

CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES PARA EL ANÁLISIS DE MATERIALES

Curso:

Tecnologías Digitales Avanzadas: Aplicación en la Ingeniería Civil



VNIVERSIDAD D SALAMANCA

Escuela **Politécnica Superior**
de Ávila

Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno

Jorge López Rebollo



I - INTRODUCCIÓN

- Definición
- Aplicación
- Configuraciones

II – DIC VS MÉTODOS CONVENCIONALES

- Comparativa
- Ventajas

III – FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

- Captura de imágenes
- Registro de imagen

IV – EQUIPAMIENTO TÉCNICO Y SOFTWARE

- Equipamiento
- Software

V – PROTOTIPO DE INVESTIGACIÓN

- Componentes
- Ensayos de validación

I

INTRODUCCIÓN

¿QUÉ ES LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES?

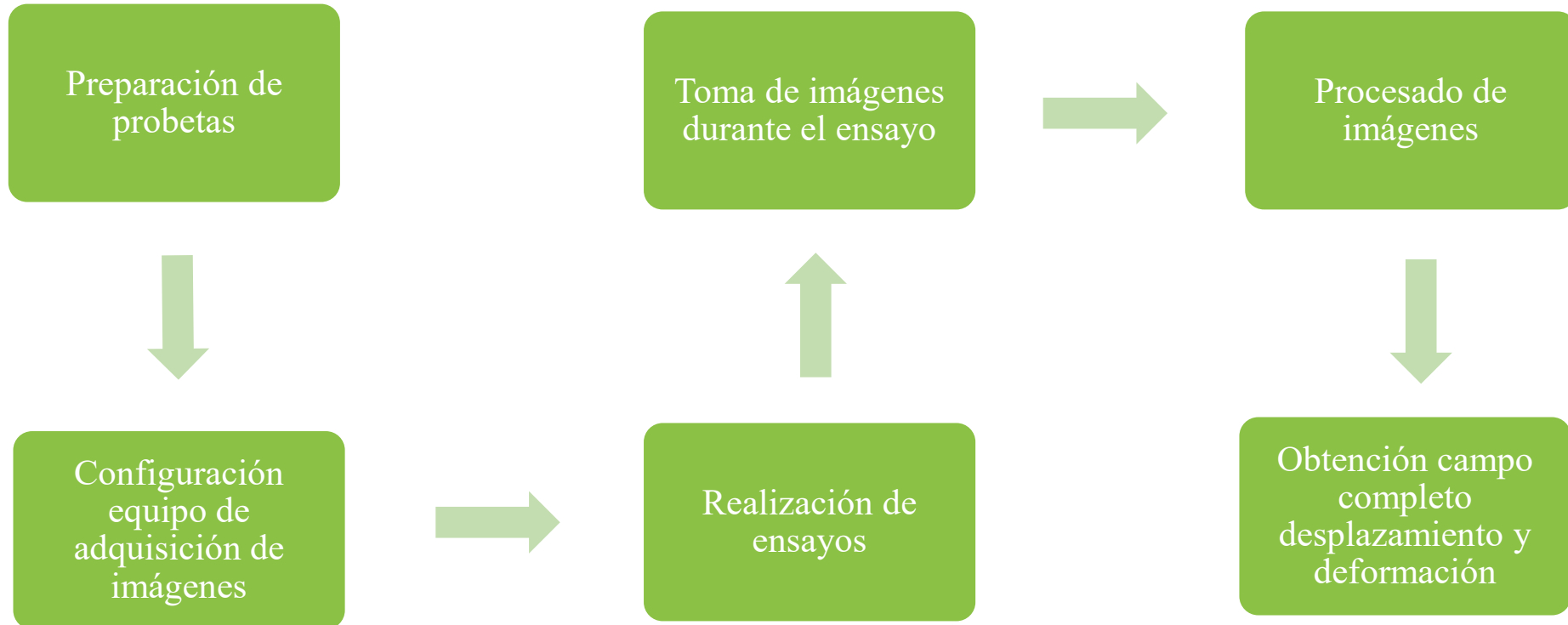
Técnica de medición de desplazamientos y deformaciones

Permite análisis en 2D y 3D

No invasiva, no destructiva y bajo coste

Basada en algoritmos de la fotogrametría y la visión computacional

¿CÓMO SE APLICA LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES?



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS CONVENCIONALES

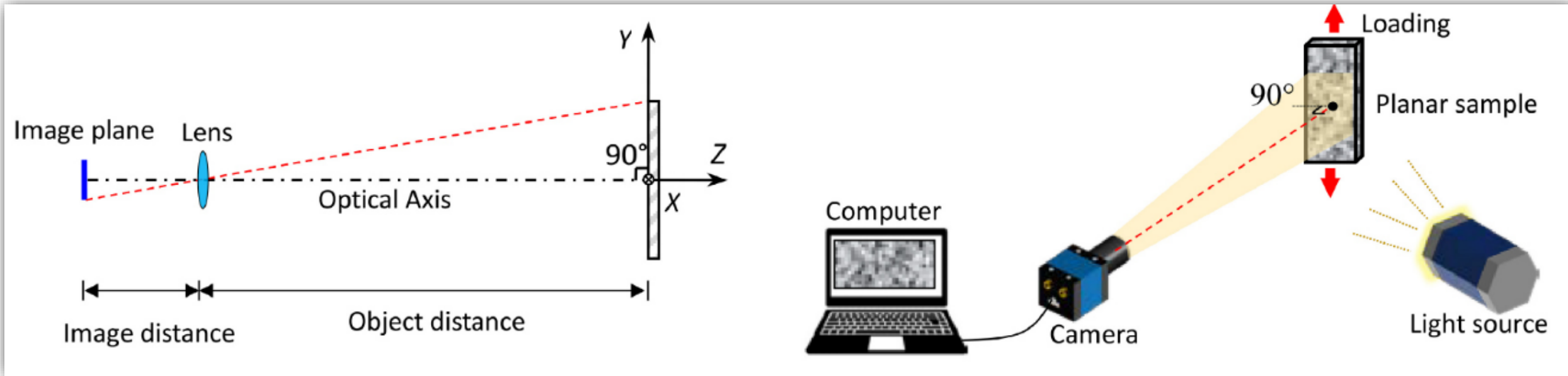
III - FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

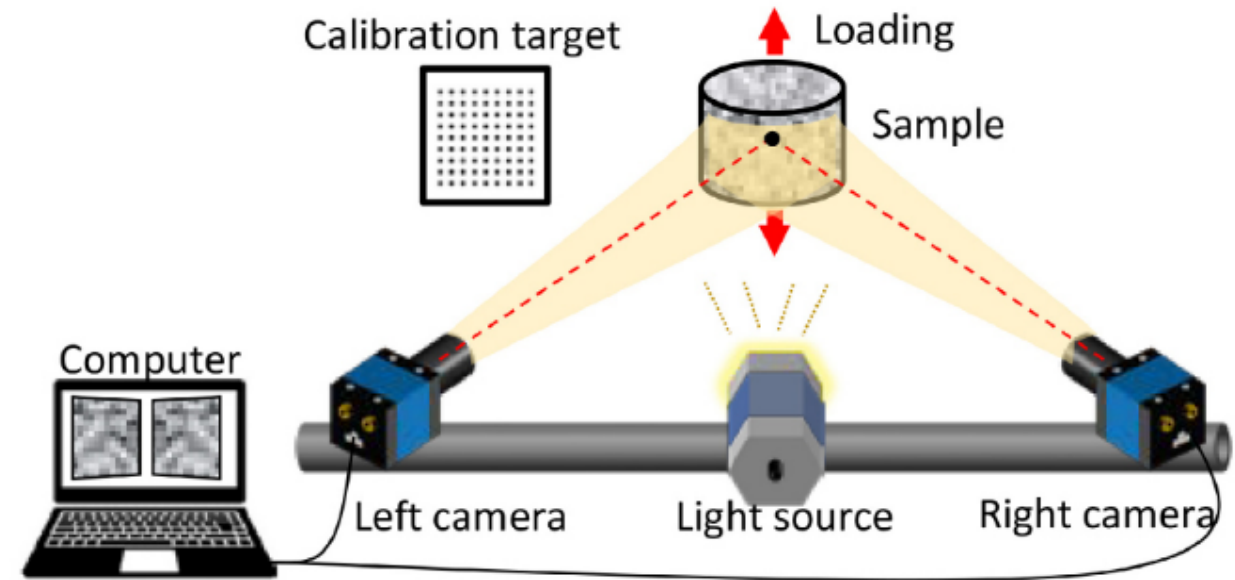
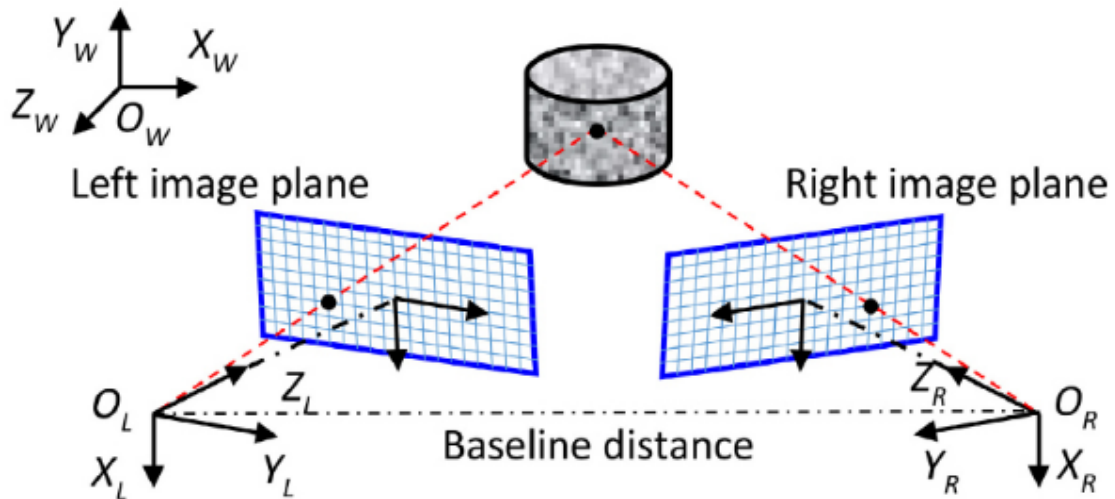
V - PROTOTIPO DE INVESTIGACIÓN

Enfoque		2D-DIC	3D-DIC
Sistema de imagen	Equipamiento	1 cámara	2 o más cámaras
	Posicionamiento	Perpendicular al plano	Ángulo estéreo
Calibración	Interna	Recomendada	Obligatoria
	Externa	No	Obligatoria
Imágenes	Adquisición	Individuales	Pares sincronizados
	Correlación	2D	2D + reconstrucción
Desplazamientos y deformaciones	Dimensiones	X, Y	X, Y, Z

CONFIGURACIÓN **BIDIMENSIONAL**



CONFIGURACIÓN TRIDIMENSIONAL



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



VENTAJAS

- Consolidado y fácil de aplicar en 2D.
- Bajo coste.
- Muy útil para materiales heterogéneos.
- Gran cantidad de datos para análisis estocásticos posteriores.

LIMITACIONES

- Mayor complejidad y menor precisión 3D.
- Limitación de las formas a analizar.
- Software y equipos comerciales muy costosos.

II

DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

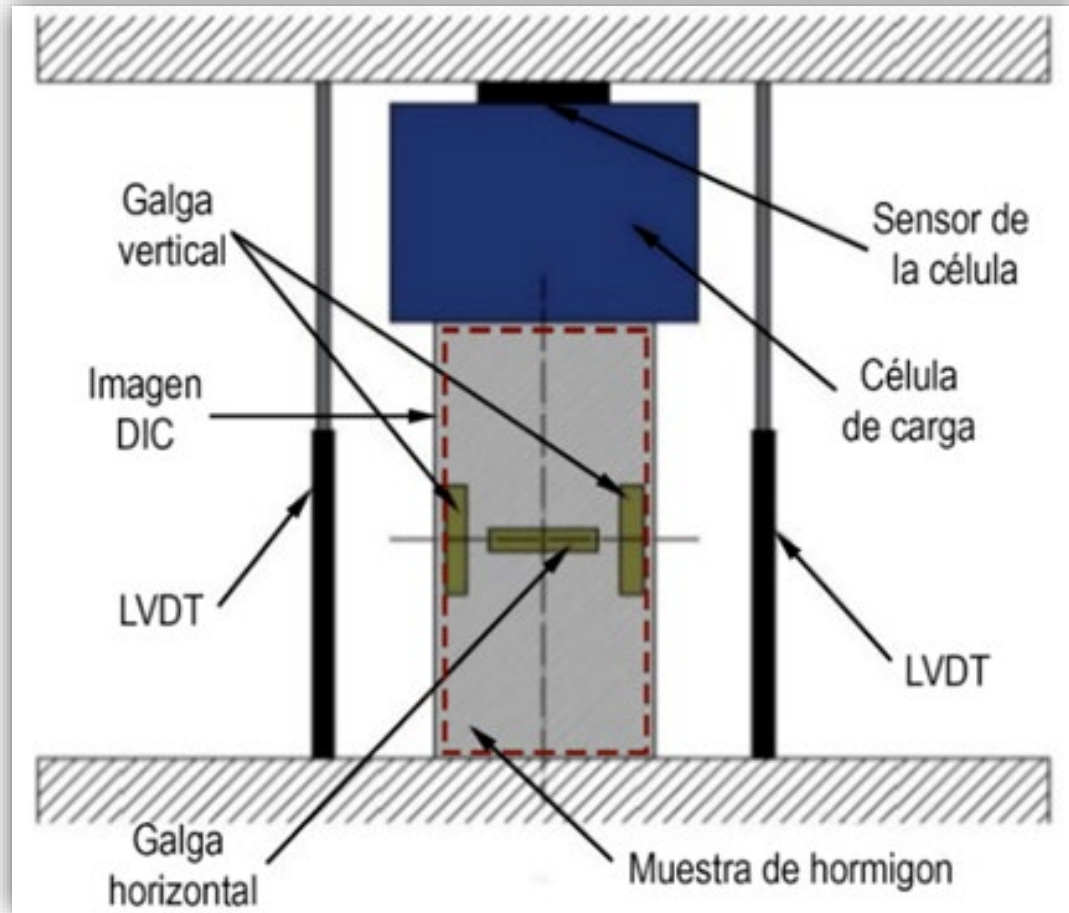
I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE INVESTIGACIÓN



