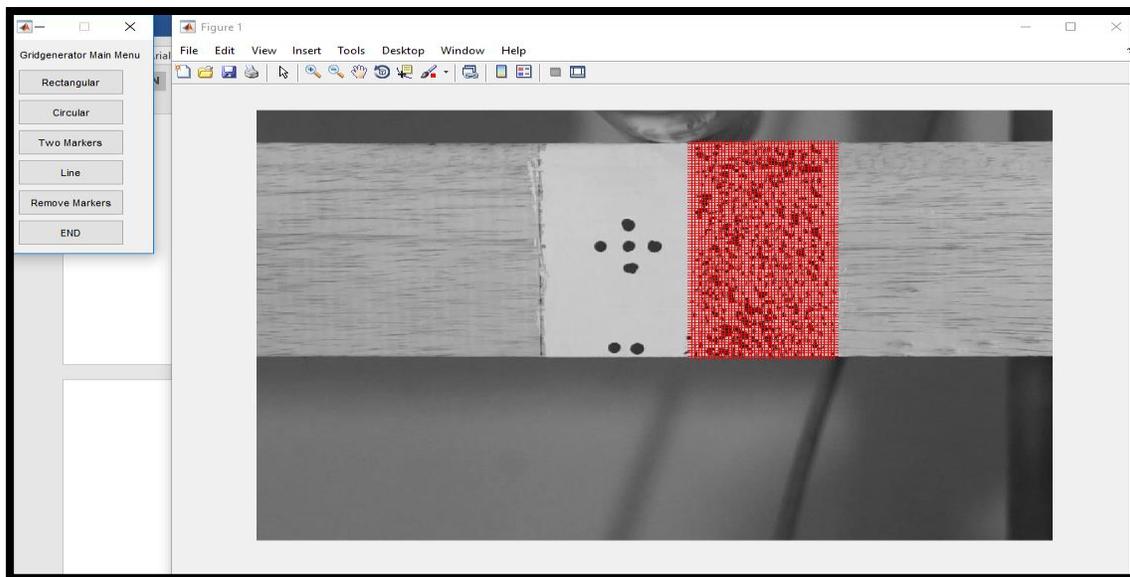


*Figura 11 El recuadro de azul representa la región de interés, el input representa la resolución de la imagen que queremos analizar*

Como se ha escogido la opción de rectángulo, mientras el número que ingresemos sea más cercano a cero, el número de cruces dentro de la rejilla será mayor.



*Figura 12 ROI se ha marcado en el cuadro con la rejilla de color azul.*



*Figura 13 Rejilla que reconocerá la posición original y como esta irá cambiando.*

9. La siguiente subrutina es Automate\_image.m, que se encarga de procesar las rejillas marcadas anteriormente en las imágenes mediante el uso de la función de MATLAB “cpcorr.m”.



Figura 14 Función automate\_image en proceso imagen 1804 de 9695.

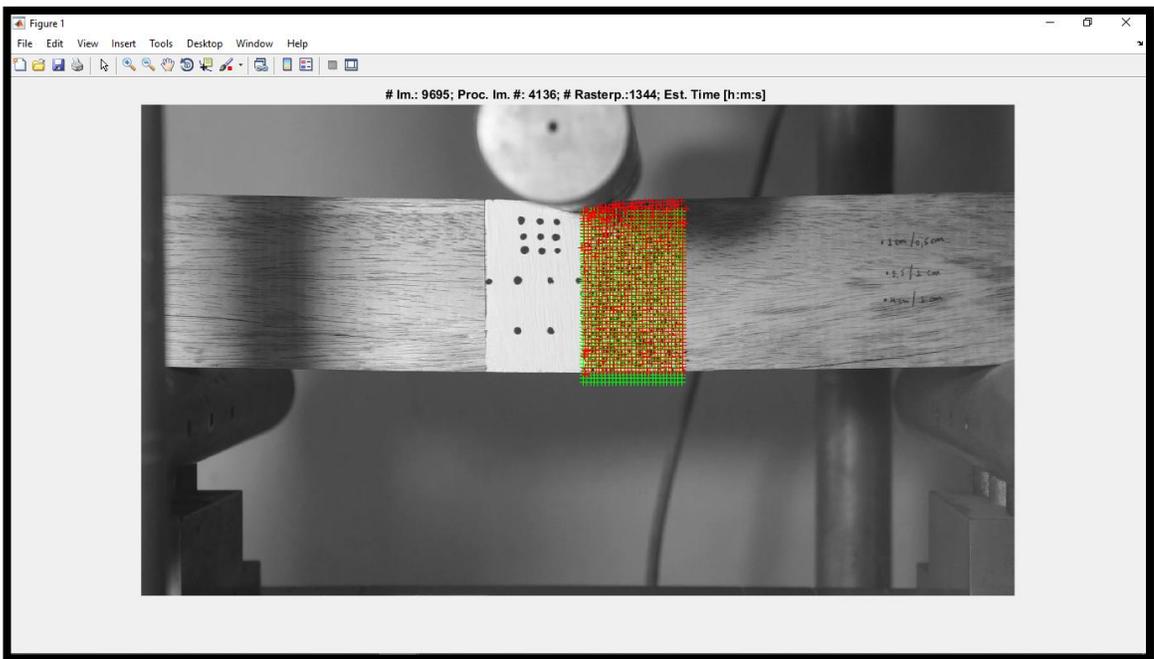


Figura15 Función Automate\_image en proceso imagen 4136 de 9695.

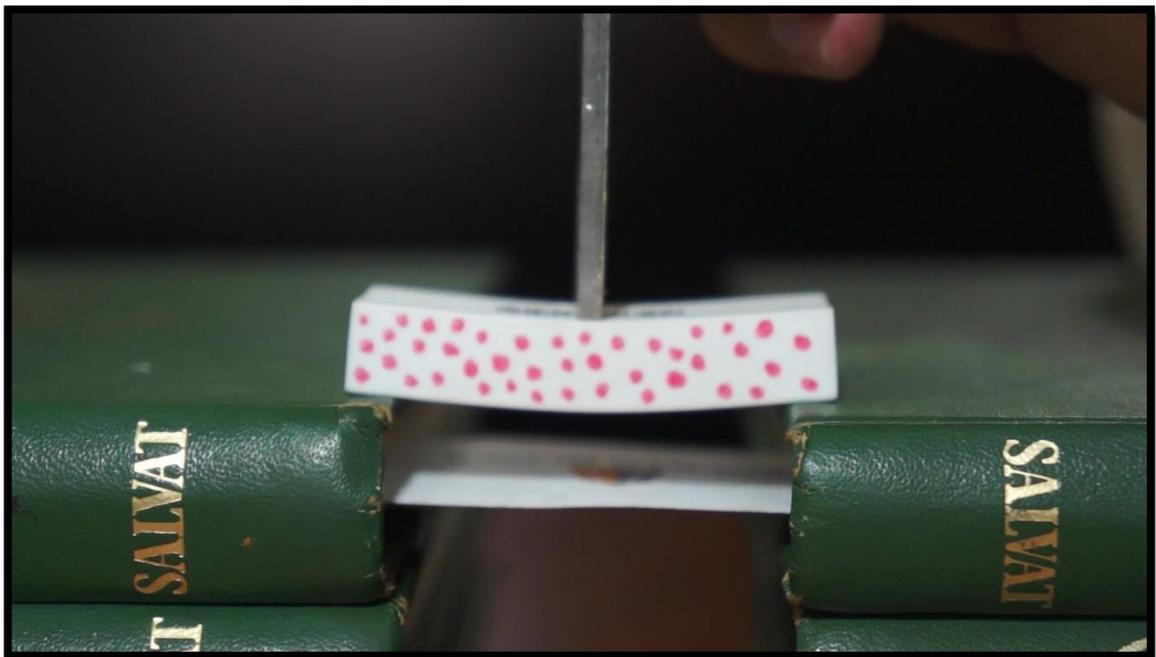
Los resultados que obtendremos será una matriz que representará cuanto se ha desplazado y deformado cada pixel de la imagen en base a la anterior como se explica anteriormente sobre la correlación cruzada normalizada.

### 3.4 Variables a considerar durante la captura de imágenes

#### 3.4.1 Iluminación

Para tener una idea, como la iluminación tiene influencia en la correlación de imágenes se tomaron en cuenta las siguientes variables:

- Hora e iluminación de luz natural en la que los ensayos fueron efectuados.
- Número y tipo de lámparas que se utilizaron durante el ensayo.
- Ubicación en diferentes posiciones, de los diferentes tipos de lámparas.



*Figura 16 Ensayo realizado sobre un borrador (material flexible) con una carga puntual variable, con luz natural siendo las 10:14:04 de la mañana.*

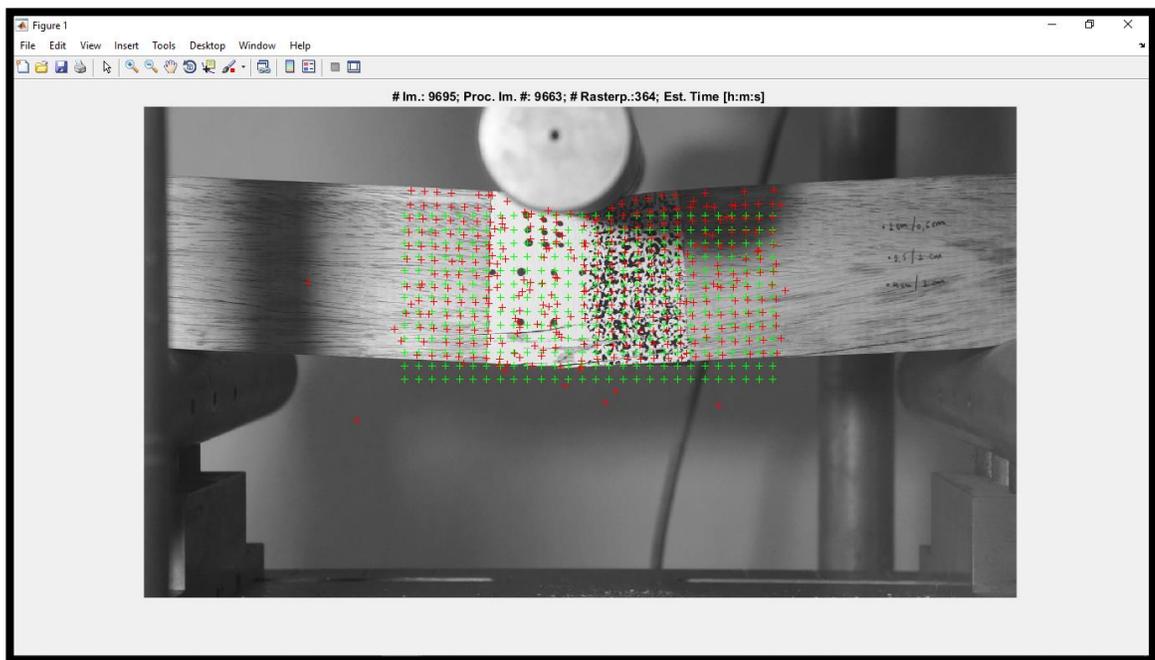
Una vez realizado el proceso experimental, la luz natural ayuda a reconocer los puntos marcados, siempre y cuando se tenga un día bien iluminado.

Para los siguientes ensayos se utilizó una luz fluorescente de la siguiente característica:

- Lámpara Fluorescente tipo OSRAM; 120 V, 20 W, Mod. DULUX EL T 20W/865

Obteniendo así una mejor iluminación en el video, dando mayor precisión para que la correlación de imágenes pueda procesar eficientemente.

El siguiente tipo de iluminación que se uso fue LED (por sus siglas en inglés, light-emitting diode,), dando como resultado distorsión al momento de hacer la grabación con la cámara.



*Figura 17 Posición de la luz creando una zona de sombra en ROI*

La posición de la luz sobre el espécimen es muy importante, en la figura 16, se puede observar cómo, al momento del ensayo, no se creó la zona de sombra; pero a medida que la carga se fue aplicando y la flexión apareciendo, la madera

fue creando una zona de sombra sobre la parte derecha del espécimen. Creando una distorsión en la rejilla marcada.

De la misma manera se puede observar sobre la figura 18, como la luz que está sobre la región de interés no afectada por la sombra, se mantiene y sigue la correlación de manera congruente.

### **3.4.2 Velocidad del ensayo**

Se debe tomar en cuenta que la variable de la velocidad y el tiempo de la aplicación de la carga y descarga sobre los especímenes, debe ser congruente a las capacidades de las herramientas de medición.