MÉTODOS CONVENCIONALES

NUEVAS TÉCNICAS

Extensómetro

LVDT

Galga extensiométrica

Interferometría de Moiré

Fotoelasticidad

Velocimetría

Correlación digital de imágenes

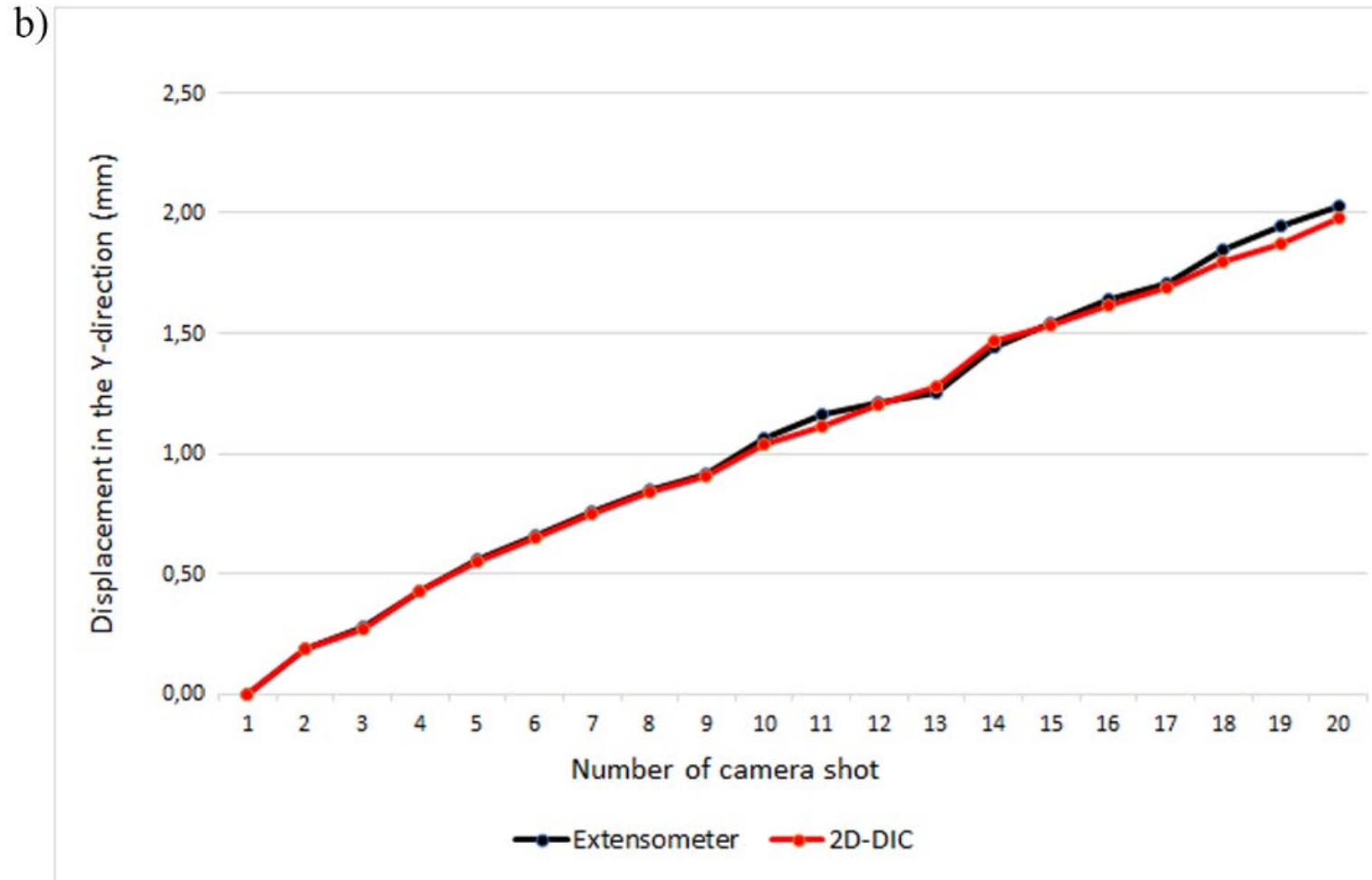
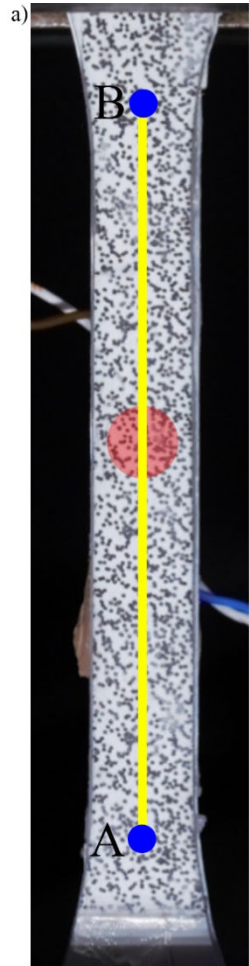
I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



RMSE
2.97 %

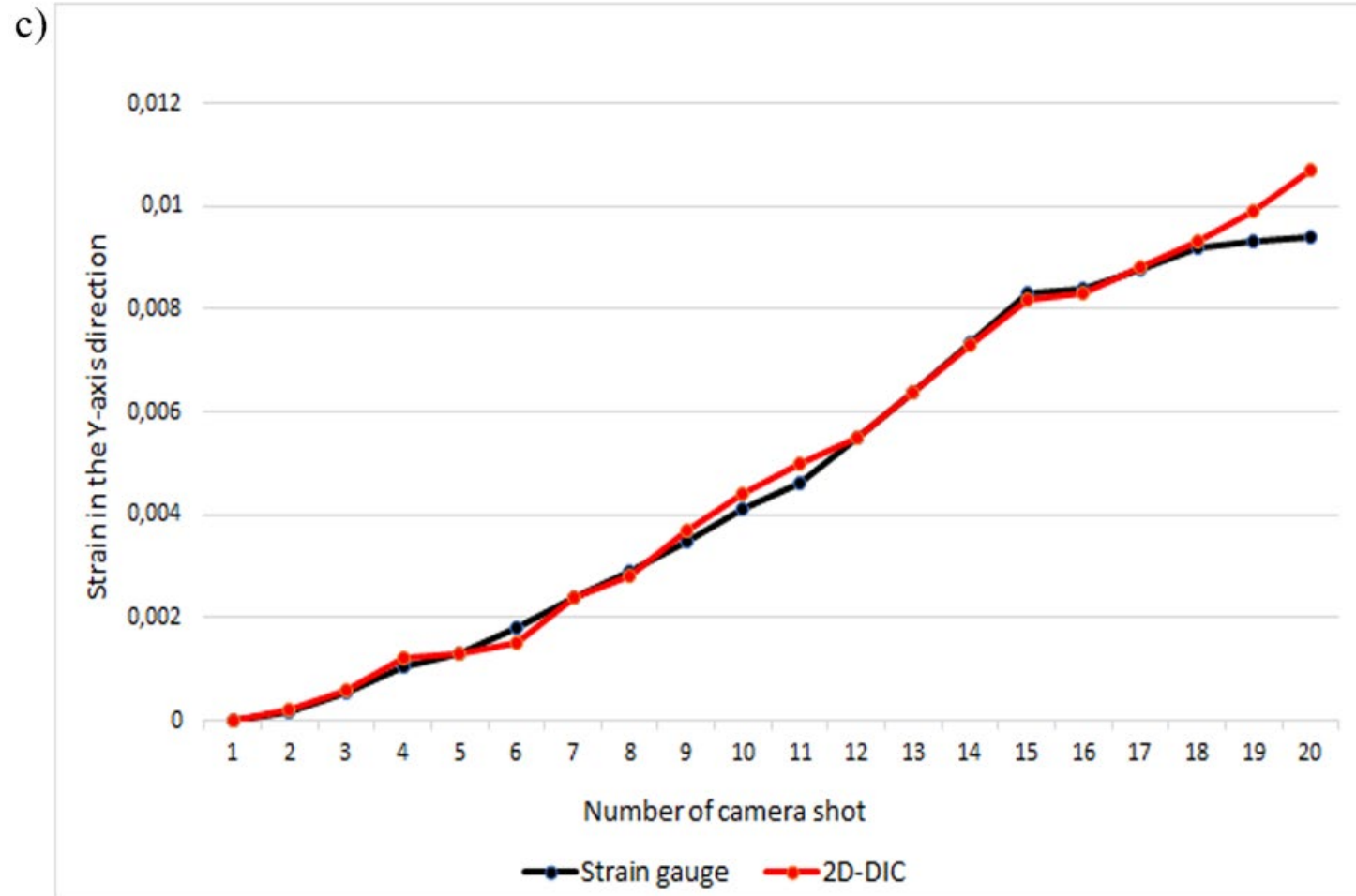
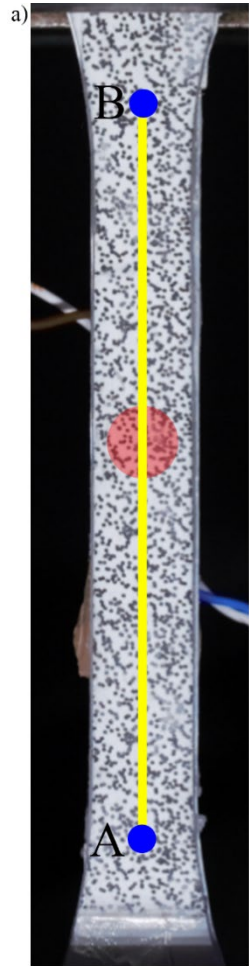
I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



RMSE
0.04 %

VENTAJAS **SOBRE MÉTODOS CONVENCIONALES**



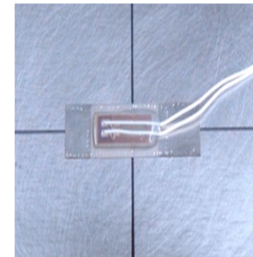
La técnica no requiere de gran complejidad en cuanto a medios técnicos o requerimientos informáticos



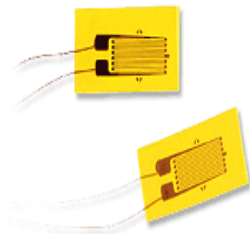
El proceso experimental puede llevarse a cabo en exteriores o interiores con luz artificial



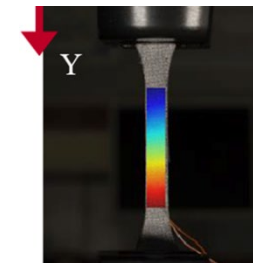
Bajo coste económico frente a sistemas más complejos y costosos



Técnica no invasiva y no destructiva que no requiere contacto directo con el material



Continua toma de datos, al no requerir contacto, evitando pérdidas por desprendimiento o rotura



Permite la obtención de campo completo de desplazamientos y deformaciones

III

FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

- **Alto contraste:** gradientes de intensidad elevados.
- **Aleatoriedad:** patrón no periódico y no repetitivo.
- **Isotropía:** no hay una direccionalidad obvia en el patrón.
- **Estabilidad:** patrón adherido firmemente a la superficie.
- **Speckles circulares:** evitar características locales y direcciones preferenciales.
- **Mismo diámetro:** simplifica el estudio de optimización del tamaño.
- **No contacto entre speckles:** mayor transiciones de blanco a negro.

Mean Intensity Gradient

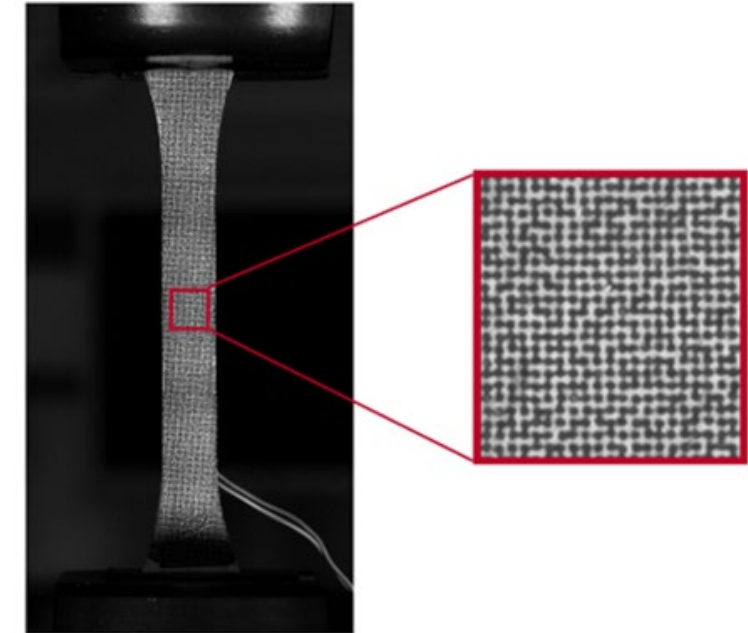
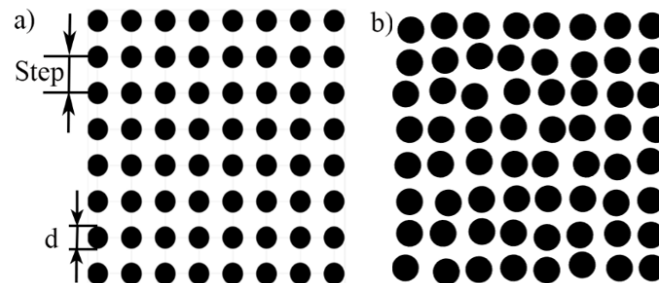
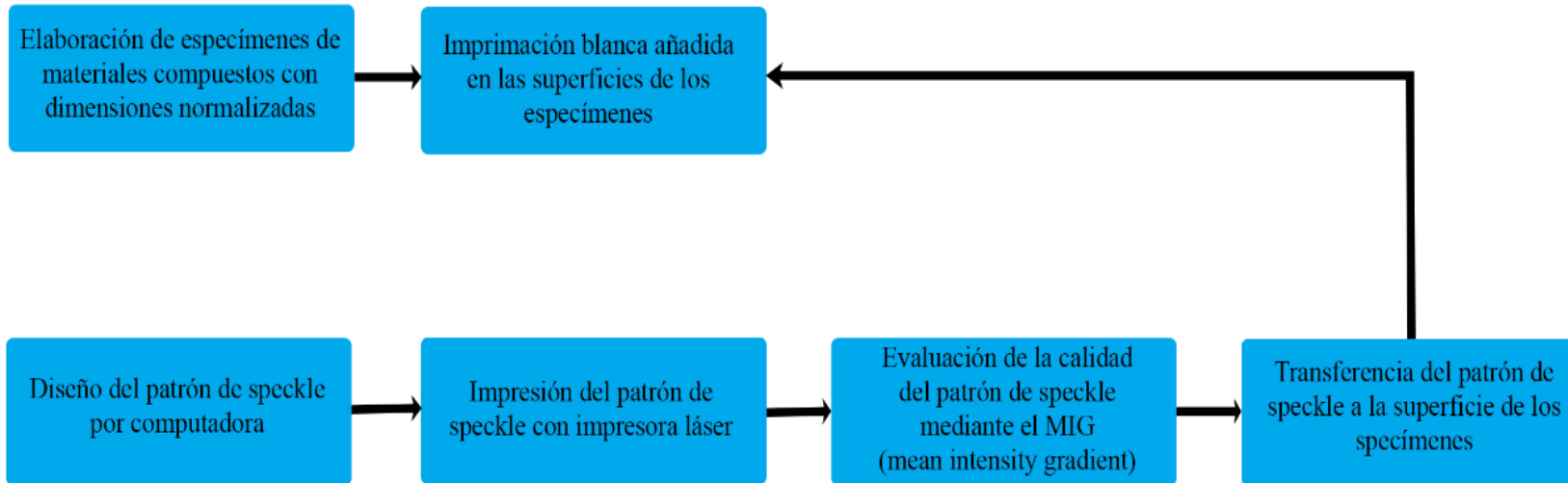
$$MIG = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H \frac{|\nabla f(x_{ij})|}{W * H}$$

$|\nabla f(x_{ij})|$ → Vector local de intensidad
gradiente de una imagen de escala de grises.

W → Anchura de la región de interés (ROI).

H → Altura de la ROI.

PATRÓN DE SPECKLE DISEÑADO MEDIANTE COMPUTADORA



PATRÓN DE SPECKLE **APLICADO MEDIANTE AEROSOL**



1. Aplicación de una pintura blanca a la superficie del espécimen.
2. Sobre la superficie blanca se aplica un aerosol de pintura negra.



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

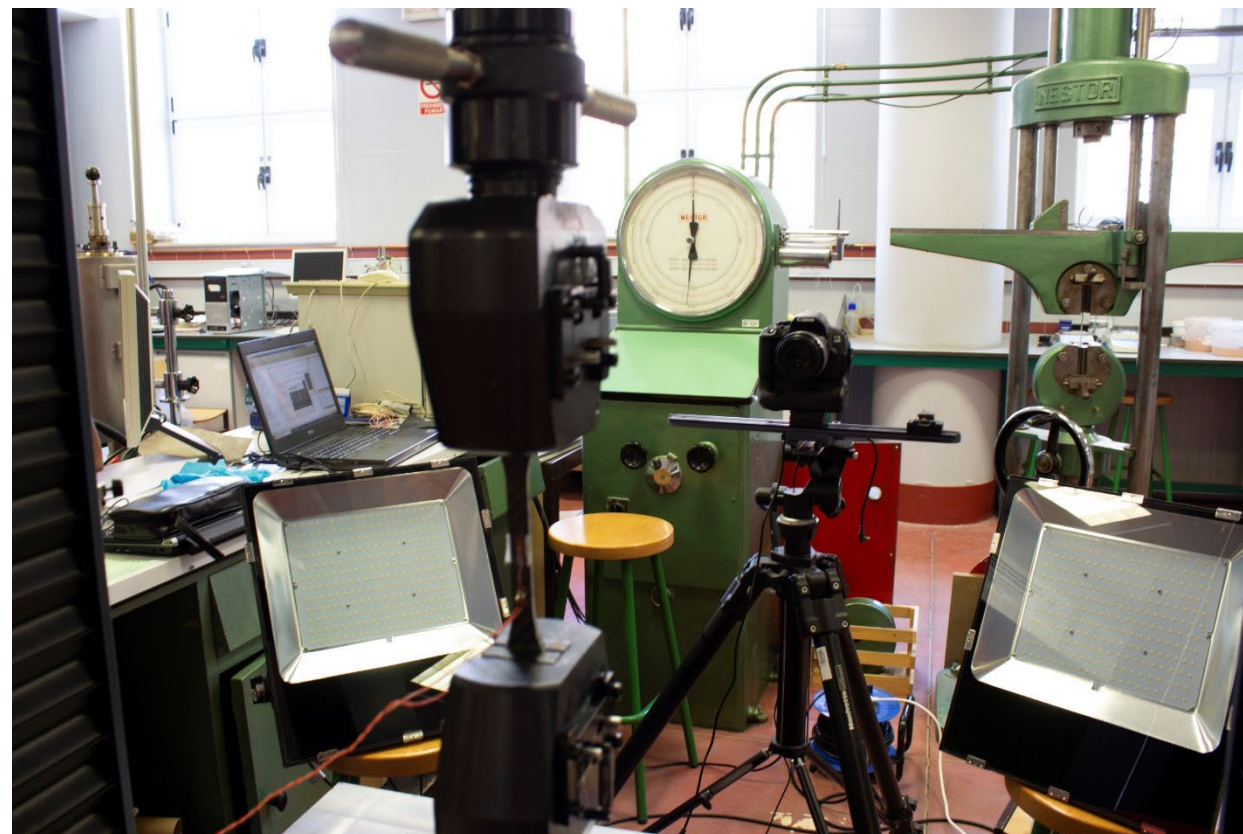
IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

- i. Cámara Digital*
- ii. Controlador Lógico Programable (PLC)*
- iii. Unidad de iluminación LED*

DIC 2D → 1 Cámara

DIC 3D → 2 o más Cámaras



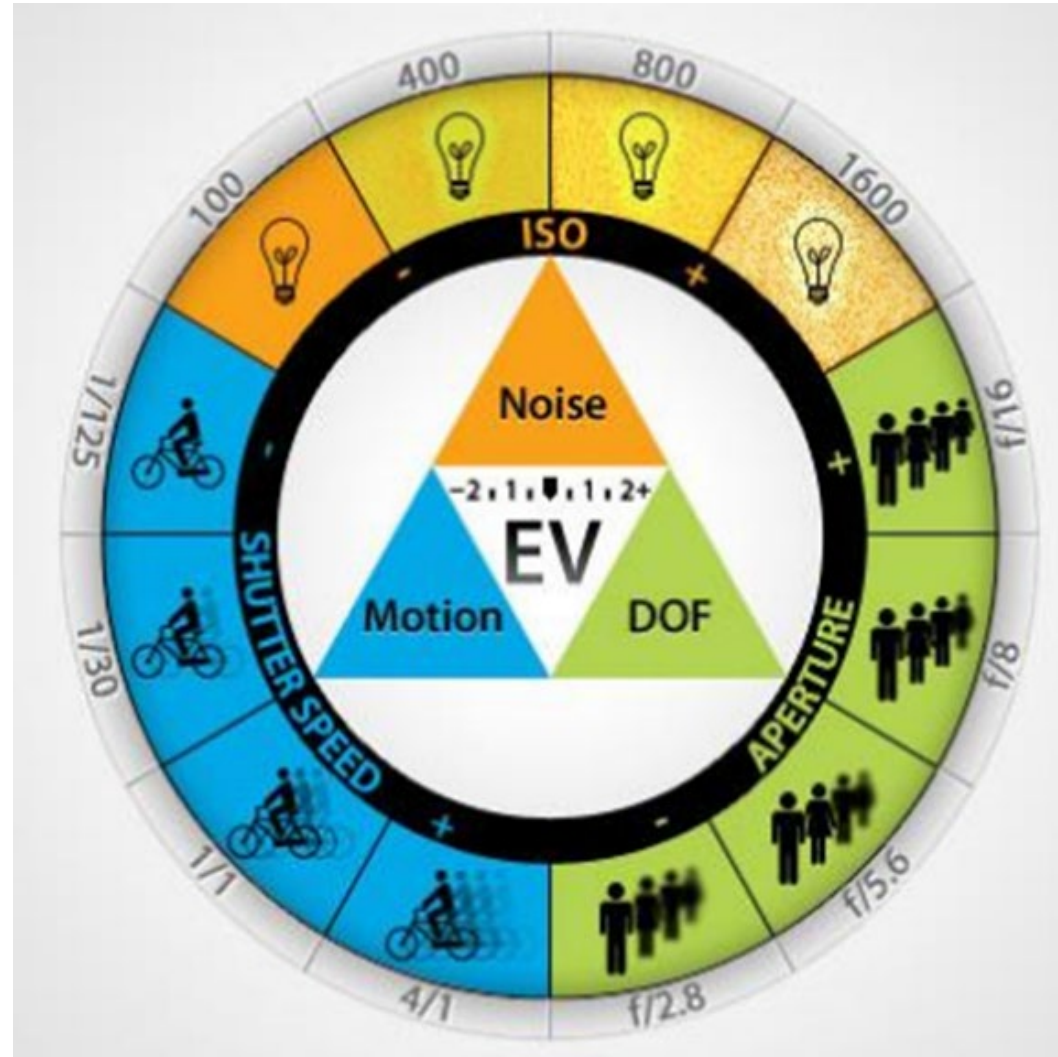
I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



DIC 2D → Calibración intrínseca (opcional)

i. Punto central (C_x, C_y)

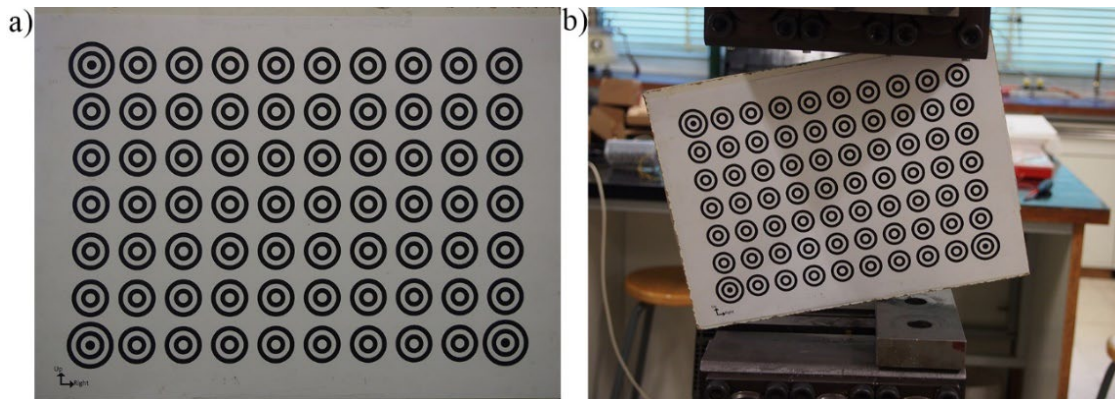
ii. Longitud focal (F_x, F_y)

iii. Distorsión radial (k_1, k_2, k_3)

iv. Distorsión tangencial (p_1, p_2)