Se realizó ensayos en la cual se aplica la carga y el espécimen (borrador flexible) se deforma de manera rápida, haciendo que la cámara y su capacidad que capturar los cuadros por segundo no son muy eficientes.

Por lo tanto, los ensayos a flexión que se realizaron sobre maderas de tipo laurel y pino de dimensiones 5x5x30 (cm) con una velocidad de aplicación de carga muy baja, ayudó a que la capacidad de la cámara sea eficiente y logre capturar más imágenes sin distorsión; lo cual ayuda a que la correlación pueda procesar de mejor manera.

El ensayo a compresión simple sobre un mortero de dimensiones 4x4x8 (cm) de igual manera la velocidad de carga de aplicación fue controlada, respetando la capacidad de la cámara.

Se debe tomar en cuenta que un cambio brusco durante el ensayo puede desequilibrar la rejilla dentro de la región de interés, por lo tanto, alterar los resultados de manera muy significativa.

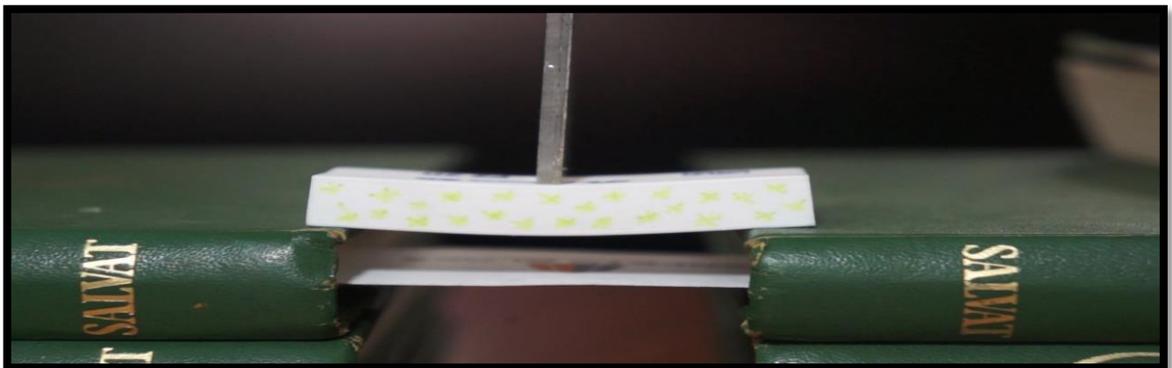
### 3.4.3 Técnicas de pintura

Las técnicas y tipo de pintura son muy importantes, de esto se determinará si el procesamiento de imágenes puede ser procesado. Para la aplicación de pintura se tomaron en cuenta las siguientes variables:

- Tipo de superficies en la que se aplicará la pintura
- Tipos de pintura (marcadores, liquido corrector, pintura de caucho)
- Técnicas de pintado (punteados, moteados)

Las primeras técnicas de pintura fueron marcas sobre el espécimen (borrador) como se muestra en la figura 19, en la cual se utilizaron varios colores de marcadores, pero los colores muy claros no fueron reconocidos al momento de cambiar la extensión de la imagen a escala de grises.

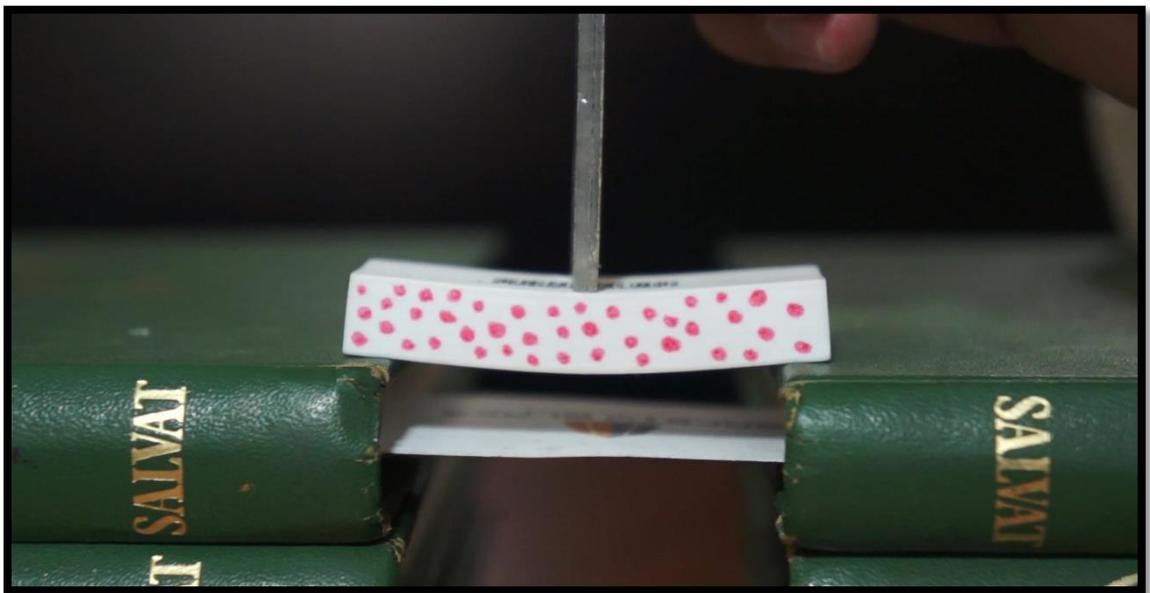
En la figura 20, se utilizó un marcador de tinta negra y liquido corrector, para intentar simular la técnica de pintura moteada. En la figura 21, se marca puntos en los cuales se utiliza marcador de tinta roja, al momento de cambiar la extensión de la imagen, la escala de grises, si reconoce el color rojo, pero la misma no tiene una intensidad fuerte de colores grises.



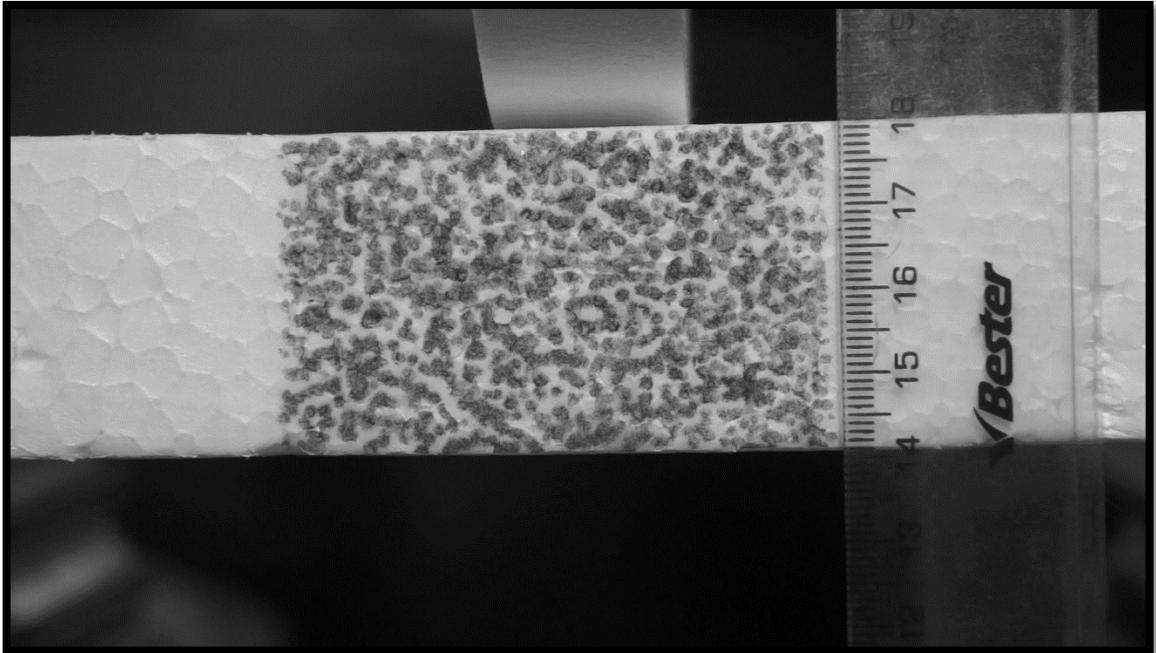
*Figura 18 Marcador de tinta verde claro sobre el espécimen (borrador flexible)*



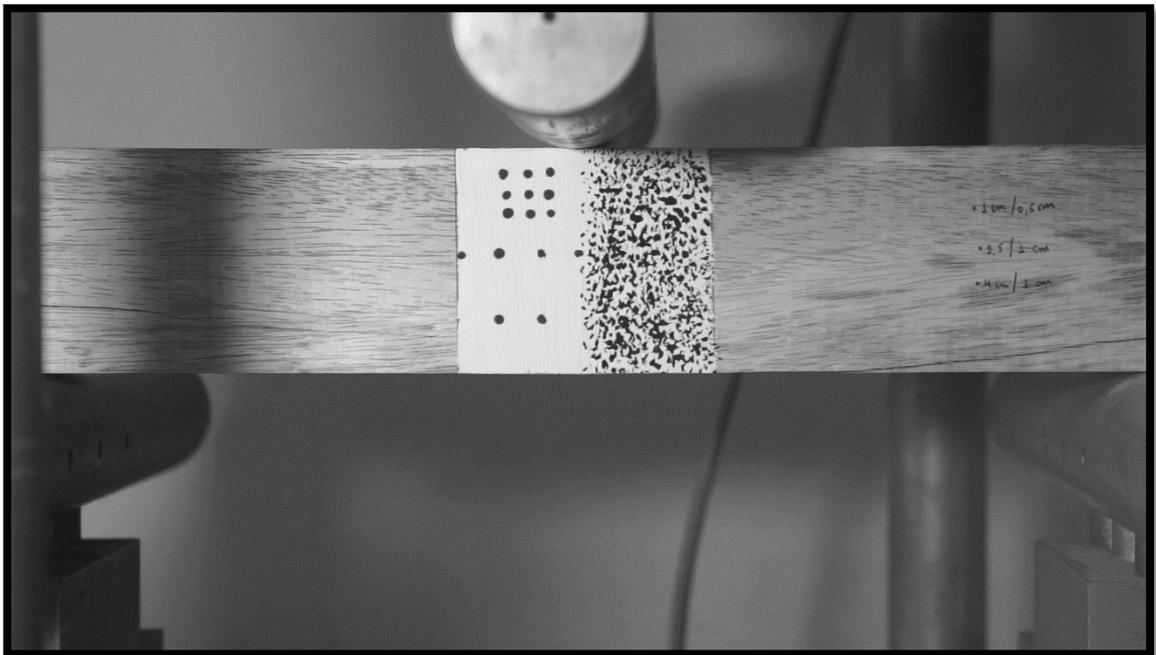
*Figura 19 Marcador negro y Líquido corrector sobre el espécimen (borrador flexible)*



*Figura 20 Marcador de tinta roja sobre espécimen (borrador flexible).*



*Figura 21 Marcador de tinta negra sobre espécimen (poli estireno expandido)*



*Figura 22 Técnica de moteado (derecha) y puntos con ubicación referenciada (izquierda) sobre espécimen (madera).*

En la figura 20, se utilizó un marcador de tinta negra sobre poliestireno expandido, los resultados fueron buenos, las rejillas ya reconocían el moteado sobre ROI y se comenzó a procesar datos más cercanos a la realidad.