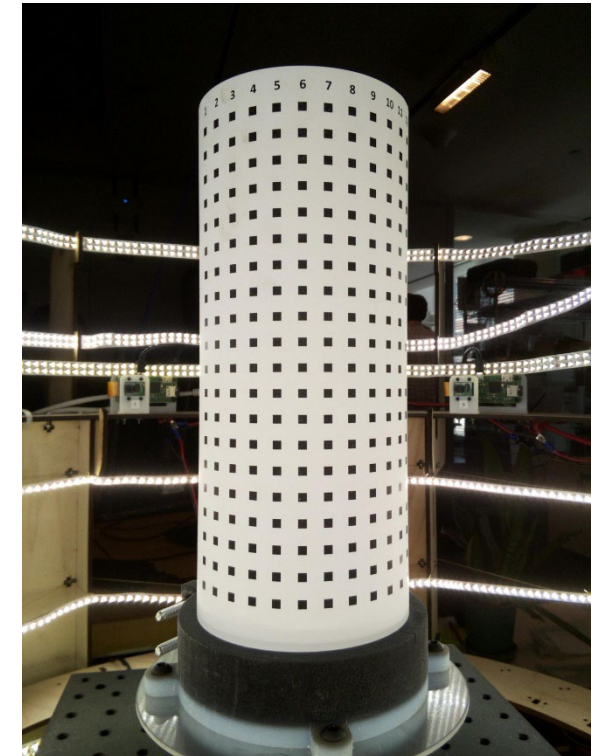
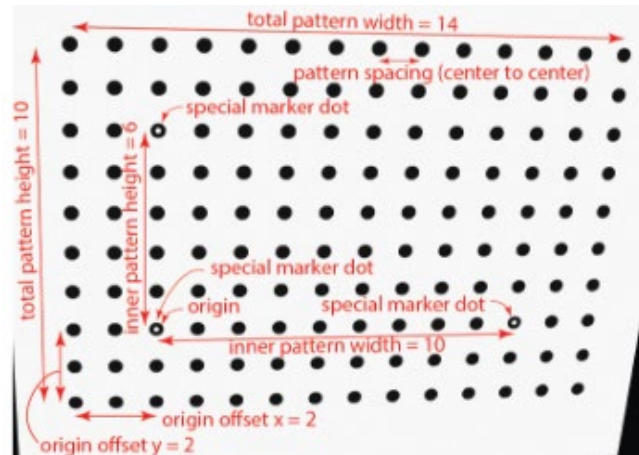
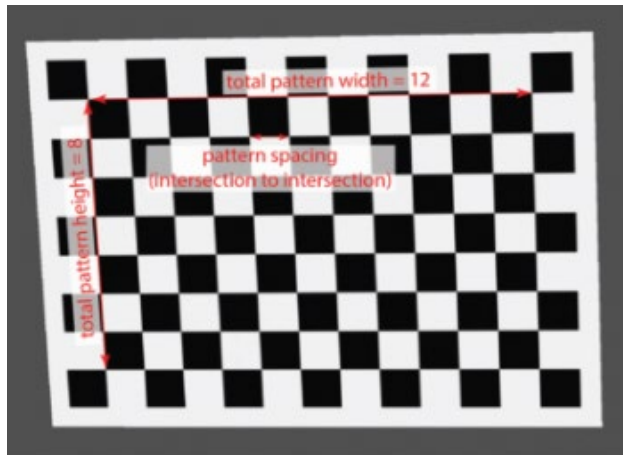
$$\begin{aligned}x_{\text{corrected}} &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) & x_{\text{corrected}} &= x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\y_{\text{corrected}} &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) & y_{\text{corrected}} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy]\end{aligned}$$

- 1) Detección de los puntos de control mediante el uso del método de detección de ejes y ajuste de elipses.
- 2) Optimización de los parámetros intrínsecos de la cámara y coordenadas globales de los puntos de control.
- 3) Extracción de las imágenes frontales y uso de las posiciones calculadas de los puntos de control como una aproximación inicial con el fin de refinar las posiciones.
- 4) Proyección inversa de los puntos de control detectados en las imágenes frontales de nuevo a las imágenes sin procesar.
- 5) Refinamiento de los parámetros de la cámara junto con las coordenadas globales de los puntos de control.



DIC 3D → Calibración intrínseca + extrínseca

- i. *Parámetros intrínsecos de cada cámara*
- ii. *Orientación relativa de las cámaras*

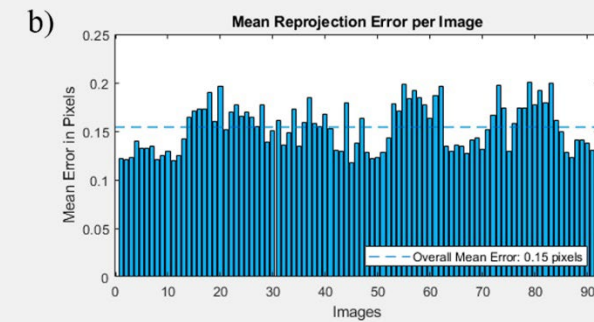
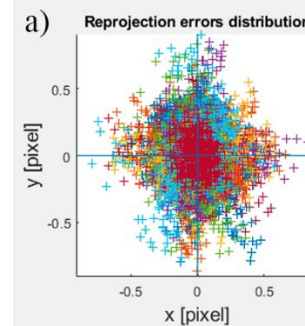
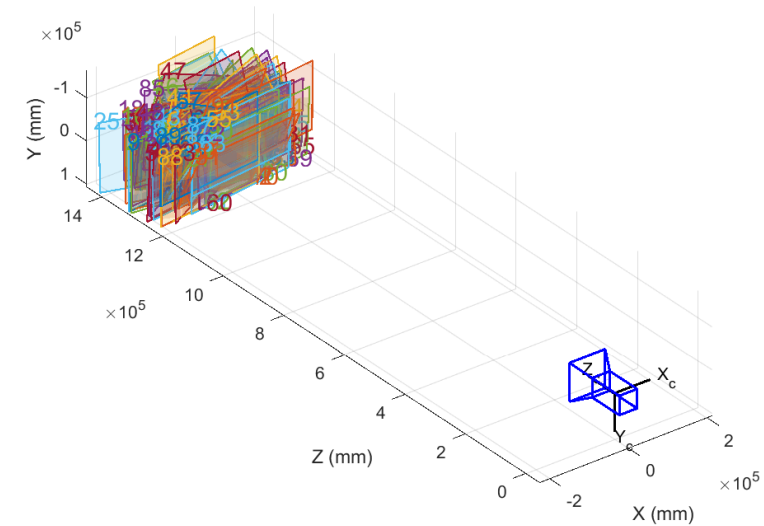
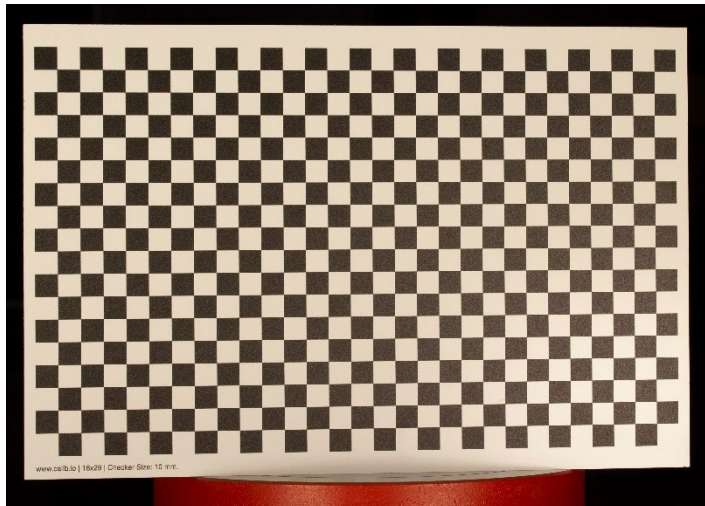


❖ Calibración

Algoritmo: Ajuste de Haces (BA).

Determina parámetros intrínsecos y distorsión de lente.

- Objetivo “Tablero de ajedrez”.
- 100 imágenes (aprox.) en diferentes posiciones.



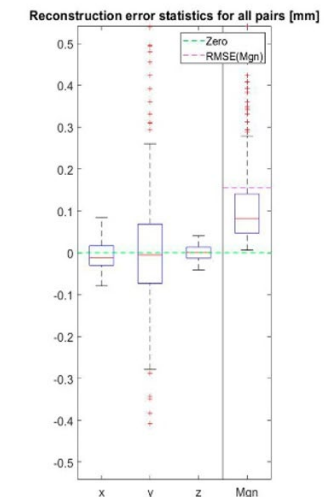
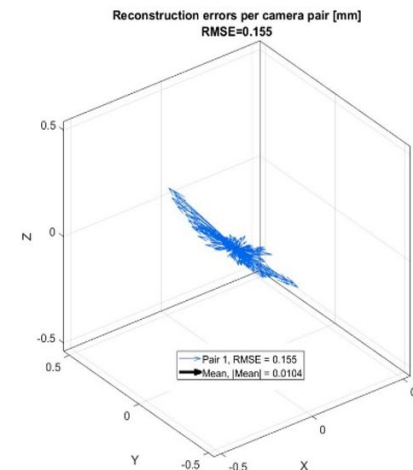
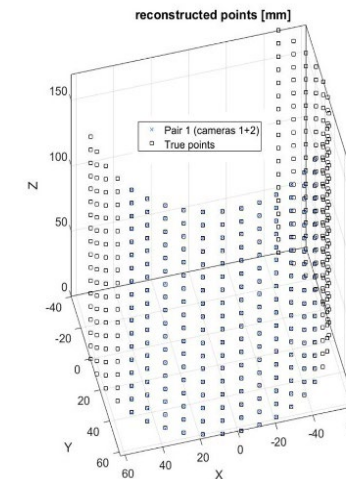
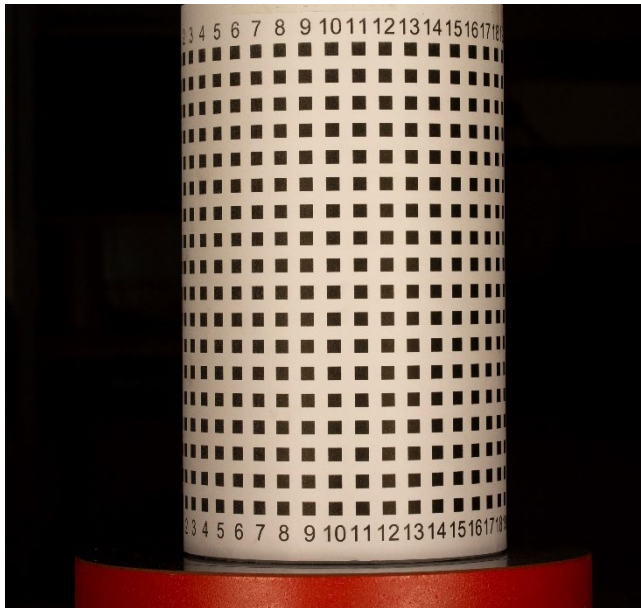
❖ Orientación externa

Algoritmo: Direct Linear Transformation (DLT).

Determina parámetros geométricos internos y externos.

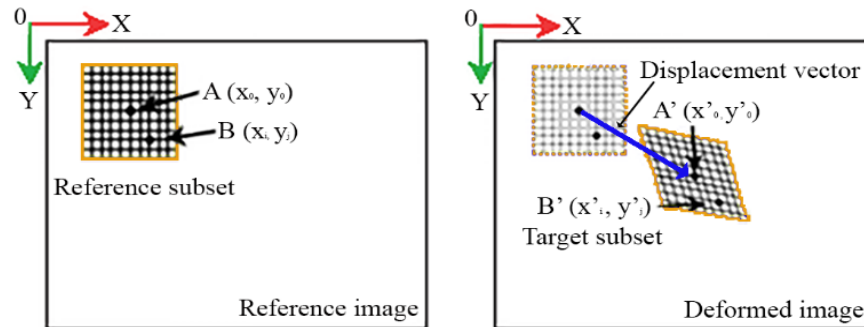
Permite reconstrucción 3D.

- Objetivo de calibración cilíndrico.
- Detección de puntos 3D.



- i. Región de Interés (ROI)*
- ii. Tamaño del subconjunto (Subset)*
- iii. Espaciado de la malla (Step)*

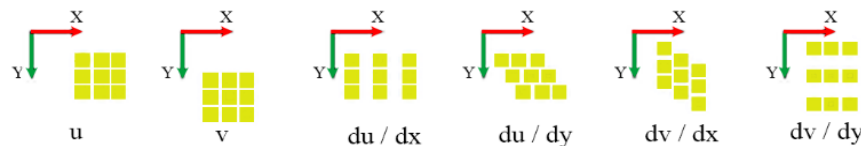
Búsqueda del coeficiente de correlación "extremum"



Criterio de correlación

+

Función de forma



Criterio de correlación

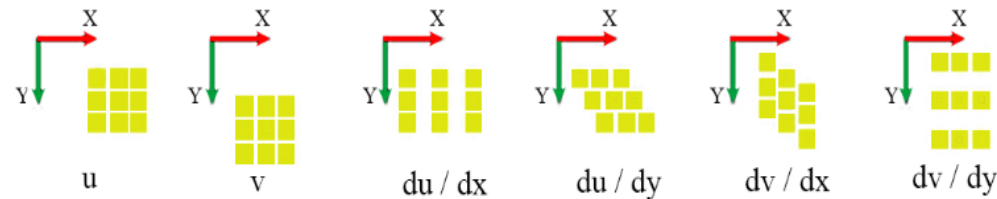
Cuantifica el grado de similitud (o diferencia) entre el subconjunto de referencia y deformado

Función	criterio CC	criterio SSD	criterio PSSD
Sensible a todos los cambios de la intensidad del subconjunto deformado	$C_{CC} = \sum f_i g_i$	$C_{SSD} = \sum (f_i - g_i)^2$	-
Insensible a los cambios de desplazamiento de la intensidad del subconjunto deformado	$C_{ZCC} = \sum (\bar{f}_i \bar{g}_i)$	$C_{ZSSD} = \sum [\bar{f}_i - \bar{g}_i]^2$	$C_{PSSDb} = \sum (f_i + b - g_i)^2$
Insensible a los cambios de escala de la intensidad del subconjunto deformado	$C_{NCC} = \frac{\sum f_i g_i}{\sqrt{\sum f_i^2 \sum g_i^2}}$	$C_{NSSD} = \sum \left(\frac{f_i}{\sqrt{\sum f_i^2}} - \frac{g_i}{\sqrt{\sum g_i^2}} \right)^2$	$C_{PSSDa} = \sum (a f_i - g_i)^2$
Insensible a los cambios de escala y desplazamiento de la intensidad del subconjunto deformado	$C_{ZNCC} = \frac{\sum \bar{f}_i \bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2 \sum \bar{g}_i^2}}$	$C_{ZNSSD} = \sum \left(\frac{\bar{f}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2}} - \frac{\bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{g}_i^2}} \right)^2 = 2(1 - C_{ZNCC})$	$C_{PSSDab} = \sum (A f_i + b - g_i)^2 = \sum \bar{g}_i^2 (1 - C_{ZNCC}^2)$

Función de forma

El subconjunto de la imagen de referencia puede ser deformado en base a este tipo de funciones

Definidas de acuerdo a los grados de libertad



- u y $v \rightarrow$ Traducción del subconjunto en las direcciones x e y .
- du/dx y $dv/dy \rightarrow$ Elongación del subconjunto en las direcciones x e y .
- du/dy y $dv/dx \rightarrow$ Deformación cortante del subconjunto en las direcciones x e y .

Algoritmos de registro de subpíxeles y métodos de interpolación de intensidad

Newton-Raphson

- Muy preciso y estable
- Alto costo computacional

IC-GN (Inverse-Compositional Gauss-Newton)

- Eficiente
- Rápido
- Robusto
- Preciso

Permite optimizar la función de forma y establecer la posición del subconjunto deformado con precisión subpixel

Basados en optimizaciones iterativas locales

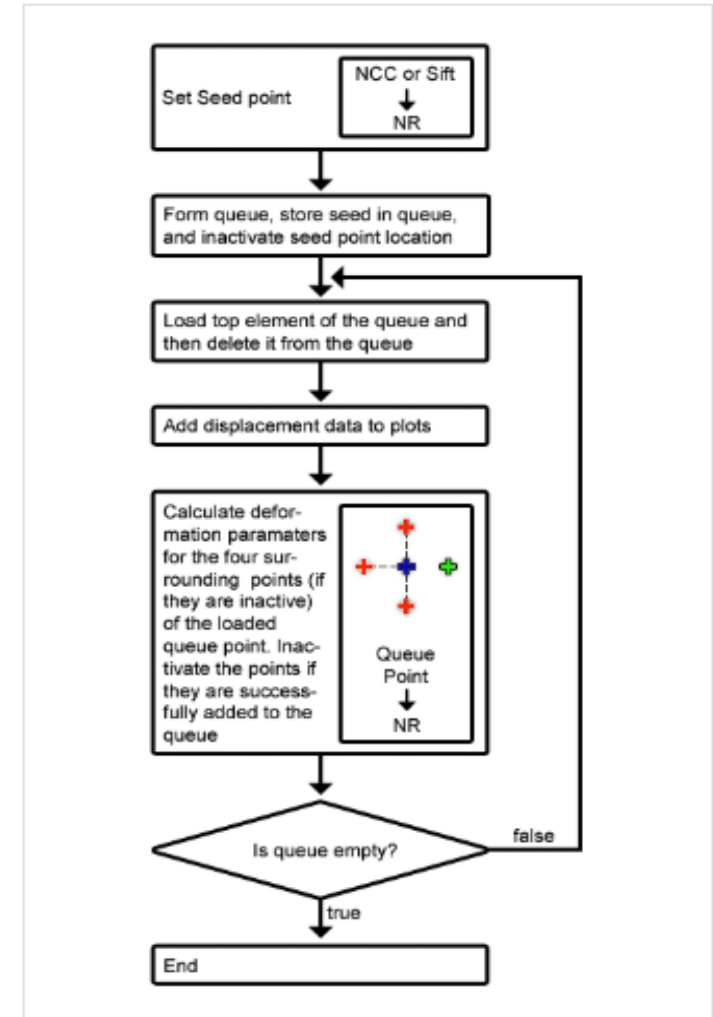
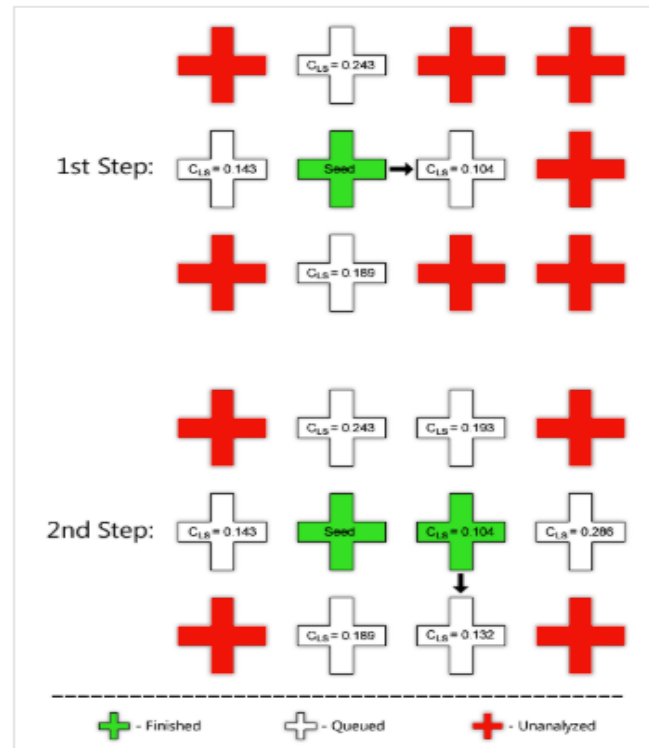


Estimación inicial

Campos de desplazamiento

RG-DIC (Reliability-guided Digital Image Correlation)

Robusto → Datos erróneos procesados en último lugar
Eficiente → Únicamente la estimación inicial es costosa



Subconjuntos de deformación

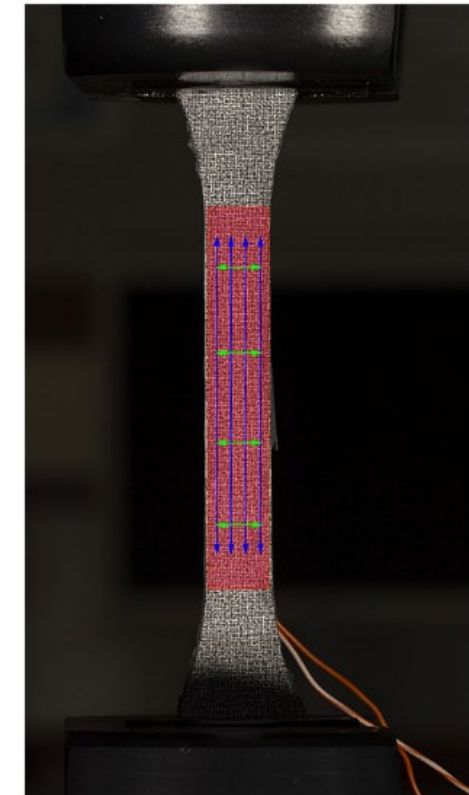
- Gradientes de desplazamiento obtenido a partir de un plano de mínimos cuadrados.
- Proceso de convolución para calcular el plano de mínimos cuadrados ajustado.
- Subconjuntos muy pequeños → Ruido.
- Subconjuntos muy grandes → Error en la aproximación por irregularidades.

Campo completo
de deformación

Extensómetros virtuales

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Valores de
deformación
puntuales



- Region Of Interest (ROI)
- Vertical virtual extensometer
- Horizontal virtual extensometer

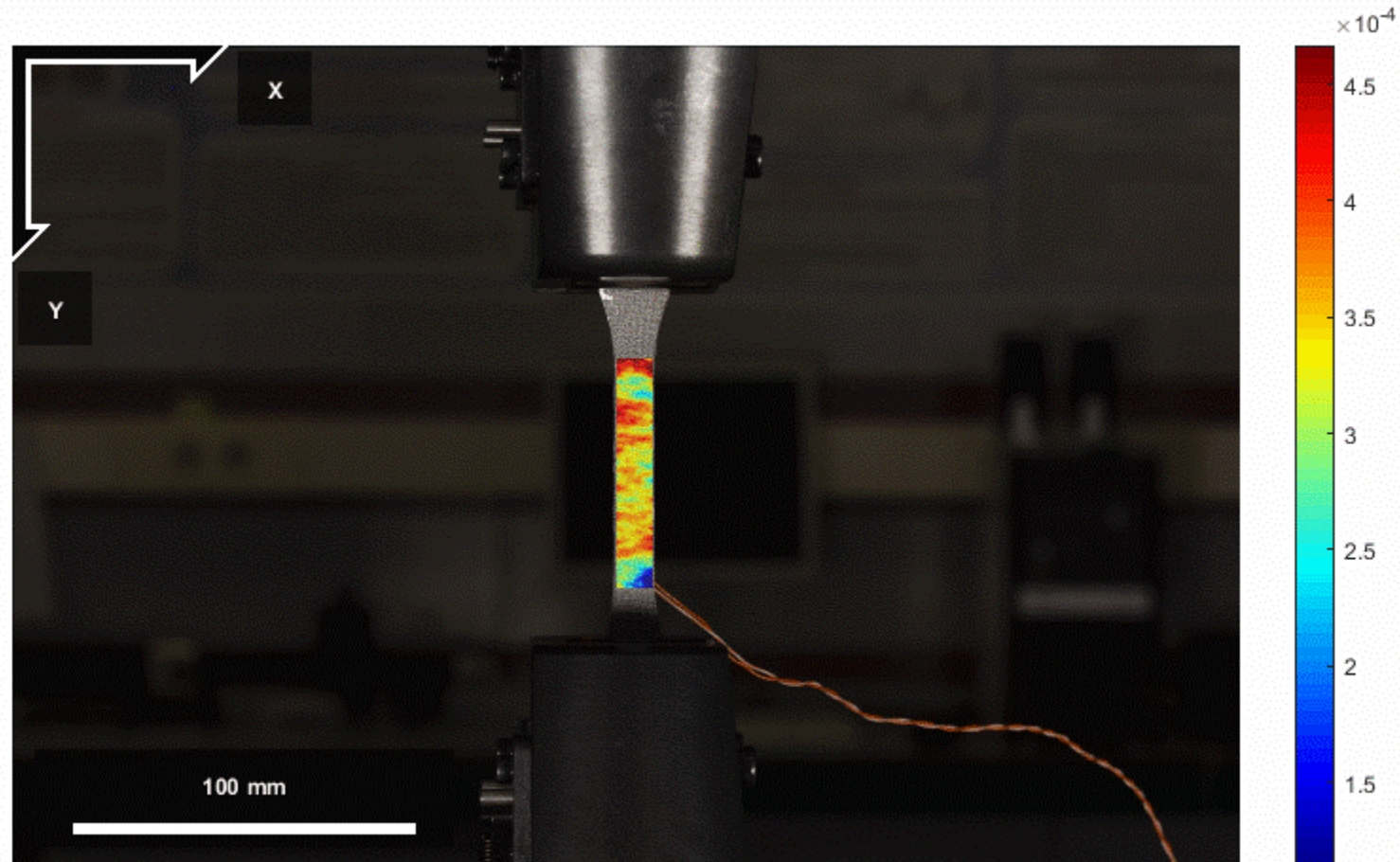
I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

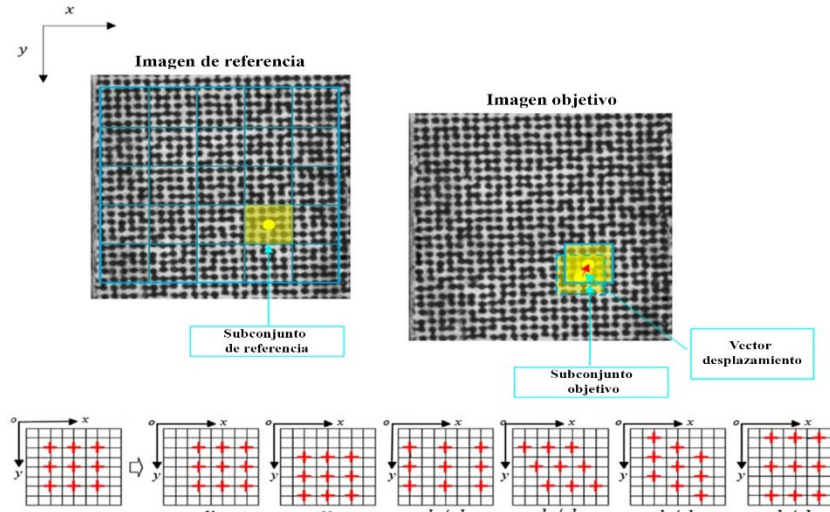
IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



❖ Algoritmos DIC

- Definición Región de Interés (ROI).
- División de la ROI en subconjuntos.
- Criterio de correlación Zero mean Normalized Cross-Correlation (ZNCC).