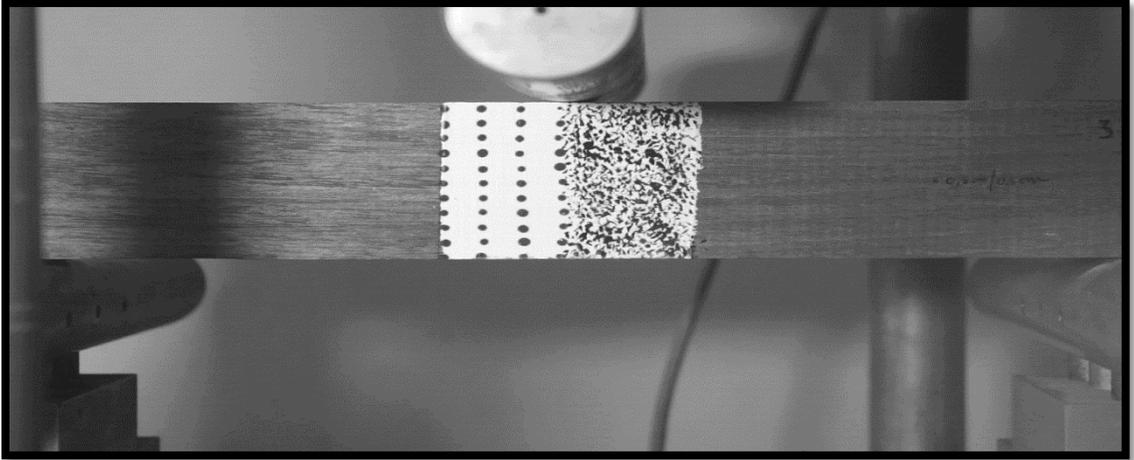
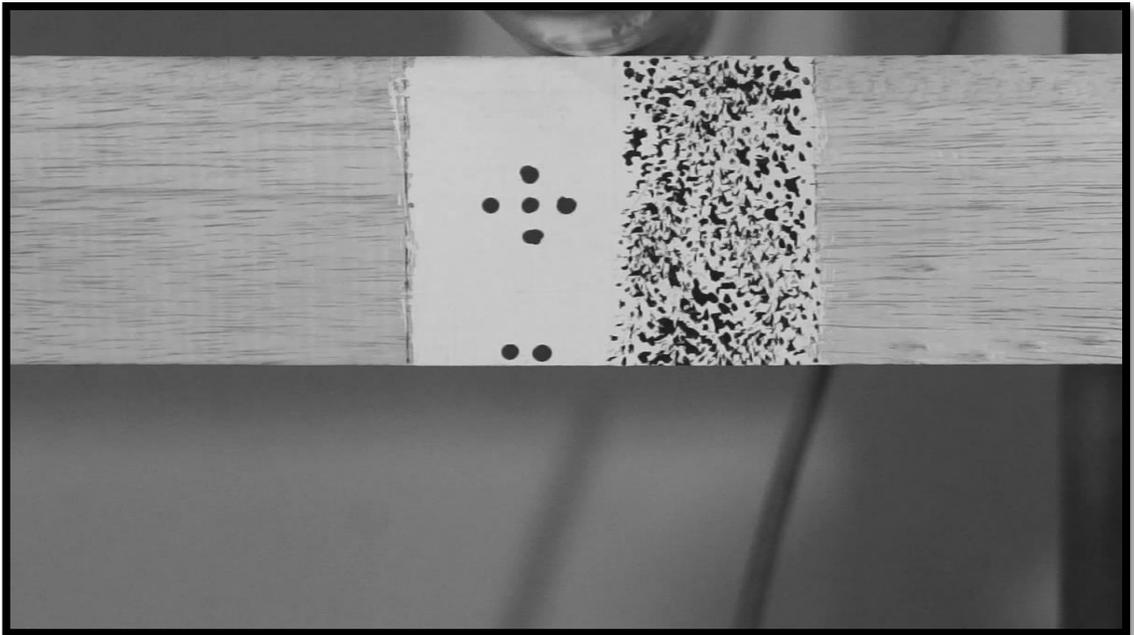


Figura 23 Técnica de moteado (derecha) y puntos con ubicación referenciada (izquierda) sobre espécimen (madera).



*Figura 24 Técnica de moteado (derecha) y puntos con ubicación referenciada (izquierda) sobre espécimen (madera).*

Con evidencia de que la técnica de pintura moteada sobre el espécimen, dentro de la región de interés funciona y da resultados, se procede a experimentar en una máquina de laboratorio que somete a flexión los especímenes y con velocidad controlada. Se decide probar dos tipos de patrón, el mismo estilo con diferentes posiciones referenciadas se prueba al lado izquierda de la figura 21,22,23, contra el estilo moteado en el lado derecho.

El lado derecho, tuvo un resultado superior al momento de que las rejillas en la correlación cruzada de imágenes comiencen a reconocer las posiciones de los pixeles.

## Capítulo 4

### 4 Análisis de resultados

Los resultados que se obtuvieron durante los ensayos se presentarán a continuación:

#### 4.1 Ensayo 1

El primer ensayo que se realizó, fue sobre un mortero de hormigón el cual tiene las siguientes dimensiones:

*Tabla 1 Resumen de los datos y resultados del espécimen 1*

	Medidas (cm)				
Espécimen	Base	altura	Peso (gr)	Carga máxima KN	
1	4X4	7,66	248,1	70,4	

Este primer ensayo se realizó para obtener la carga máxima a la cual el espécimen alcanza su carga máxima y falla, logrando un valor de 70,4 KN. En la tabla 1 se muestra un resumen de los datos y resultados del espécimen.

#### 4.2 Ensayo 2

*Tabla 2 Resumen de los datos y resultados del espécimen 2*

	Medidas (cm)				
Espécimen	Base	altura	Peso (gr)	Carga máxima KN	
2	4X4	7,77	260,4	75,9	

Este segundo ensayo se realizó con el mismo objetivo del primer ensayo, conocer su carga máxima o de rotura, que dio como resultado 75,9 KN. En la tabla 2 se muestra el resumen de los datos y resultados del espécimen.

### 4.3 Ensayo 3

En el siguiente ensayo se aplicaron dos métodos de medición, un método tradicional que son los strain gauges y el método propuesto de la correlación de imágenes CID.

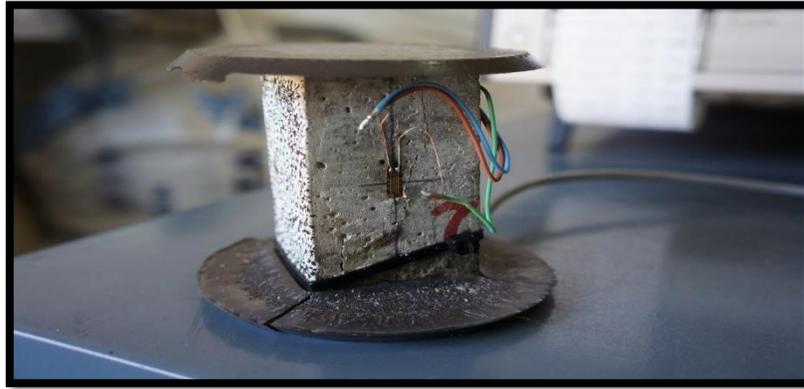


Figura 25 Especimen sometido a la compresión simple.

Tabla 3 Resumen de los datos y resultados del espécimen 3

	Medidas (cm)			
Especimen	Base	altura	Peso (gr)	Carga máxima KN
3	4X4	7,68	249,6	68

El siguiente ensayo fue sometido a compresión simple; como los ensayo 1 y 2. Con una idea de su capacidad máxima, se colocaron en dos de sus caras; dos strain gauges para medir las deformaciones unitarias axiales promedio del espécimen. Los resultados serán contrastados más adelante con los obtenidos de la CID.

Se debe especificar que el espécimen 3 fue sometido al mismo ensayo dos veces, el primer ensayo, no se lo llevó a la ruptura y, en el segundo ensayo, sí.

*Tabla 4 Resultados obtenidos de los strain gauges.*

Fuerza (KN)	Strain Gauge 1	Strain Gauge 2	TIME	TIME	TIME (s)	FORCE (KN)	e x10-6	e x10-6	e
0	0	0	0:00:00	0:00:00	0,00	0	0	0	0
10	220	294	13:50:44	13:50:44	37,00	10	257	-257	-0,000257
15	356	426	13:51:27	0:00:43	80,00	15	391	-391	-0,000391
20	501	558	13:52:03	0:00:36	116,00	20	529,5	-529,5	-0,0005295
25	645	689	13:52:35	0:00:32	148,00	25	667	-667	-0,000667
30	792	823	13:53:06	0:00:31	179,00	30	807,5	-807,5	-0,0008075
35	943	965	13:53:36	0:00:30	209,00	35	954	-954	-0,000954
40	1103	1109	13:54:05	0:00:29	238,00	40	1106	-1106	-0,001106
45	1262	1259	13:54:32	0:00:27	265,00	45	1260,5	-1260,5	-0,0012605
50	1426	1413	13:55:00	0:00:28	293,00	50	1419,5	-1419,5	-0,0014195

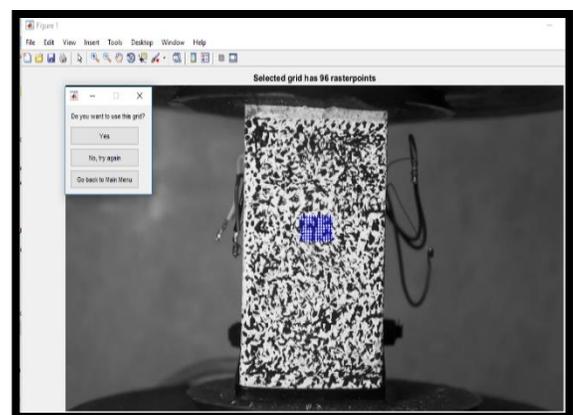
En la Tabla 4 se detalla la lectura de los strain gauges, que se obtuvieron durante el ensayo a compresión simple del espécimen. Los dispositivos fueron colocados en el centro de las caras del espécimen. Las lecturas entonces se van a comparar con los resultados obtenidos mediante la correlación de imágenes.

### 4.3.1 Primera medición

Se analizaron 258 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla a continuación:



*Figura 26 Ubicación del primer punto, primera medición.*



*Figura 27 Ubicación del segundo punto, primera medición.*

Tabla 5 Resultados de la primera medición.

Fuerza (KN)	TIME	TIME	TIME (s)	$\epsilon 0$	$\epsilon 1$	Error 1 (%)
0	0:02:11	0:00:00	0,00	0	0	0,00
10	0:02:48	0:00:37	37,00	-0,000257	-0,000029917	88,36
15	0:03:32	0:00:44	81,00	-0,000391	-0,000148712	61,97
20	0:04:08	0:00:36	117,00	-0,0005295	-0,000302884	42,80
25	0:04:40	0:00:32	149,00	-0,000667	-0,000798811	-19,76
30	0:05:11	0:00:31	180,00	-0,0008075	-0,001157162	-43,30
35	0:05:41	0:00:30	210,00	-0,000954	-0,001500009	-57,23
40	0:06:10	0:00:29	239,00	-0,001106	-0,001736726	-57,03
45	0:06:37	0:00:27	266,00	-0,0012605	-0,001562682	-23,97
50	0:07:05	0:00:28	294,00	-0,0014195	-0,001328149	6,44

Mediante la obtención de las cargas a través del ensayo, se determinó el tiempo en el cual se logró coincidir con el registro de los strain gauges, como se puede

ver durante la primera medición, se obtuvieron errores muy grandes con respecto a los obtenidos con los métodos tradicionales, durante la primera posición.

### 4.3.2 Segunda medición

En la segunda medición se analizaron 258 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la figura 28 y 29.



Figura 28 Ubicación del primer punto, segunda medición.

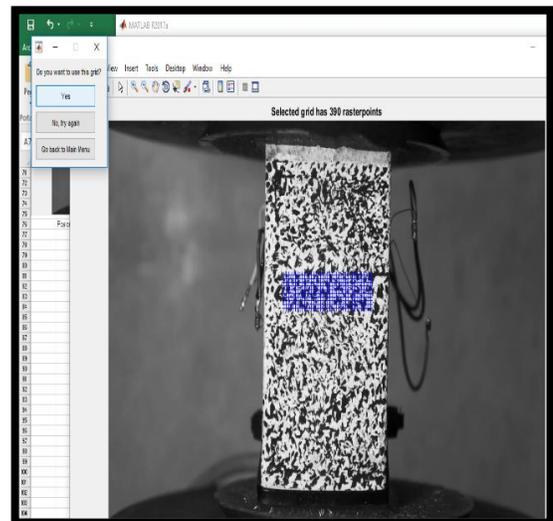


Figura 29 Ubicación del segundo punto, segunda medición.

Tabla 6 Resultados de la segunda medición.

Fuerza (KN)	TIME	TIME	TIME (s)	$\epsilon_0$	$\epsilon_2$	Error 2 (%)
0	0:02:11	0:00:00	0,00	0	0	0,00
10	0:02:48	0:00:37	37,00	-0,000257000	-0,000064813	74,78
15	0:03:32	0:00:44	81,00	-0,000391000	-0,000178400	54,37
20	0:04:08	0:00:36	117,00	-0,000529500	-0,000318774	39,80
25	0:04:40	0:00:32	149,00	-0,000667000	-0,000980709	-47,03
30	0:05:11	0:00:31	180,00	-0,000807500	-0,001418471	-75,66
35	0:05:41	0:00:30	210,00	-0,000954000	-0,001571175	-64,69
40	0:06:10	0:00:29	239,00	-0,001106000	-0,001886458	-70,57
45	0:06:37	0:00:27	266,00	-0,001260500	-0,001364406	-8,24
50	0:07:05	0:00:28	294,00	-0,001419500	-0,001441330	-1,54

Las posiciones de las rejillas fueron diferentes, aun así, los errores se mantuvieron con valores altos.