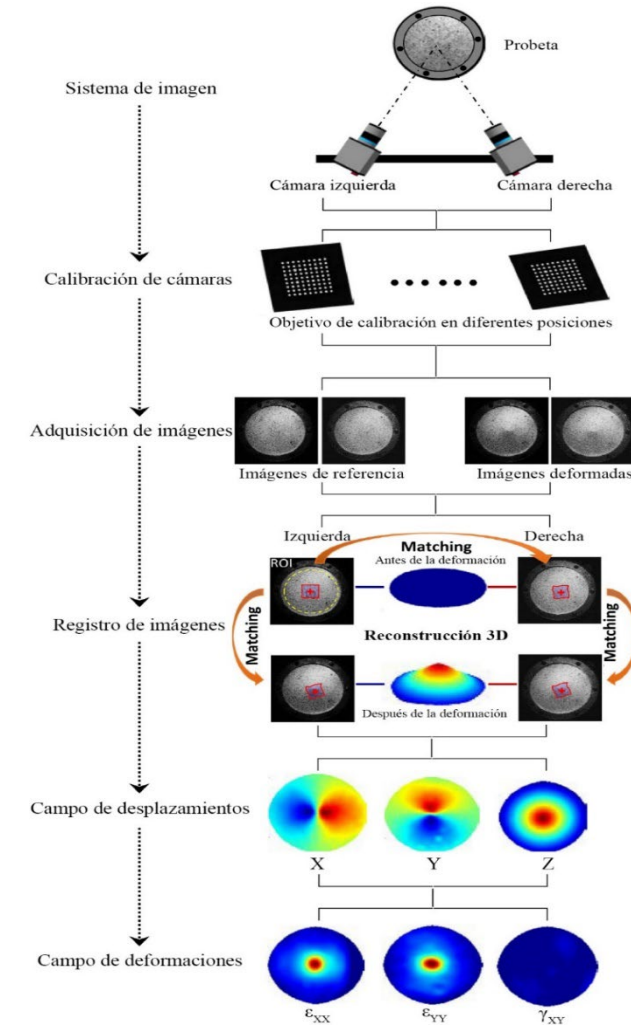


❖ Reconstrucción 3D

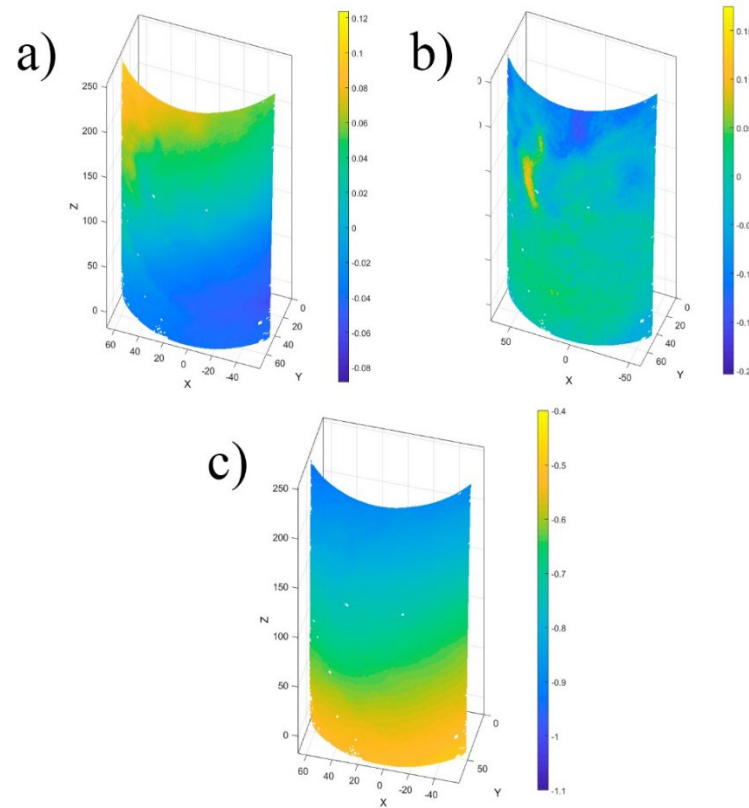
Algoritmo: Direct Linear Transformation (DLT).

Nube de puntos X, Y, Z de los subconjuntos registrados mediante DIC.

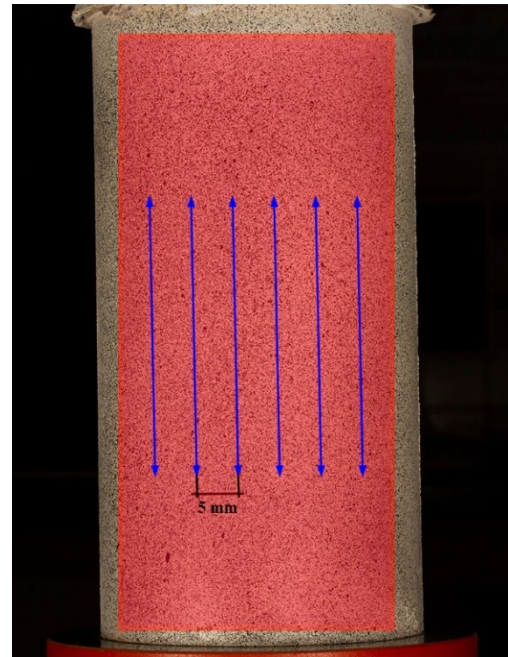
Empleo de coordenadas 3D para cálculo de desplazamientos.



(i) Cálculo desplazamientos

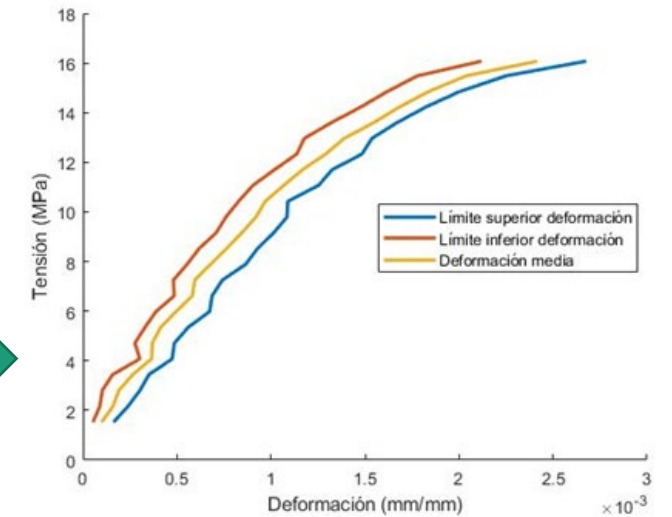


(ii) Extensómetros virtuales



Region Of Interest (ROI)
Extensómetro virtual vertical

(iii) Curvas tensión-deformación



III

**EQUIPAMIENTO TÉCNICO
Y SOFTWARE**

I - INTRODUCCIÓN

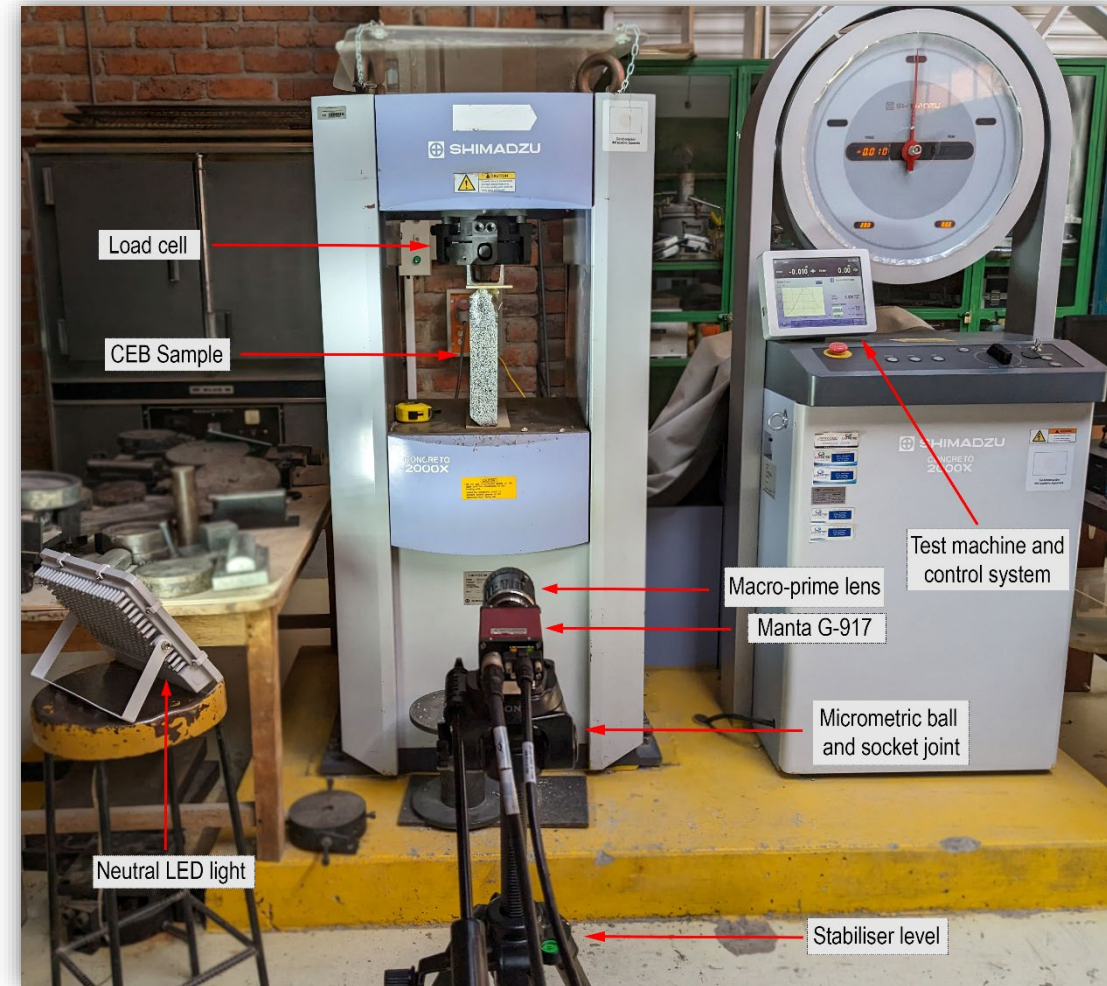
II - DIC VS MÉTODOS CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE INVESTIGACIÓN

Nombre	Descripción breve	Características técnicas
Cámaras digitales	Cámara fotográfica	Cámara de lente única Alta resolución Posibilidad de capturar imágenes en formato RAW Conexión USB/ETHERNET
Objetivo macro	Objetivo macro para DIC	Lente fija (preferiblemente) o zoom Longitud focal 50-60 mm
Trípode	Trípode adecuado para cabeza de trípode estándar	Nivel de burbuja
Cabeza de trípode	Trípode de cámara para fotografía	Nivel de burbuja Rotación en los tres ejes
Dispositivo de iluminación	Foco LED	Potencia 50 W 220-240V AC Luminosidad: 4000 lm
Controlador	Miniordenador para controlar los disparos de las cámaras	Arduino Raspberry Puerto USB y HDMI
Adquisidor datos	Conexión de sensores (presostato, célula de carga) Conexión de los trigger de las cámaras	4 entradas y salidas digitales 2 entradas y salidas analógicas Alimentación: 10-30 VDC
Ordenador personal	Ordenador personal de media-alta gama para procesar las imágenes capturadas	Al menos 16 GB de memoria RAM CPU multinúcleo de alta velocidad (3Ghz+)



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

Modelo	Canon EOS 700 D	Canon EOS 5D Mark II	Phantom 611 high-speed	Manta G-917B
Sensor	CMOS APS-C	CMOS	CMOS	CCD Mono
Tamaño sensor	22.3 × 14.9 mm ²	36 × 24 mm ²	25.6 x 16 mm ²	12.5 x 10 mm ²
Resolución	5184 × 3456 px	5616 x 3744 px	800 x 800 px	3384 x 2710px
Focal	50 mm	85 mm	50 mm	50 mm
	60 mm 100 mm	105 mm 135 mm		
Frecuencia adquisición	60 fps	25 fps	3900 fps	10 fps



Canon EOS 700D



Manta G-917B

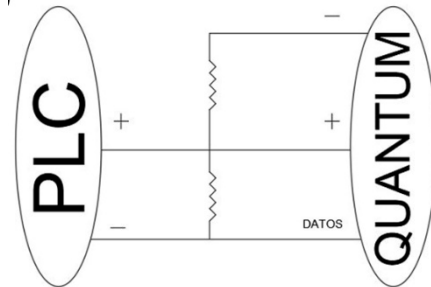
I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

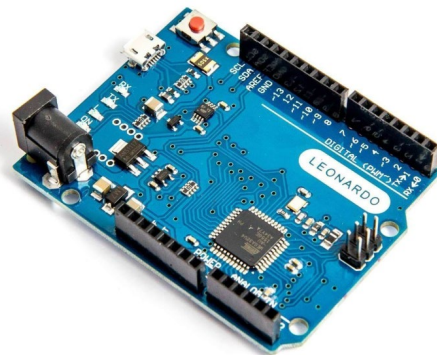
IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



Controlador Lógico Programable (PLC).