### 4.3.3 Tercera medición

En la tercera medición se analizaron 258 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la figura 30 y 31.

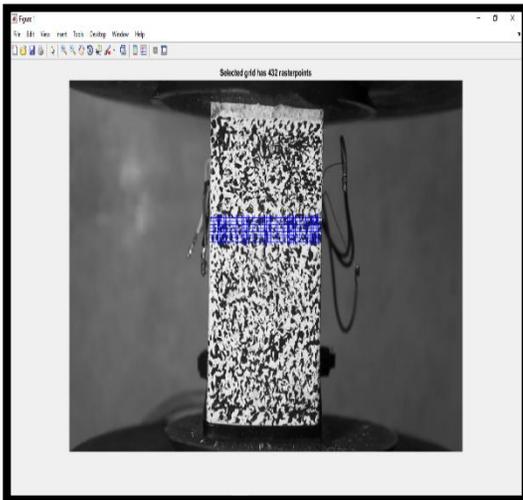


Figura 30 Ubicación del primer punto, tercera medición.



Figura 31 Ubicación del segundo punto, tercera medición.

Tabla 7 Resultados de la tercera medición.

Fuerza (KN)	TIME	TIME	TIME (s)	$\epsilon$ 0	$\epsilon$ 3	Error 3 (%)
0	0:02:11	0:00:00	0,00	0	0	0,00
10	0:02:48	0:00:37	37,00	-0,000257000	0,000036823	85,67
15	0:03:32	0:00:44	81,00	-0,000391000	-0,000178857	54,26
20	0:04:08	0:00:36	117,00	-0,000529500	-0,000184117	65,23
25	0:04:40	0:00:32	149,00	-0,000667000	-0,000970560	-45,51
30	0:05:11	0:00:31	180,00	-0,000807500	-0,001420331	-75,89
35	0:05:41	0:00:30	210,00	-0,000954000	-0,001751742	-83,62
40	0:06:10	0:00:29	239,00	-0,001106000	-0,002293572	-107,38
45	0:06:37	0:00:27	266,00	-0,001260500	-0,001604448	-27,29
50	0:07:05	0:00:28	294,00	-0,001419500	-0,001515020	-6,73

La ubicación de los puntos se los hizo en una franja mucho más grande, aun así, los resultados no son favorables, se siguen obteniendo valores de errores muy grandes.

#### 4.3.4 Cuarta medición

En la cuarta medición se analizaron 258 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en las Figuras 32 y 33.

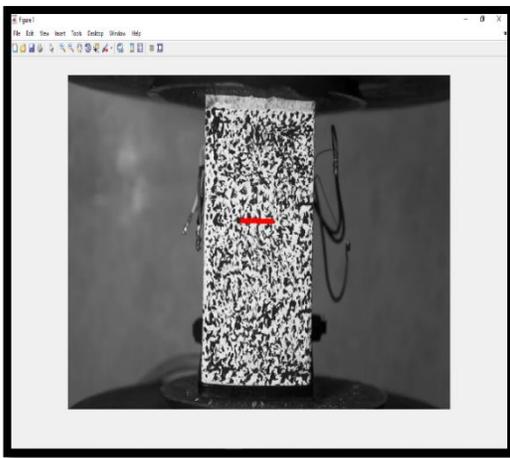


Figura 32 Ubicación del primer punto, cuarta medición.

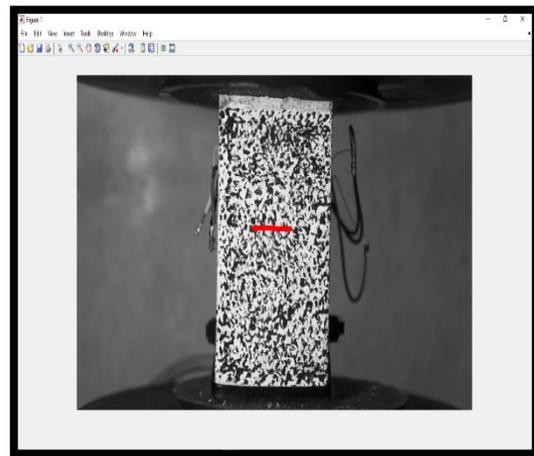


Figura 33 Ubicación del segundo punto, cuarta medición.

Tabla 8 Resultados de la cuarta medición.

Fuerza (KN)	TIME	TIME	TIME (s)	$\epsilon 0$	$\epsilon 4$	Error 4 (%)
0	0:02:11	0:00:00	0,00	0	0	0,00
10	0:02:48	0:00:37	37,00	-0,000257000	-0,000112961	56,05
15	0:03:32	0:00:44	81,00	-0,000391000	-0,000090369	76,89
20	0:04:08	0:00:36	117,00	-0,000529500	-0,000768136	-45,07
25	0:04:40	0:00:32	149,00	-0,000667000	-0,001626641	-143,87
30	0:05:11	0:00:31	180,00	-0,000807500	-0,001423311	-76,26
35	0:05:41	0:00:30	210,00	-0,000954000	-0,001152204	-20,78
40	0:06:10	0:00:29	239,00	-0,001106000	-0,000994058	10,12
45	0:06:37	0:00:27	266,00	-0,001260500	-0,002033301	-61,31
50	0:07:05	0:00:28	294,00	-0,001419500	-0,001875155	-32,10

Los valores de los errores siguen siendo muy altos, por lo tanto, la medición con línea sobre la zona que requerimos no es eficiente.

### 4.3.5 Quinta medición

En la quinta medición se analizaron 258 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la Figura 34 y 35.

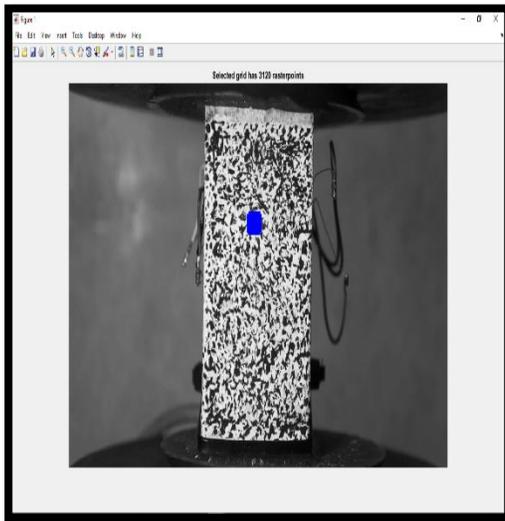


Figura 34 Ubicación del primer punto, quinta medición.

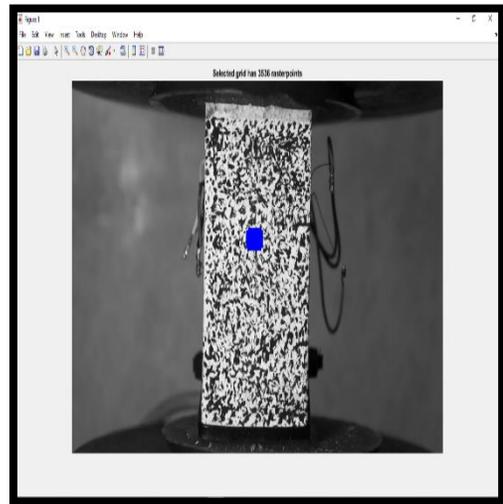


Figura 35 Ubicación del segundo punto, quinta medición.

Tabla 9 Resultados de la quinta medición.

Fuerza (KN)	TIME	TIME	TIME (s)	$\epsilon$ 0	$\epsilon$ 5	Error 5 (%)
0	0:02:11	0:00:00	0,00	-0,02449505	0	0,00
10	0:02:48	0:00:37	37,00	-0,000257000	0,000121134	52,87
15	0:03:32	0:00:44	81,00	-0,000391000	-0,000234499	40,03
20	0:04:08	0:00:36	117,00	-0,000529500	-0,000176032	66,76
25	0:04:40	0:00:32	149,00	-0,000667000	-0,000732232	-9,78
30	0:05:11	0:00:31	180,00	-0,000807500	-0,001185036	-46,75
35	0:05:41	0:00:30	210,00	-0,000954000	-0,001224738	-28,38
40	0:06:10	0:00:29	239,00	-0,001106000	-0,001611019	-45,66
45	0:06:37	0:00:27	266,00	-0,001260500	-0,001725555	-36,89
50	0:07:05	0:00:28	294,00	-0,001419500	-0,001094263	22,91

En esta medición se obtuvo un error más concerniente a los obtenidos con los strain gauges, lo que nos indica que el patrón de medición es ingresar más puntos de medición dentro de la rejilla, los errores después del 50% de la carga aplicada, no pasan del 46%.

Siguiendo el patrón de tener más puntos de medición dentro de las rejillas, se realizó la siguiente medición.

### 4.3.6 Sexta medición

En la sexta medición, se analizaron 258 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la figura 36 y 37.



Figura 36 Ubicación del primer punto, sexta medición.

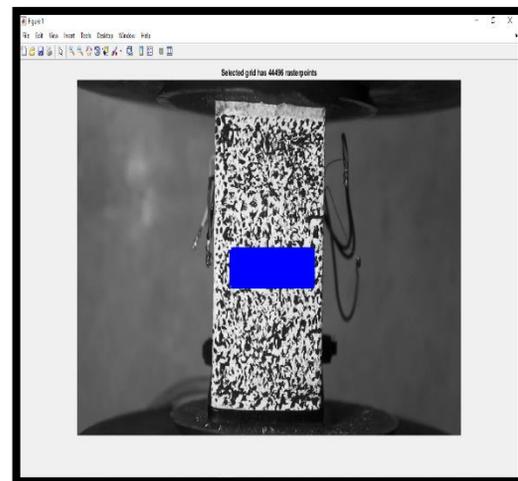


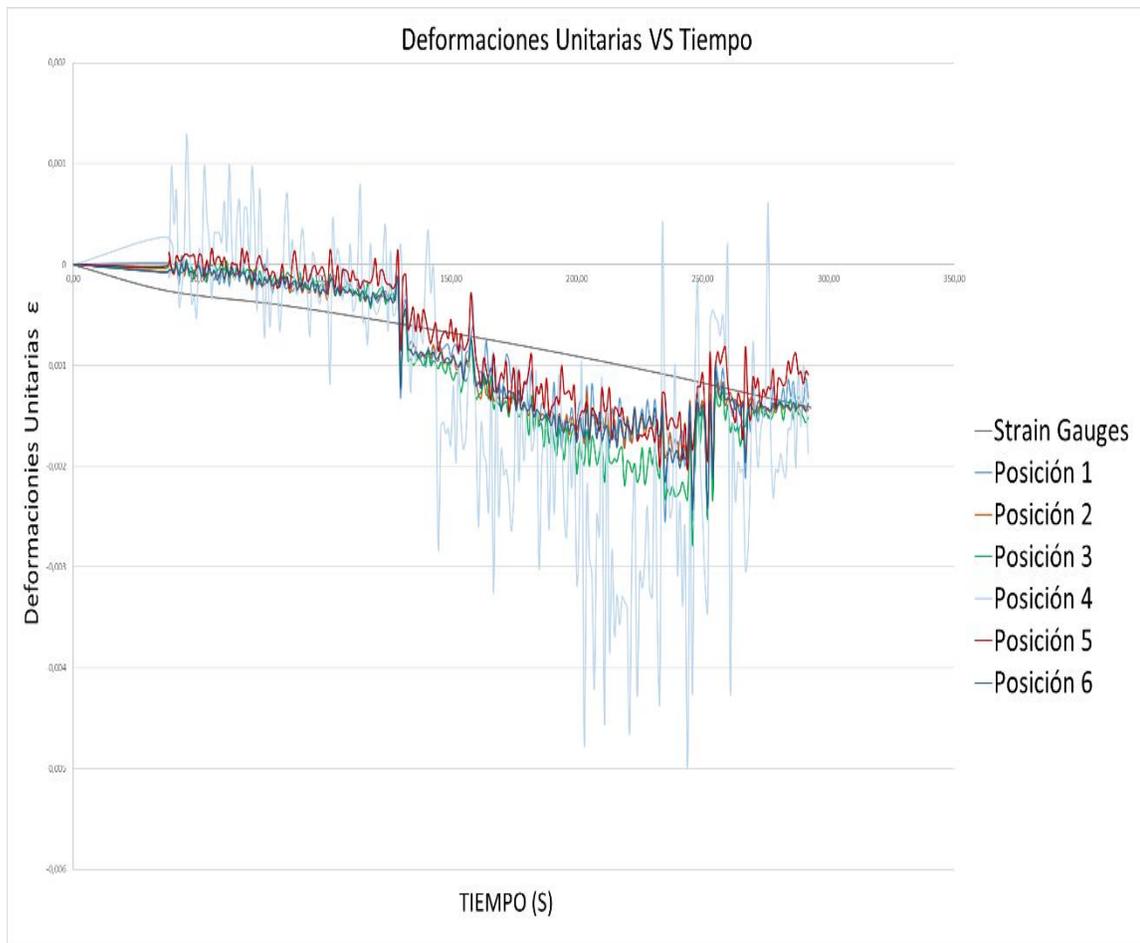
Figura 37 Ubicación del segundo punto, sexta medición.

Tabla 10 Resultados de la sexta medición.

Fuerza (KN)	TIME	TIME	TIME (s)	$\epsilon$ 0	$\epsilon$ 6	Error 6 (%)
0	0:02:11	0:00:00	0,00	-0,02449505	0	0,00
10	0:02:48	0:00:37	37,00	-0,000257000	-0,000059499	76,85
15	0:03:32	0:00:44	81,00	-0,000391000	-0,000158946	59,35
20	0:04:08	0:00:36	117,00	-0,000529500	-0,000314825	40,54
25	0:04:40	0:00:32	149,00	-0,000667000	-0,000928873	-39,26
30	0:05:11	0:00:31	180,00	-0,000807500	-0,001444217	-78,85
35	0:05:41	0:00:30	210,00	-0,000954000	-0,001741152	-82,51
40	0:06:10	0:00:29	239,00	-0,001106000	-0,001883392	-70,29
45	0:06:37	0:00:27	266,00	-0,001260500	-0,001390004	-10,27
50	0:07:05	0:00:28	294,00	-0,001419500	-0,001378191	2,91

Se puede ver que el error aumento, después que la carga sobrepasa el 50% el porcentaje disminuye y aumenta, con valores mayores al 50%.

Se presenta a continuación todas las mediciones realizadas durante todo el ensayo.



*Figura 38 Resultado de las diferentes mediciones, en los distintos puntos de referencia.*

En la Figura 38 podemos observar todas las mediciones obtenidas con la correlación de las imágenes y las obtenida con los strain gauges, se puede analizar brevemente que existen puntos que coinciden, y otros que realmente se encuentran muy lejos de la realidad.

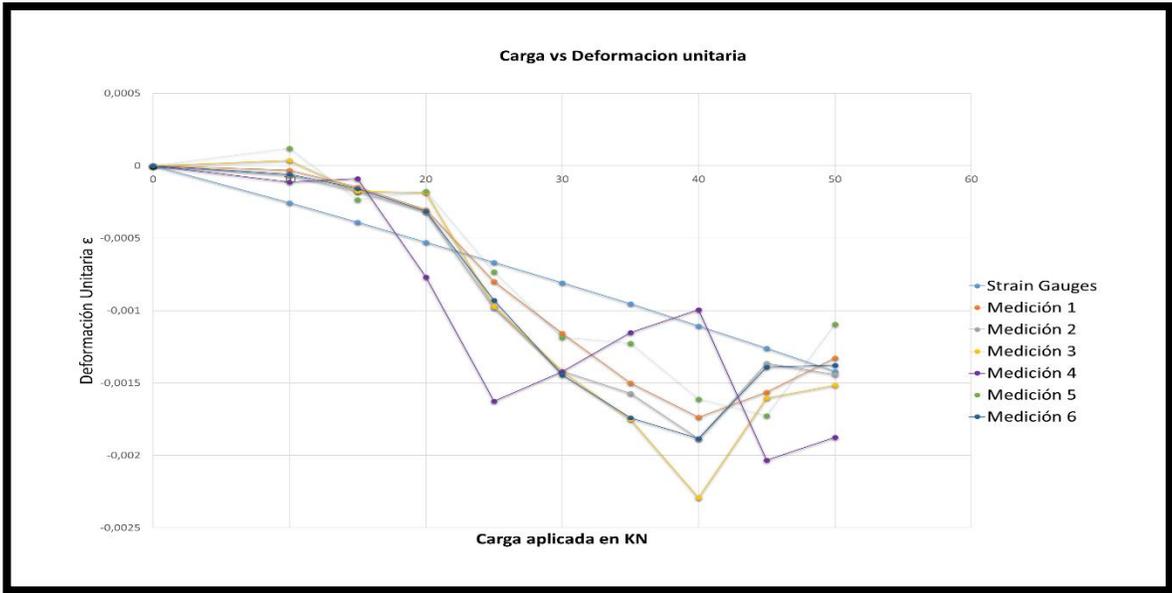


Figura 39 Carga aplicada en KN vs deformación unitaria durante el ensayo

En la figura 39 se puede observar la extracción del tiempo exacto en el que la carga aplicada, los strain gauges y la correlación de imágenes marcan lo mismo, graficando solo la carga aplicada vs las deformaciones unitarias marcadas.

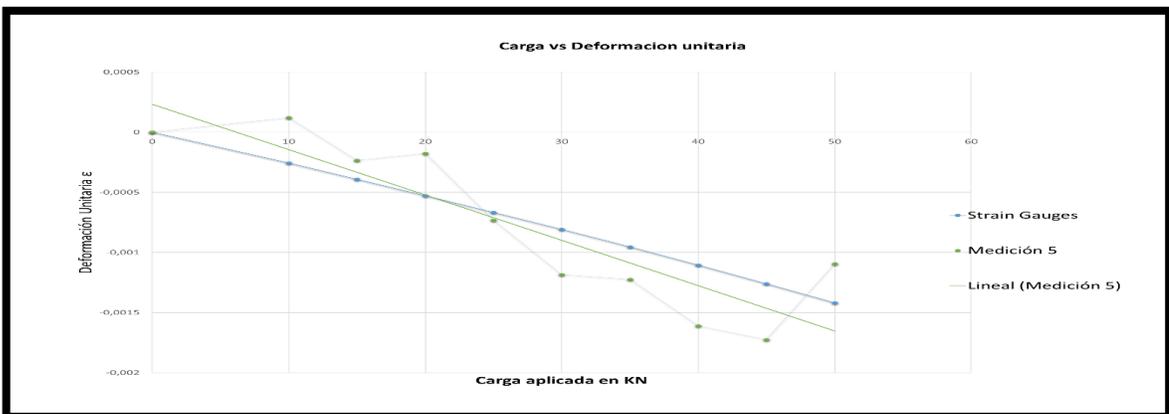


Figura 40 Línea de tendencia de la mejor medición y la lectura de los strain gauges.

## 4.4 Ensayo 4

El siguiente ensayo se lo realizó al mismo espécimen, pero esta vez se lo llevó a la ruptura o falla, como se explicó en el ensayo uno y dos del capítulo 4, se llevaron los dos primeros ensayos a la falla para tener una idea de cuánto es su carga máxima.

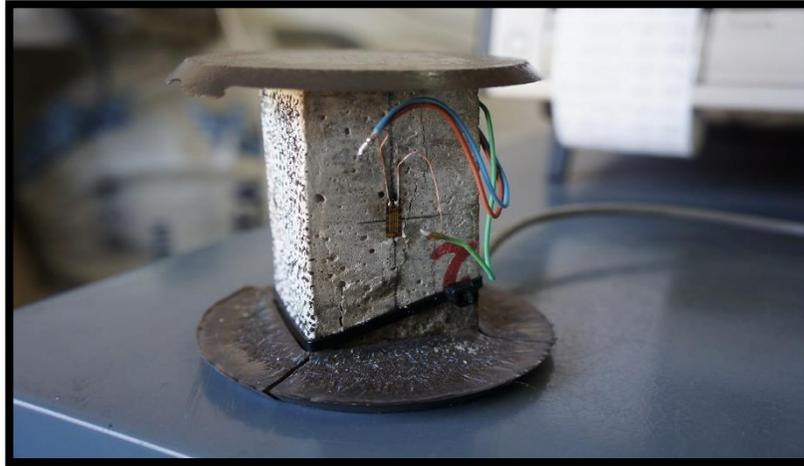


Figura 41 Especimen sometido a compresión simple.

Tabla 11 Resultados obtenidos de los strain gauges en la segunda medición, al mismo espécimen.

Strain Gauge 1	Strain Gauge	TIME	TIME	TIME (s)	FORCE (KN)	$\epsilon$
0	0	0	0:00:00	0	0	0
0	0	14:14:27	0:00:56	56	5	0
129	155	14:17:04	0:02:37	85	10	-0,000142
266	288	14:17:32	0:00:28	112	15	-0,000277
411	421	14:18:00	0:00:28	135	20	-0,000416
555	550	14:18:23	0:00:23	157	25	-0,0005525
700	684	14:18:45	0:00:22	177	30	-0,000692
847	818	14:19:05	0:00:20	199	35	-0,0008325
993	954	14:19:26	0:00:21	220	40	-0,0009735
1151	1099	14:19:49	0:00:23	240	45	-0,001125
1290	1232	14:20:08	0:00:19	262	50	-0,001261
1446	1377	14:20:29	0:00:21	293	55	-0,0014115
1604	1545	14:21:01	0:00:32	332	60	-0,0015745
1774	1747	14:21:40	0:00:39	364	65	-0,0017605
1943	1930	14:22:12	0:00:32	402	68	-0,0019365

#### 4.4.1 Primera medición

En la primera medición se analizaron 347 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la figura 42 y 43.

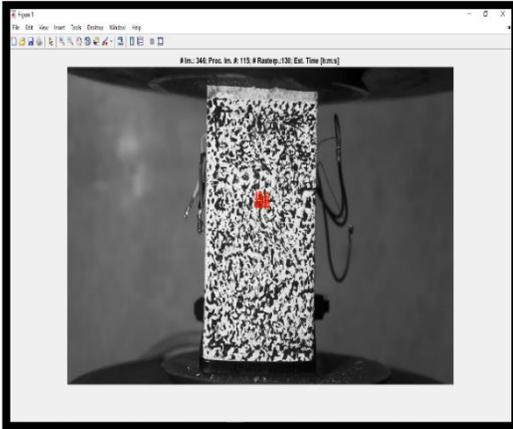


Figura 42 Ubicación del primer punto, primera medición.

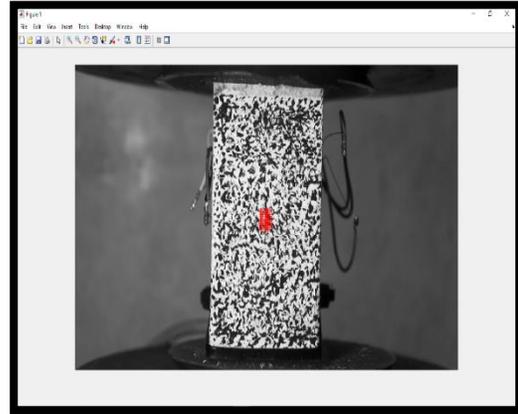


Figura 43 Ubicación del segundo punto, primera medición.

Tabla 12 Resultados obtenidos de la primera medición

FORCE (KN)	TIME (s)	$\epsilon 0$	$\epsilon 1$	Error 1 (%)
0	0	0	0	0
5	56	0	-0,00120297	0
10	85	-0,000142	-0,00096835	-581,937092
15	112	-0,000277	-0,00123655	-346,4086
20	135	-0,000416	-0,00115951	-178,729101
25	157	-0,0005525	-0,0015599	-182,335222
30	177	-0,000692	-0,00120935	-74,7614406
35	199	-0,0008325	-0,00156447	-87,92448
40	220	-0,0009735	-0,0016414	-68,6085051
45	240	-0,001125	-0,00202213	-79,7453041
50	262	-0,001261	-0,00244664	-94,0241723
55	293	-0,0014115	-0,00287636	-103,780497
60	332	-0,0015745	-0,00369244	-134,515166
65	364	-0,0017605	-0,00348268	-97,823535
68	402	-0,0019365	-0,00344932	-78,121228

Como se pudo observar en el ensayo número 3, la medición número 5 tuvo menor porcentaje de error comparado con las demás mediciones, esta vez se seguirá el mismo patrón para comprobar si el error disminuye aún más.

En la primera medición se pudo observar que los errores siguen teniendo valores muy altos, en el orden mayor del 50%.

#### 4.4.2 Segunda medición

En la segunda medición se analizaron 347 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la figura 44 y 45.



*Figura 44 Ubicación del primer punto, segunda medición.*



*Figura 45 Ubicación del segundo punto, segunda medición*

Se hace una segunda medición con más puntos dentro de la rejilla.