Plataforma de adquisición de datos
Quantum.



Placa LEONARDO R3 ATmega32u4

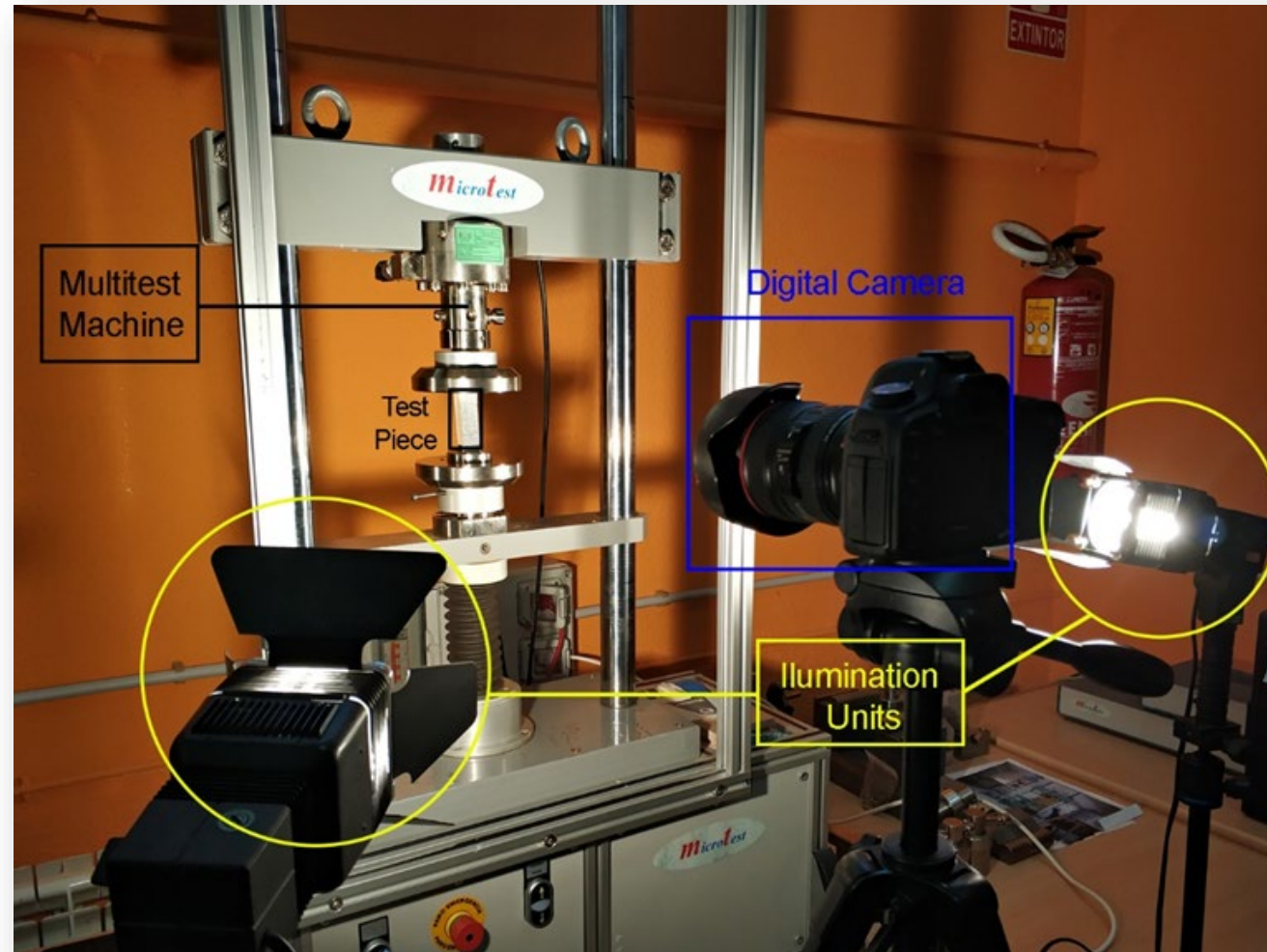
I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

Comercial

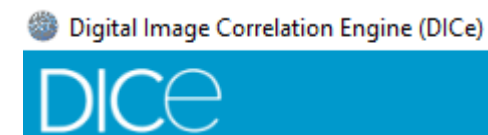
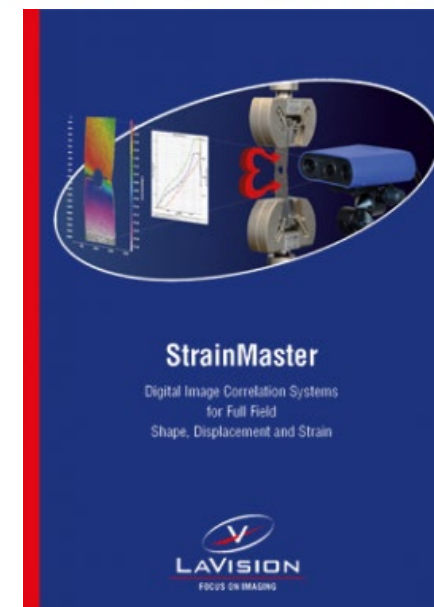
- VIC 2D/3D
- DIC Replay
- GOM Correlate
- MatchID
- Q-400 DIC
- ARAMIS
- StrainMaster

Libre

- Ncorr
- DICE
- MultiDIC



correlated SOLUTIONS



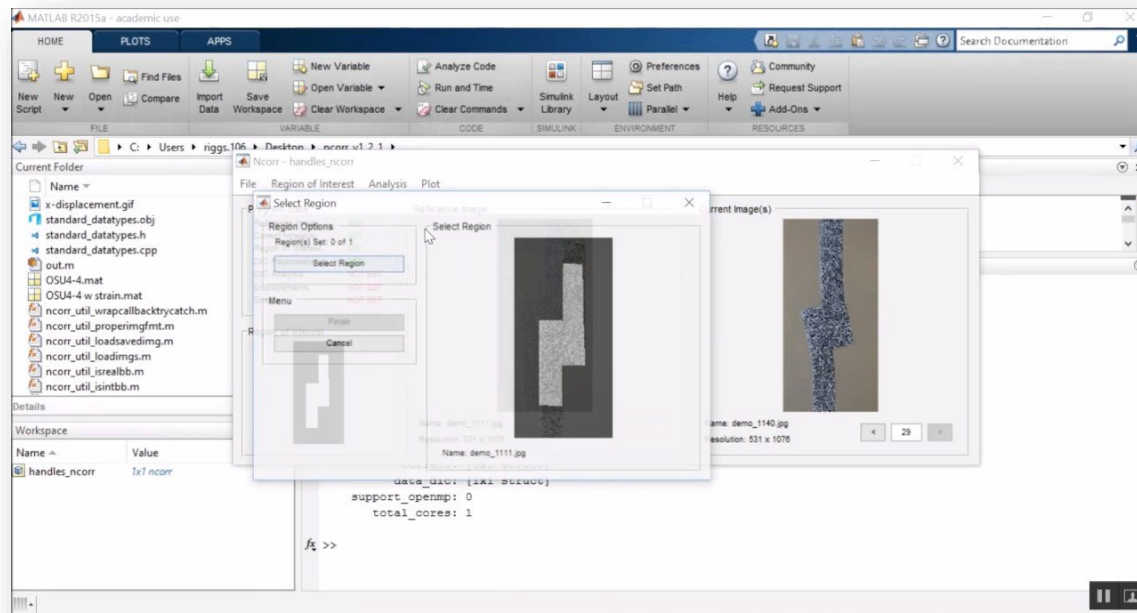
I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



- Programa de MATLAB de código abierto para correlación digital de imágenes en 2D.
- Algoritmos optimizados mediante C++/MEX.
- Interfaz gráfica de usuario accesible e intuitiva.
- Uso sencillo y validado por la comunidad científica.
- Integración de herramientas de postprocesado.
- Tratamiento de imágenes y datos en formato matriz.

III

PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

I - INTRODUCCIÓN

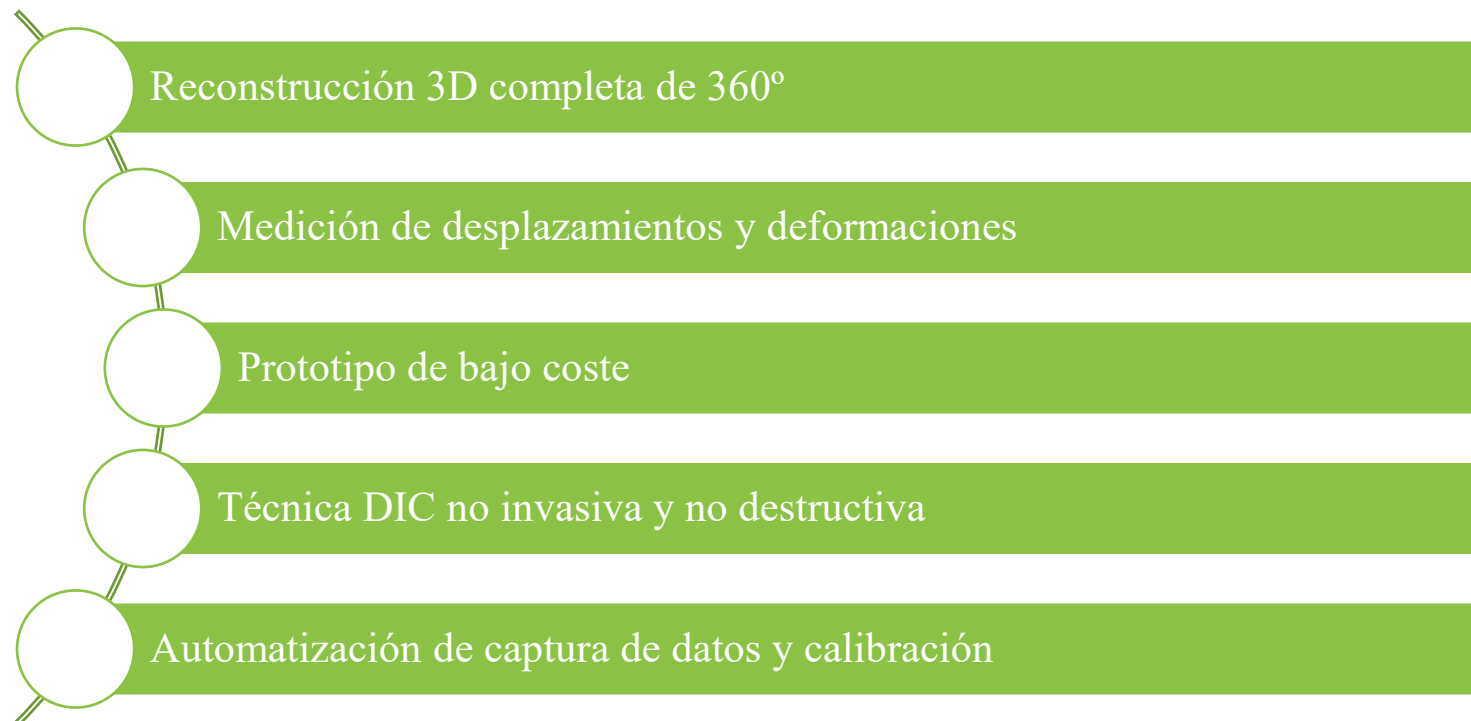
II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

Desarrollar una plataforma para llevar a cabo los procesos de caracterización y análisis de soluciones industriales mediante la reconstrucción completa de los especímenes y la aplicación de la técnica de correlación digital de imágenes de forma semi-automática.



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

- *Perfiles aluminio*
 - *Trípodes nivelación*
 - *Estructura modular*
 - *Diámetro 1,5m*
 - *Soportes ad-hoc mediante impresión aditiva*
- 4 módulos**
3 cámaras por módulo
Ángulo de 30º



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

12 sensores compatibles con tecnología Raspberry Pi

Sincronización y automatización de disparo bajo la misma plataforma

Low cost garantizando precisión y calidad de datos



Raspberry Pi HQ Camera
Sensor IMX477 → 12,3 Mpx.