*Tabla 13 Resultados obtenidos de la segunda medición.*

FORCE (KN)	TIME (s)	$\epsilon 0$	$\epsilon 2$	Error 2 (%)
0	0	0	0	0
5	56	0	9,7809E-05	0
10	85	-0,000142	-0,00063718	-348,71586
15	112	-0,000277	-0,00036359	-31,2615925
20	135	-0,000416	-0,00124033	-198,15685
25	157	-0,0005525	-0,00134948	-144,250091
30	177	-0,000692	-0,00101778	-47,078238
35	199	-0,0008325	-0,00120915	-45,2428819
40	220	-0,0009735	-0,00085193	12,4878035
45	240	-0,001125	-0,00105038	6,63249493
50	262	-0,001261	-0,00167339	-32,703071
55	293	-0,0014115	-0,00299593	-112,251827
60	332	-0,0015745	-0,00305689	-94,1497635
65	364	-0,0017605	-0,00325038	-84,6282247
68	402	-0,0019365	-0,00363098	-87,5024416

Los errores en algunos puntos se han mantenido, pero en otros han disminuido considerablemente, lo que nos indica que el patrón puede tener o no buenos resultados, se procede hacer una tercera medición.

### 4.4.3 Tercera medición

En la tercera medición se analizaron 347 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la figura 46 y 47.

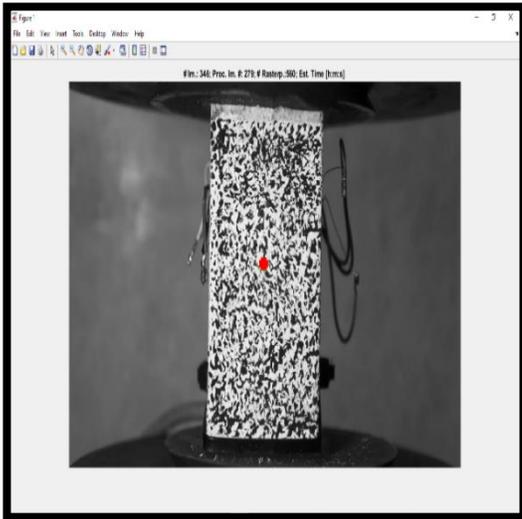


Figura 46 Ubicación del primer punto, tercera medición.



Figura 47 Ubicación del segundo punto, tercera medición.

Tabla 14 Resultados de la tercera medición

FORCE (KN)	TIME (s)	$\epsilon 0$	$\epsilon 3$	Error 3 (%)
0	0	0	0	0
5	56	0	-0,00218247	0
10	85	-0,000142	-0,00151998	-970,40719
15	112	-0,000277	-0,00166335	-500,487912
20	135	-0,000416	-0,00054898	-31,9671635
25	157	-0,0005525	0,00037401	32,3067317
30	177	-0,000692	-0,00075569	-9,20363208
35	199	-0,0008325	-0,00097832	-17,5159298
40	220	-0,0009735	-0,00035295	63,7441389
45	240	-0,001125	3,5014E-06	99,688764
50	262	-0,001261	-0,00047917	62,0007689
55	293	-0,0014115	-0,00034042	75,8824325
60	332	-0,0015745	0,00025273	83,9485058
65	364	-0,0017605	0,00013442	92,3646603
68	402	-0,0019365	-0,00196364	-1,40165461

Como se puede observar en la tabla 12, los valores del error son realmente altos, la medición se hizo hacia el lado derecho del patrón que se venía siguiendo, por lo tanto, los errores incrementaron.

#### 4.4.4 Cuarta medición

En la cuarta medición se analizaron 347 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la figura 48 y 49



*Figura 48 Ubicación del primer punto, cuarta medición.*



*Figura 49 Ubicación del segundo punto, cuarta medición.*

En esta última medición se disminuyó considerablemente los valores del error después de 50% de la carga aplicada, de la misma manera los puntos de medición dentro de la rejilla fueron 4 veces que las mediciones anteriores, dándonos como resultados, muy parecidos a los medidos con el método tradicional.

Tabla 15 Resultados de la cuarta medición.

FORCE (KN)	TIME (s)	$\epsilon 0$	$\epsilon 4$	Error 4 (%)
0	0	0	0	0
5	56	0	-0,00040461	0
10	85	-0,000142	-0,00125261	-782,119094
15	112	-0,000277	-0,00107259	-287,216595
20	135	-0,000416	-0,00168558	-305,187793
25	157	-0,000525	-0,00034209	38,0824847
30	177	-0,000692	-0,00054295	21,5387805
35	199	-0,0008325	-0,00045207	45,6968401
40	220	-0,0009735	-0,00092788	4,68617885
45	240	-0,001125	-0,00187255	-66,4485733
50	262	-0,001261	-0,00098576	21,8268031
55	293	-0,0014115	-0,00123235	12,6921907
60	332	-0,0015745	-0,00139674	11,2899201
65	364	-0,0017605	-0,00249306	-41,6110541
68	402	-0,0019365	-0,00192522	0,58245009

Una vez realizada todas las mediciones se prosigue a hacer un promedio de los cuatro resultados anteriores, dando como producto la siguiente tabla.

Tabla 16 Resultados obtenidos por el promedio de las cuatro mediciones, mediante la correlación de imágenes.

FORCE (KN)	TIME (s)	$\epsilon_0$	$\epsilon$ Prom.	Error prom
0	0	0	0	0
5	56	0	0	0
10	85	-0,000142	-0,00109453	-670,794809
15	112	-0,000277	-0,00108402	-291,343675
20	135	-0,000416	-0,0011586	-178,510227
25	157	-0,0005525	-0,00071937	-30,20239
30	177	-0,000692	-0,00088144	-27,3761325
35	199	-0,0008325	-0,001051	-26,2466129
40	220	-0,0009735	-0,00094354	3,07740402
45	240	-0,001125	-0,00123539	-9,81253662
50	262	-0,001261	-0,00139624	-10,7249178
55	293	-0,0014115	-0,00186127	-31,8644253
60	332	-0,0015745	-0,00197333	-25,3308788
65	364	-0,0017605	-0,00227293	-29,1068685
68	402	-0,0019365	-0,00274229	-41,6107185

Se puede observar en la tabla 14, que a partir del 25% de la carga aplicada, el porcentaje de error disminuyó considerablemente. A continuación, se presentarán las gráficas obtenidas:

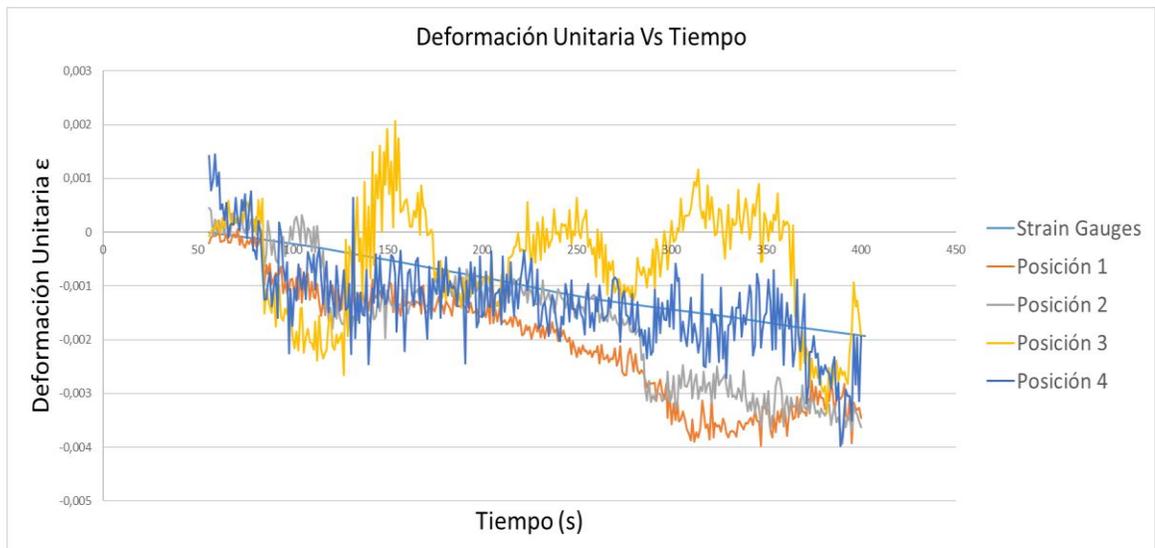
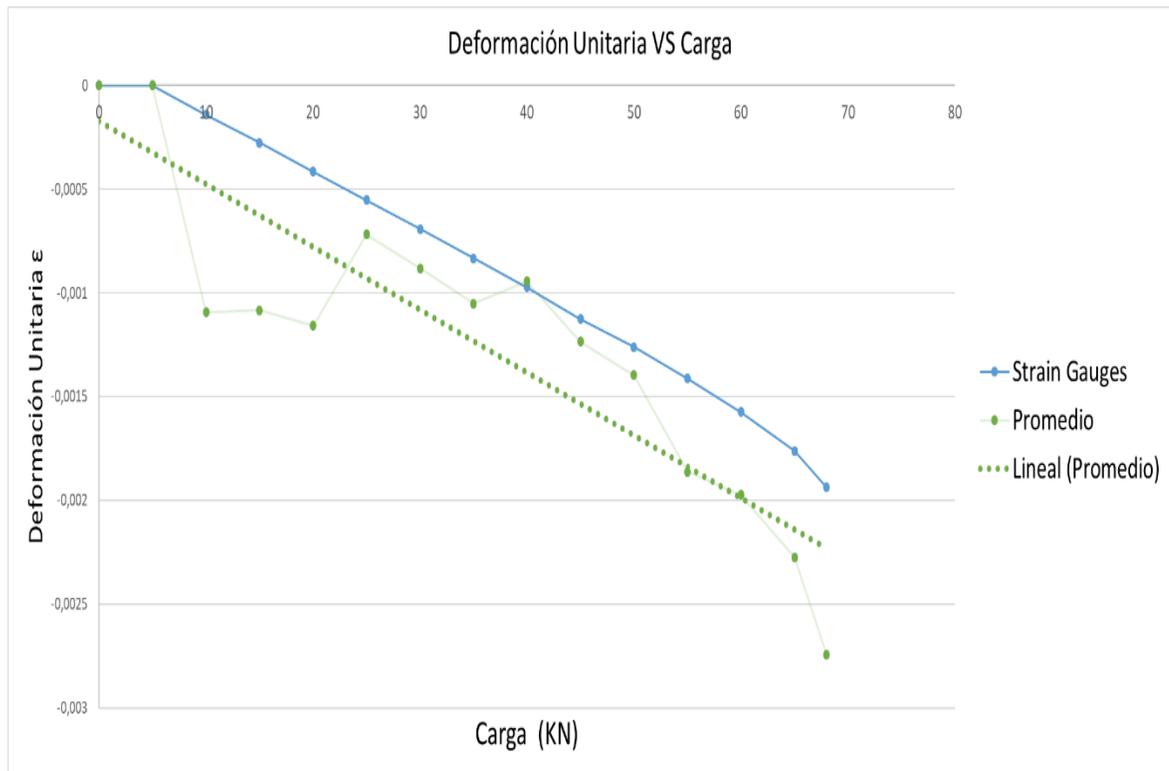


Figura 50 Resultados obtenidos en todas las mediciones, por el método tradicional de los strain gauges y la correlación de imágenes.

Como se puede ver en la figura 50, la serie número 5 representa la mejor medición la cual representa a la cuarta medición, indicando que el patrón que se estableció, tiene mejor aproximación que las demás mediciones.



*Figura 51 Resultados obtenidos de los strain gauges. Se representa el promedio de las cuatro mediciones, y la línea de tendencia del promedio.*

En la figura 50, se muestra la línea de tendencia, que se acerca mucho a las mediciones obtenidas del método tradicional.

## 4.5 Ensayo 5

El siguiente ensayo se lo realizó a una briqueta, bajo la Norma Europea para asfaltos flexibles y se utilizó la máquina N.A.T (por sus siglas en inglés, Nottingham Asphalt Tester) para ensayos automatizados, del laboratorio de Asfaltos de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil.

El equipo Nottingham Asphalt Tester (N.A.T), es un diseño de la empresa “Cooper Research Technology” cuya función es principal es evaluar las propiedades mecánicas de los materiales asfálticos. (Dussán Navarro & Flautero Valencia, 2005)

Los resultados obtenidos de la briqueta ensayada fueron los siguientes:



*Figura 52 Briqueta ensayada en la maquina N.A.T.*

Tabla 17 Resumen de las características del espécimen (briqueta).

Briqueta	Temperatura (°C)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)
1	20	101	61

Tabla 18 Resumen de los datos obtenidos de la maquina N.A.T.

Deformación vertical	Deformación Unitaria	Fuerva Vertical (KN)	Esfuerzo Horizontal
0	0	3,7	381,2
0,645	-0,006386139	3,8	389,7
0,839	-0,008306931	3,9	398
0,997	-0,009871287	3,9	402,1
1,135	-0,011237624	3,9	403,8
1,234	-0,012217822	3,9	404,5
1,333	-0,01319802	3,9	403,8
1,417	-0,014029703	3,9	403,8
1,506	-0,014910891	3,9	402,7
1,571	-0,015554455	3,9	401,8
2,474	-0,02449505	3,9	398,8

En la siguiente figura se muestra los resultados obtenidos, en el ensayo que se utilizó el método de la correlación de imágenes y la ubicación de los puntos obtenidos del ensayo realizado en el N.A.T.:

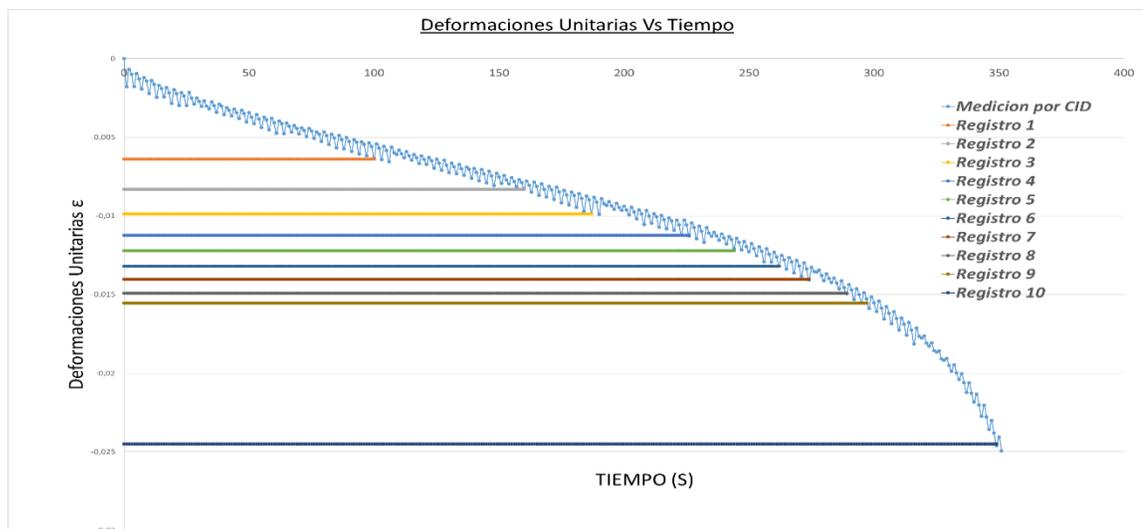
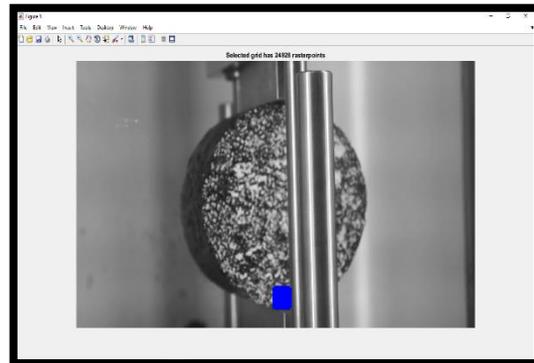


Figura 53 Resultados obtenidos de la maquina N.A.T. (registros 1 2,3,4,5,6,7,8,9,10). Medición por CID, representa los datos obtenidos mediante la correlación de imágenes.



*Figura 54 Ubicación del primer punto de referencia.*



*Figura 55 Ubicación del segundo punto de referencia.*

En la primera medición se analizaron 349 imágenes con una resolución de 1920x1080 píxeles; los puntos de análisis se ubicaron como se detalla en la figura 54 y 55

Se puede determinar que, siguiendo el patrón establecido, la relación de las deformaciones unitarias obtenidas con la máquina de ensayos de asfaltos N.A.T., son muy similares a las que se obtienen con el método de la correlación de imágenes. A continuación, se muestra el error relativo de los dos últimos puntos de medición, por un lado, el que marcó el N.A.T y el por otro el que se obtuvo de del método establecido.

*Tabla 19 Resultados del error relativo porcentual, entre el último dato obtenido por el N.A.T. y el último obtenido de la correlación de imágenes.*

$\epsilon 0$	$\epsilon 1$	Error 1 (%)
-0,02449505	-0,025942821	-5,91

## Capítulo 5

### 5 Recomendaciones y Conclusiones

#### 5.1 Conclusiones

Durante el trabajo realizado, se obtuvieron resultados que registran errores relativos de hasta el 25% lo que indica que el camino que se tomó para realizar los ensayos se aproxima mucho a los datos recogidos con los strain gauges.

Sin embargo, durante la obtención de datos en el ensayo número 3 y número 4, el método aplicado no es eficiente. No se reconocen deformaciones unitarias muy pequeñas, del orden de una micra  $\mu$ . A medida que las cargas pasan del 50% y 25% respectivamente, las deformaciones van registrándose mas grandes y el método aplicado va registrando resultados más cercanos a los que se obtuvieron por el método tradicional.

EL método de la correlación de imágenes resulta efectivo cuando los valores de las deformaciones, están en el orden las décimas, centésimas y milésimas, ya que los resultados obtenidos en el ensayo número 5, muestra un error relativo porcentual del 5.9%.

La correlación de imágenes es un método moderno que aún debe seguir investigándose, tiene un campo muy amplio para su aplicación, en los ensayos que se realizaron se tomaron en cuenta cuatro variables muy importantes. La primera variable es la luz con que se deben hacer los ensayos, una luz con poca intensidad o mucha intensidad puede alterar la luminosidad con el que se registra el ensayo.

Con una posición correcta y la cantidad de luces fluorescentes indicadas se puede evitar que se creen sombras en las regiones de interés, como también la cámara que se utilice, pueda capturar los cambios de luz que se puedan registrar.

Segundo, la velocidad con la que se apliquen las cargas y descargas de las fuerzas sobre los especímenes deben ser controladas, por las maquinas en la cual se vayan a ensayar. Una velocidad muy alta durante el ensayo, no ayudará a registrar un video valedero para la correlación de imágenes. Una velocidad controlada y moderada de acuerdo al tipo de ensayo que se vaya a realizar, tendrá una buena repercusión, cuando se procese las imágenes.

Tercero, una cámara de alta resolución en la cual la capacidad de frames que pueda capturar por cada segundo durante un ensayo, es importante porque registrará cambios bruscos, favoreciendo a los datos que se recojan al momento de correlacionar las imágenes.

Cuarto, las técnicas de pintura que se utilizaron durante los ensayos tuvieron un papel muy importante, las primeras técnicas de pintura punteada en la que se utilizaron solo marcadores de tinta de varios colores y pinturas con brillo, no tuvieron eficiencia. La técnica de pintura moteada ayuda a que la correlación de imágenes trabaje de forma adecuada, la superficie donde se utilizó esta técnica, ayudó a que el proceso de correlación pueda seguir las coordenadas y sus cambios sin ninguna dificultad. Al momento de escoger el color para implementar la técnica moteada se utilizó el blanco y negro, para maximizar el contraste.

## 5.2 Recomendaciones

Se propone implementar el método de la correlación de imágenes en una segunda investigación, en la cual se mejore las técnicas que se han realizado en esta primera parte del trabajo. El CEINVES (Centro de Investigación de Estructuras), de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, es el lugar apropiado donde se podría llevar a cabo. Mediante las siguientes especificaciones técnicas:

- El espécimen que se someta al procedimiento, dentro de la región de interés, debe tener una superficie limpia, donde se pueda utilizar la técnica de moteado, para la misma se hará uso de la siguiente marca de pintura.
- Pintura Súper Caucho, en emulsión a base de agua(látex) tipo II, marca Indualca. Se pintará toda la superficie con pintura de color blanco y sobre ésta se utilizará la técnica de moteado.
- La velocidad del ensayo debe ser controlada para evitar cambios bruscos durante la grabación.
- Lámpara Fluorescente tipo OSRAM; 120 V, 20 W, Mod. DULUX EL T 20W/865
- Luces Fluorescentes, deben evitar sombras.
- Cámara de video, que tenga una capacidad de capturar más de 30 frames por cada segundo y su calidad de video sea de alta definición (4k).
- Tarjetas de almacenamiento de una capacidad mayor a 32 GB.
- Ordenador, en el cual se pueda implementar e instalar el programa desarrollado.

- Los equipos de laboratorio en los cuales se realicen los ensayos, deben estar sujetos y estabilizados. Para evitar movimientos no deseados durante la grabación.
- Actualizar y/o dar correcto mantenimiento a los equipos de laboratorio, para asegurar un adecuado muestreo.

## Referencias

Bennett, P., Carpe, A., & Lundeberg, W. (2015). The Evolution of Technology to Support Learning. *The Southern Arizona Intercollegiate Journal*, 34-42.

Bennett, P., Carpe, A., & Lundeberg, W. The Evolution of Technology to Support Learning. *Southern Arizona Intercollegiate Journal*, 34.

Christoph, E., Robert, T., & Daniel, G. (2012). Digital image correlation and tracking with matlab.

de la Ossa Pérez, R., & Natarío Vaquero, R. (3 de Mayo de 2015). Obtenido de <http://oa.upm.es>

Dussán Navarro, E., & Flautero Valencia, F. (2005). Automatización de ensayos dinámicos de laboratorio en el equipo NAT (NOTTINGHAM ASPHALT TESTE) de la pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de <http://javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis113.pdf>

GIMP2. (2018). GIMP. Obtenido de GNU Image manipulation program : <https://www.gimp.org>

Helava, U. V. (1978). Digital correlation in photogrammetric instruments. *Photogrammetria*, 34(1), 19-41.

Hedayati, N., Madoliat, R., & Hashemi, R. (2017). Strain measurement and determining coefficient of plastic anisotropy using digital image correlation (DIC). *Mechanics & Industry*, 18(3), 311.

Lee, C., Peters, W. H., Sutton, M. A., & Chao, Y. J. (1987). A study of plastic zone formation by digital image processing. *International journal of plasticity*, 3(2), 129-142.

MathWorks, Inc. (1996). *MATLAB: Application program interface guide* (Vol. 5). MathWorks.

Moore, H. (2007). *MATLAB para ingenieros*. Pearson.

Monestel, K. V. (2014). Edición de gráficos con Inkscape y Gimp. *Revista Digital: Matemática, Educación e Internet*, 12(2).

Ossa Pérez, R. D. L., & Notario Vaquero, R. (2015). Análisis de media de diferencia entre imágenes y su posterior implementación usando Matlab.

Skarżyński, Ł., & Tejchman, J. (2013). Experimental investigations of fracture process using DIC in plain and reinforced concrete beams under bending. *Strain*, 49(6), 521-543.