Lente 16mm



Soporte integrado con Raspberry Pi

I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

Circuitos LED en la estructura modular con conexiones independientes

Fuente de alimentación con salida para cada circuito

Unidades de iluminación más potentes para escenarios complejos



Tira LED 12V
60 led/m



Transformador AC DC



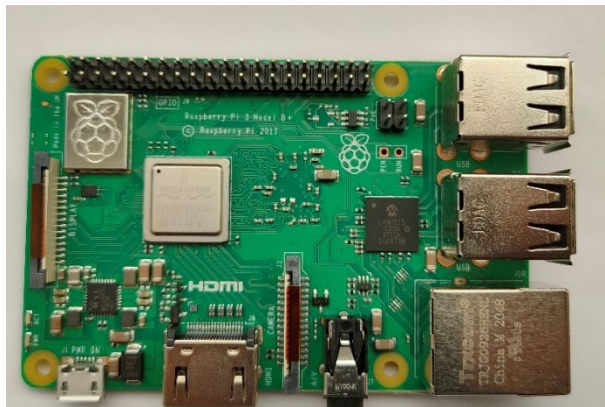
Focos LED

Red de microcontroladores (Raspberry Pi 3B+)

1 microcontrolador por cámara

Las Raspberry Pi permiten la captura y el almacenamiento de las imágenes

Dispositivo Master para controlar todas las cámaras de manera simultánea mediante conexión inalámbrica



Raspberry Pi 3B+



Soporte integrado con Raspberry Pi HQ Camera

I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

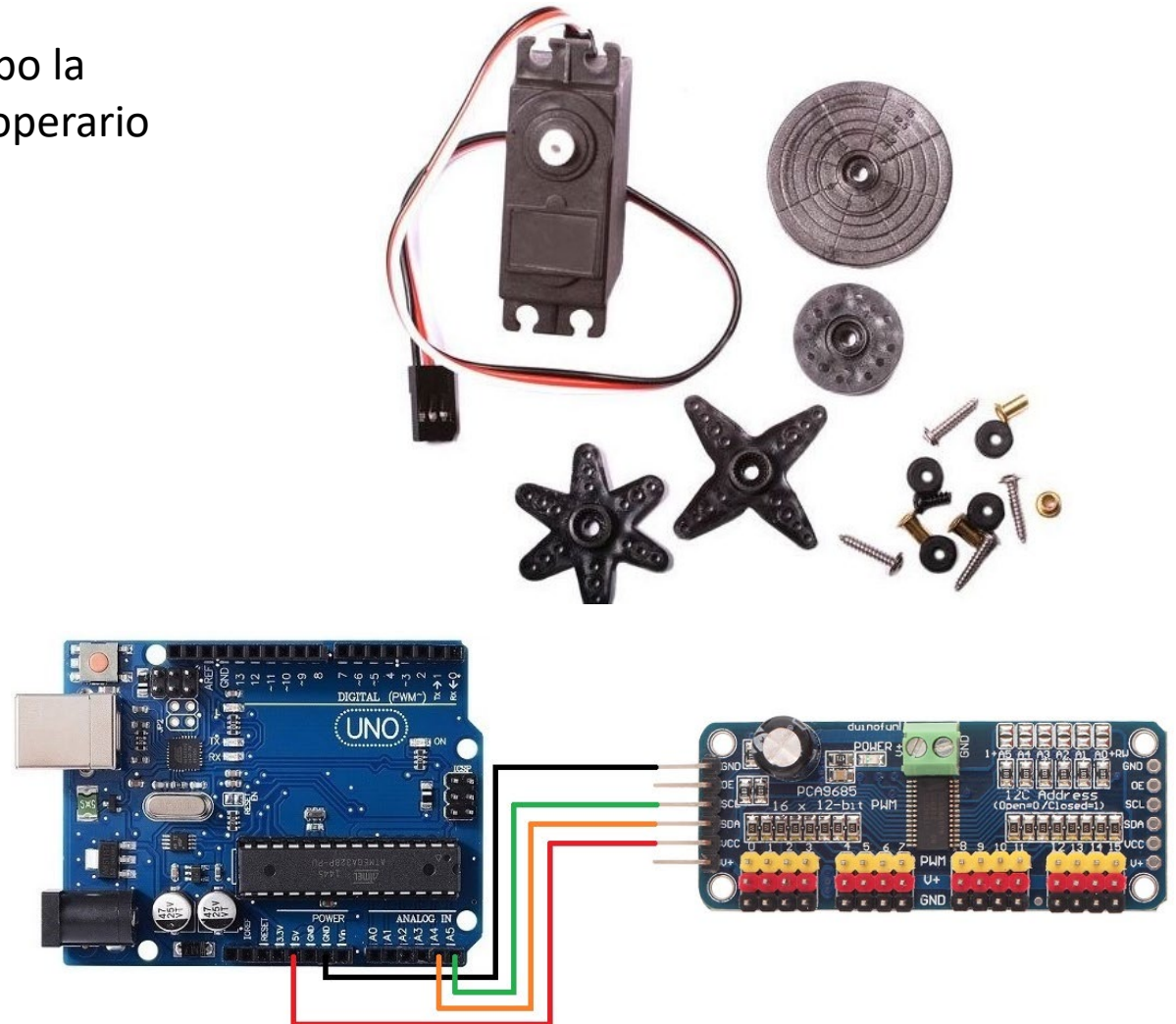
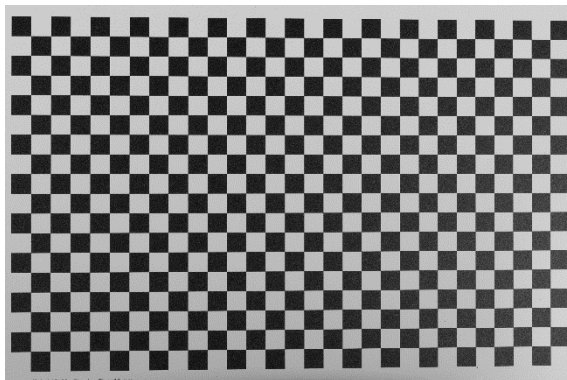
III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

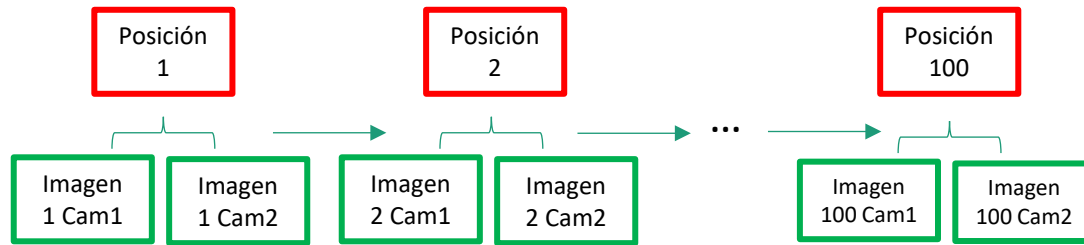
V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN

La plataforma automatizada permite llevar a cabo la calibración de las cámaras sin intervención del operario

- ✓ Servomotores de 180º y 360º
- ✓ 6 DOF
- ✓ Microcontrolador Arduino
- ✓ Target de calibración tipo checkerboard

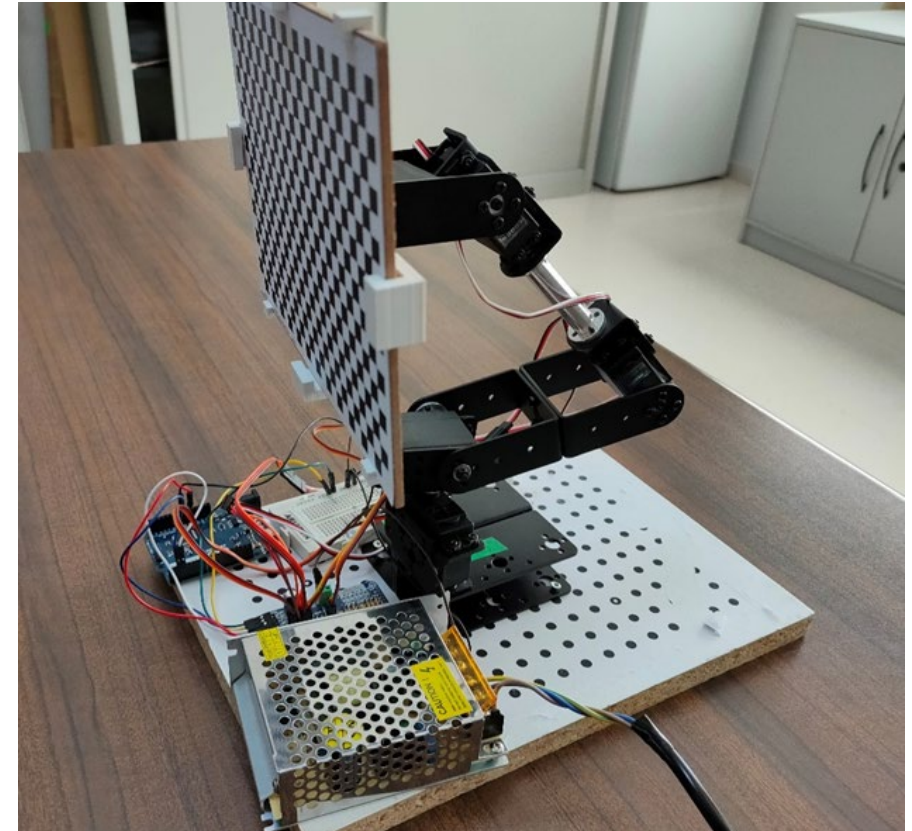


Rutina de calibración de 100 imágenes por pares de cámaras

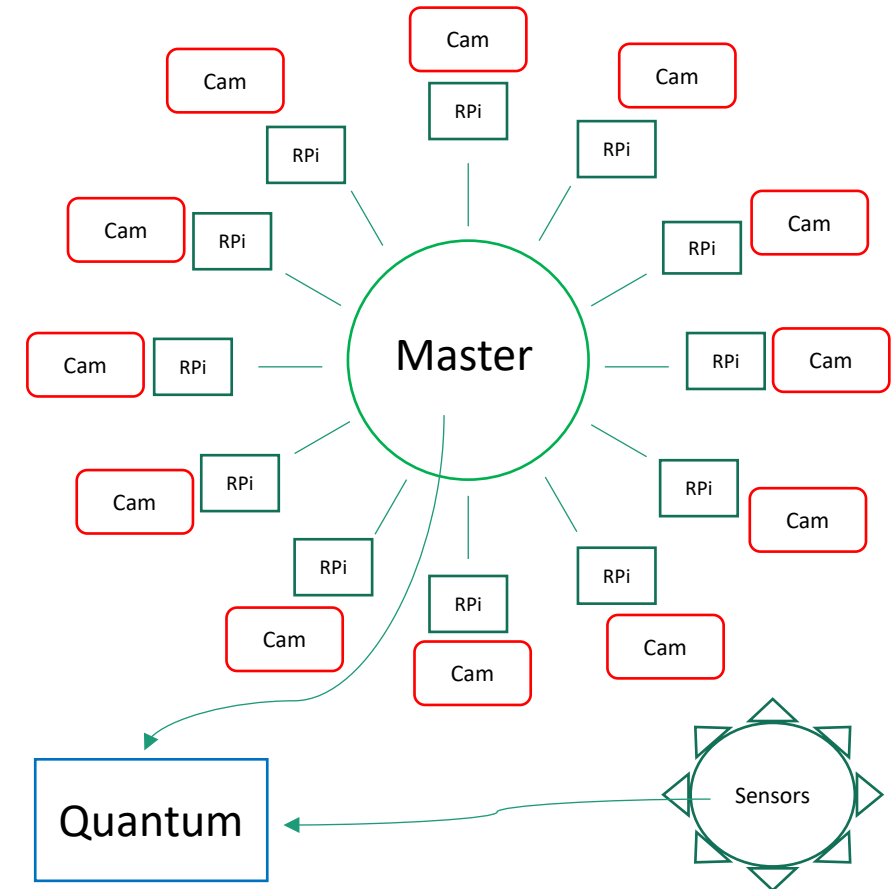


Arduino permite realizar los movimientos de los servomotores a través de un controlador digital

La conexión con un microcontrolador Raspberry Pi permite la captura de imágenes una vez el brazo robótico ha establecido cada posición



- Cada cámara lleva asociada una Raspberry Pi desde la que se realiza el disparo y la cual almacena las imágenes
- Un dispositivo Master permite sincronizar el tiempo de todas las RPi y envía las órdenes de captura
- La conexión de las RPi se realiza de manera inalámbrica, conectando únicamente el número de dispositivos a emplear
- Las señales de los disparos son recogidas por un dispositivo Quantum que permite asociar las imágenes con los datos de otros sensores durante los ensayos



I - INTRODUCCIÓN

II - DIC VS MÉTODOS
CONVENCIONALES

III - FUNDAMENTOS
METODOLÓGICOS

IV - EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

V - PROTOTIPO DE
INVESTIGACIÓN



Raspberry Pi HQ Camera



Canon EOS 700D



Manta G-917B

	Raspberry Pi HQ Camera	Canon EOS 700D	Manta G-917B
Coste	Low (150€)	Medio (1.000€)	Alto (6.000€)
Sensor	CMOS	CMOS	CCD Mono
Resolución	12,3MPx	18MPx	9,2MPx
Sensor Size	7,6 x 5,5 mm	22,3 x 14,9 mm	12,5 x 10 mm
Lente	16 mm	60mm	50mm

CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES PARA EL ANÁLISIS DE MATERIALES

Curso:

Tecnologías Digitales Avanzadas: Aplicación en la Ingeniería Civil



VNIVERSIDAD D SALAMANCA

Escuela **Politécnica Superior**
de Ávila

Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno

Jorge López Rebollo