The MathWorks, Inc. (2018). Obtenido de <https://la.mathworks.com>

4Snarecrash. (22 de Marzo de 2013). Youtube. Obtenido de Camtasia: <https://www.youtube.com>

## Anexos

El programa generado en el software "MATLAB" se presenta a continuación:

```
clear
close all
clc

%% Obtención de datos
% Para la obtención de datos, se requiere marcar dos puntos de
referencia; tanto el primero como el segundo punto deben seguir
el mismo orden.
%% PRIMER PUNTO DE REFERENCIA:
filelist_generator
% Código para construir una lista de 9999 o menos nombres de
archivo
% Generación automática de listas de archivos
grid_generator
%Código para crear un análisis de correlación de imágenes
digitales (DIC, por sus siglas en inglés).
%La función grid_generator nos ayudará a crear rejillas sobre el
lugar que deseamos analizar.
automate_image
%La función de automatización es la función central y procesa
todos las rejillas marcadas anteriormente e imágenes mediante el
uso de la función matlab cpcorr.m.Por lo tanto, el directorio
actual en matlab tiene que ser la carpeta donde automate_image.m
encuentra el filenamelist.mat,
%grid_x.dat y grid_y.dat también como las imágenes especificadas
en filenamelist.mat.
a1 = load('validx.dat');
%Variable que se asigna para cargar la matriz a través del
comando "load",para los valores de "x" generada por la función
automate_image.
b1 = load('validy.dat');
%Variable que se asigna para cargar la matriz a través del
comando "load",para los valores de "y" generada por la función
automate_image.
a1 = mean(a1);
% Se utiliza el comando "mean", para sacar el valor medio de un
vector o una matriz, en este caso de la variable a1, que contiene
la matriz generada anteriormente "validx.dat".
b1 = mean(b1);
% Se utiliza el comando "mean", para sacar el valor medio de un
vector o una matriz, en este caso de la variable b1, que contiene
la matriz generada anteriormente "validy.dat".
```

```

%% SEGUNDO PUNTO DE REFERENCIA:
filelist_generator
% Código para construir una lista de 9999 o menos nombres de
archivo
% Generación automática de listas de archivos
grid_generator
%Código para crear un análisis de correlación de imágenes
digitales (DIC, por sus siglas en inglés). La función
grid_generator nos ayudará a crear rejillas sobre el lugar
%que deseamos analizar.
automate_image
%La función de automatización es la función central y procesa
todos las rejillas marcadas anteriormente e imágenes mediante
el uso de la función matlab cpcorr.m. Por lo tanto, el
directorio actual en matlab tiene que ser la carpeta donde
automate_image.m encuentra el filename.mat, grid_x.dat y
grid_y.dat también como las imágenes especificadas en
filename.mat.
a2 = load('validx.dat');
%Variable que se asigna para cargar la matriz a través del
comando "load", para los valores de "x" generada por la
función automate_image.
b2 = load('validy.dat');
%Variable que se asigna para cargar la matriz a través del
comando "load", para los valores de "y" generada por la
función automate_image.
a2 = mean(a2);
% Se utiliza el comando "mean", para sacar el valor medio de
un vector o una matriz, en este caso de la variable a2, que
contiene la matriz generada anteriormente "validx.dat".
b2 = mean(b2);
% Se utiliza el comando "mean", para sacar el valor medio de
un vector o una matriz, en este caso de la variable b1, que
contiene la matriz generada anteriormente. "validy.dat"

%% Cálculo de deformaciones

L0x = a2(1)-a1(1);
% El resultado de la resta del primer valor del vector "a2" y
el primer valor del vector "a1", nos dará como resultado "L0x"
L0y = b2(1)-b1(1);
% El resultado de la resta del primer valor del vector "a2" y
el primer valor del vector "a1", nos dará como resultado "L0y"
Lfx = a2-a1;
% Lfx, marcará la resta de los valores siguientes, de los
vectores "a2" y "a1".
Lfy = b2-b1;
% Lfy, marcará la resta de los valores siguientes, de los
vectores "b2" y "b1".

```

```
%% Cálculo de la deformación en "x"

strainx = (Lfx - L0x)/L0x;
% El resultado se representará en el vector "strainx", que
representa la deformación unitaria.

%% Cálculo de la deformación en "y"

strainy = (Lfy - L0y)/L0y;
% El resultado se representará en el vector "strainy", que
representa la deformación unitaria.

%% Gráficos de resultados

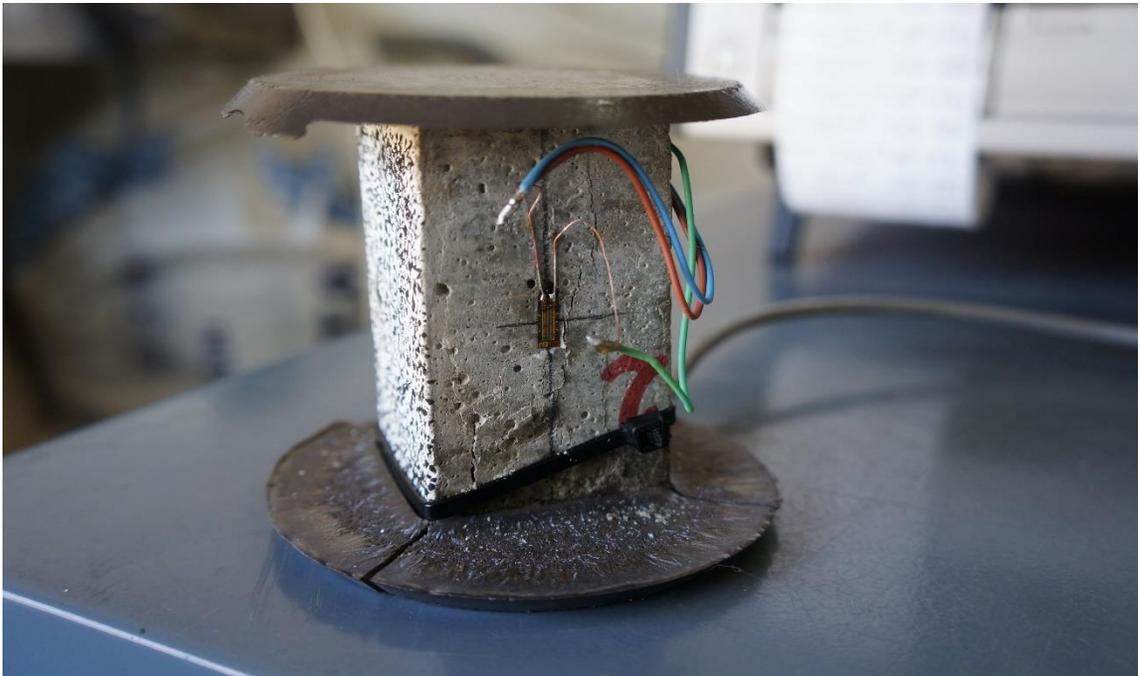
%El comando "plot" nos ayudará a graficar todos los valores
generados
%anteriormente
figure
plot(strainx)

figure
plot(strainy)
```

## Imágenes de los Ensayos



*Figura 1A Especimen utilizado para el ensayo número 3 y 4*



*Figura 2A Detalle de la ubicación de los strain gauges.*

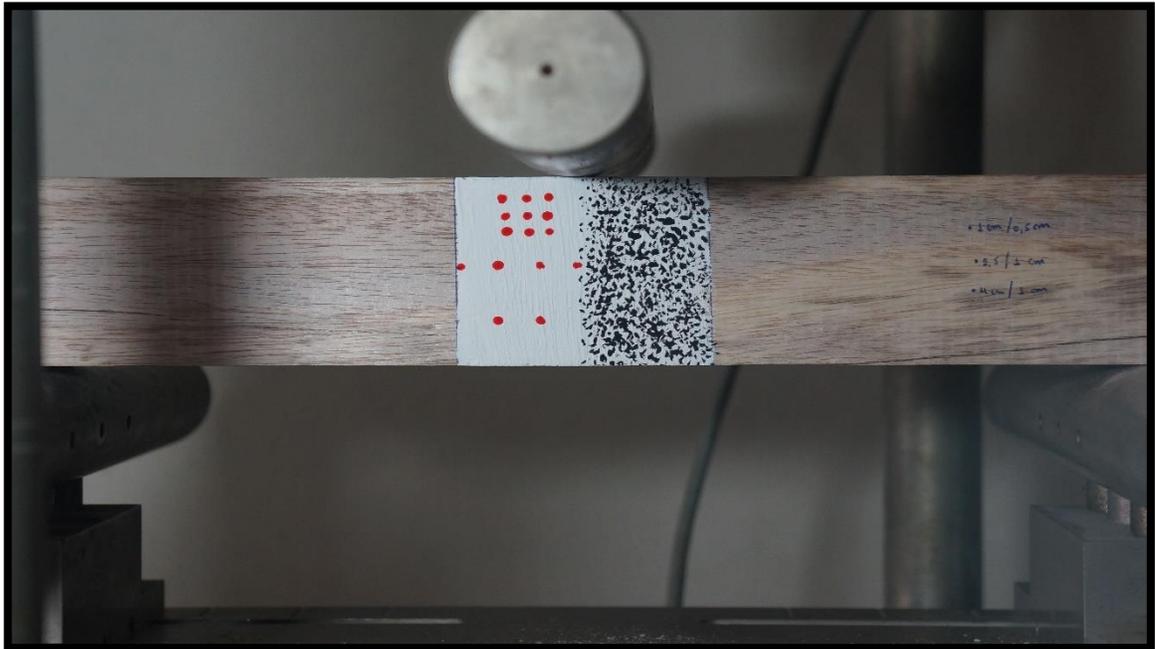


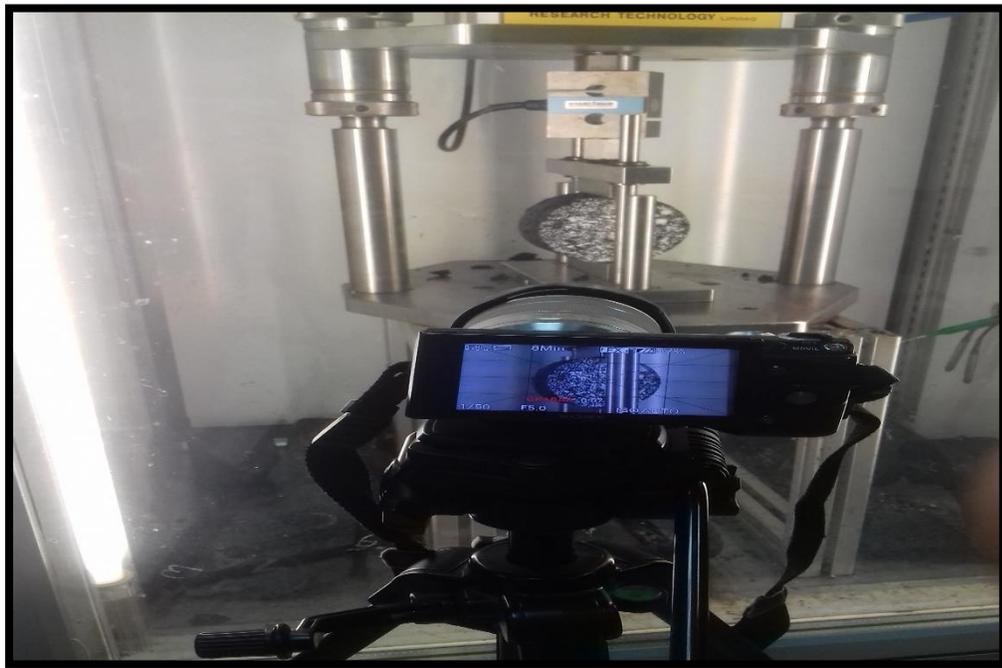
Figura 3A Espécimen de madera, sometido a flexión pura.



Figura 4A Ubicación de los elementos durante el ensayo de probetas de hormigón.



*Figura 5A Briqueta llevada a su falla, mediante el ensayo de la máquina del N.A.T.*



*Figura 6A Briqueta sometida a carga dinámica en la maquina N.A.T.*

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Calderón Coronel, Bryan Francisco** con C.C: # **0604526871** autor del trabajo de titulación: **Medición de las deformaciones unitarias y desplazamientos de especímenes de laboratorio, mediante un software de procesamiento de imágenes** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **21 días del mes de Septiembre de 2018**

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Calderón Coronel, Bryan Francisco**

C.C: **0604526871**



## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Medición de las deformaciones unitarias y desplazamientos de especímenes de laboratorio, mediante un software de procesamiento de imágenes		
<b>AUTOR</b>	Calderón Coronel, Bryan Francisco		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	José Andrés, Barros Cabezas		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Civil		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	21 de Septiembre de 2018	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	80
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Matlab, correlación de imágenes, deformaciones unitarias.		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Procesamiento de imágenes, visión artificial, mediciones, desplazamientos, ensayos mecánicos, ensayos dinámicos.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT</b>			
<p>A medida que la tecnología avanza, es importante empezar a utilizar las herramientas que ella nos aporta. En el presente trabajo se plantea una aplicación práctica de la visión artificial, misma que se basa en el procesamiento de imágenes y uso de algoritmos y subrutinas para determinar, cuantificar y visualizar un número ilimitado de respuestas a los problemas que se planteen en cualquier campo científico.</p> <p>Durante el desarrollo de esta investigación, se ensayaron morteros, vigas de madera a escala y briquetas de asfalto, para determinar sus deformaciones unitarias y desplazamientos. Tomando en cuenta las diferentes variables de luz, velocidad de ensayo, técnicas de pintura, capacidad y calidad de grabación. Los resultados muestran un margen de error que oscila entre el 5% y 45% al compararlos con los métodos tradicionales de medición.</p> <p>Otras universidades han desarrollado, con éxito, aplicativos con técnicas similares que reducen el costo de las mediciones que se realizan a distintos ensayos mecánicos, con el uso de mediciones en base al procesamiento de imágenes.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR:</b>	Teléfono: +593-4-504-4625	E-mail: bryan.calderon01@cu.ucsg.edu.ec	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	Nombre: Clara Glas Cevallos		
	Teléfono: +593-4 -2206956		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			