

CARACTERIZACION DEL ESTADO DE DEFORMACIONES EN CONTRALAMINADOS DE MADERA Y BAMBU SOLICITADOS A COMPRESION MEDIANTE CORRELACION DIGITAL DE IMAGENES

Caíta Garzon, Javier Armando ^a; Oliveros Salazar, Juan David ^b; Molina Herrera, Maritzabel ^c; Takeuchi Tan, Caori Patricia ^d

^a Autor principal, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, jcaita@unal.edu.co

^b Candidato a Doctor en Ingeniería - Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, jdzapatao@unal.edu.co

^c Profesor titular. Universidad Nacional de Colombia, mmolinah@unal.edu.co

^d Profesor pensionado. Universidad Nacional de Colombia, cptakeuchit@unal.edu.co

Palabras clave: correlación digital de imágenes (DIC), madera laminada, desplazamiento, *Acacia mangium*, *Guadua angustifolia* Kunth, CLBT.

RESUMEN

La complejidad de los mecanismos de falla en los diferentes materiales con aplicaciones estructurales genera un desafío en la adquisición de datos necesarios para determinar el estado completo de deformaciones. Este reto presenta una mayor dificultad en la caracterización de materiales innovadores y no convencionales en la ingeniería estructural, como la madera y bambú, y sus productos derivados. En esta investigación, se utilizó la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) para medir los desplazamientos de algunos puntos y, a partir de estos, determinar el estado de deformaciones de probetas de madera y bambú contralaminados sometidas a compresión. Los resultados obtenidos mediante DIC se contrastaron con los registros de desplazamiento del equipo de ensayo, validando la precisión de esta técnica. Esta investigación propone el uso de la metodología DIC como una herramienta accesible para la determinación de parámetros mecánicos de los materiales como el módulo de elasticidad y de la relación de Poisson. Asimismo, permite el análisis detallado de los mecanismos de falla a través de la caracterización del campo de las deformaciones.

ABSTRACT

The complex failure mechanisms in different materials with structural applications pose a significant challenge to acquiring the necessary data to determine the total strain

states. The characterization of innovative and non-conventional materials in structural engineering, such as timber, bamboo, and their derived products, presents even greater challenges. In this study, Digital Image Correlation (DIC) was used to measure displacement at specific points, enabling the determination of strain states in cross-laminated timber and bamboo specimens under compression. The DIC results were benchmarked against displacement data from the universal testing machine, confirming the accuracy of the technique. This research proposes the DIC methodology as an accessible tool for determining the mechanical parameters of materials, such as the modulus of elasticity and Poisson's ratio. Furthermore, it enables detailed analysis of failure mechanisms by accurately mapping strain fields.

INTRODUCCIÓN

El concreto hidráulico, utilizado en por el sector de la construcción, es uno de los materiales que más generan gases de efecto invernadero por sus procesos de extracción y mezclado, afectando negativamente el medio ambiente. Debido a esto, actualmente se presenta una transición en la construcción con respecto al uso de materiales con un menor impacto ambiental, de donde se destacan los biomateriales, como la madera y el bambú.

Uno de los mayores retos en el uso de los biomateriales es, por su naturaleza biológica, la caracterización de sus propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad o relación de Poisson. Los biomateriales se clasifican como materiales anisótropos, donde estas propiedades cambian debido a la dirección de las fibras en la etapa del crecimiento del biomaterial. En este mismo sentido, estimar el mecanismo de falla del material resulta ser una tarea compleja, considerando que la variación de la resistencia en algunos de estos biomateriales resulta tan dispersa que se corre el riesgo de comprometer la integridad las herramientas de medición en laboratorio.

Debido a esto, en el presente trabajo, se busca proponer el uso de la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC, por sus siglas en inglés, *Digital Image Correlation*), como complemento en la caracterización mecánica de los materiales.

METODOLOGÍA

Se fabricaron probetas de madera y bambú contralaminado, denominado CLBT (por sus siglas en inglés, Cross-Laminated Bamboo and Timber), de 3 y de 5 capas, como

se muestran en la Figura 1. La especie de madera utilizada fue *Acacia mangium* laminada, mientras que la especie de bambú utilizado fue *Guadua angustifolia* Kunth, ambas de producción forestal colombiana. Estas probetas fueron sometidas a cargas de compresión, como se indica en la Figura 1, nombrando las probetas de 3 y 5 capas como CCLBT3 y CCLBT5, respectivamente. Para cada probeta se capturaron datos de carga aplicada y de acortamiento utilizando los sensores de la máquina universal.

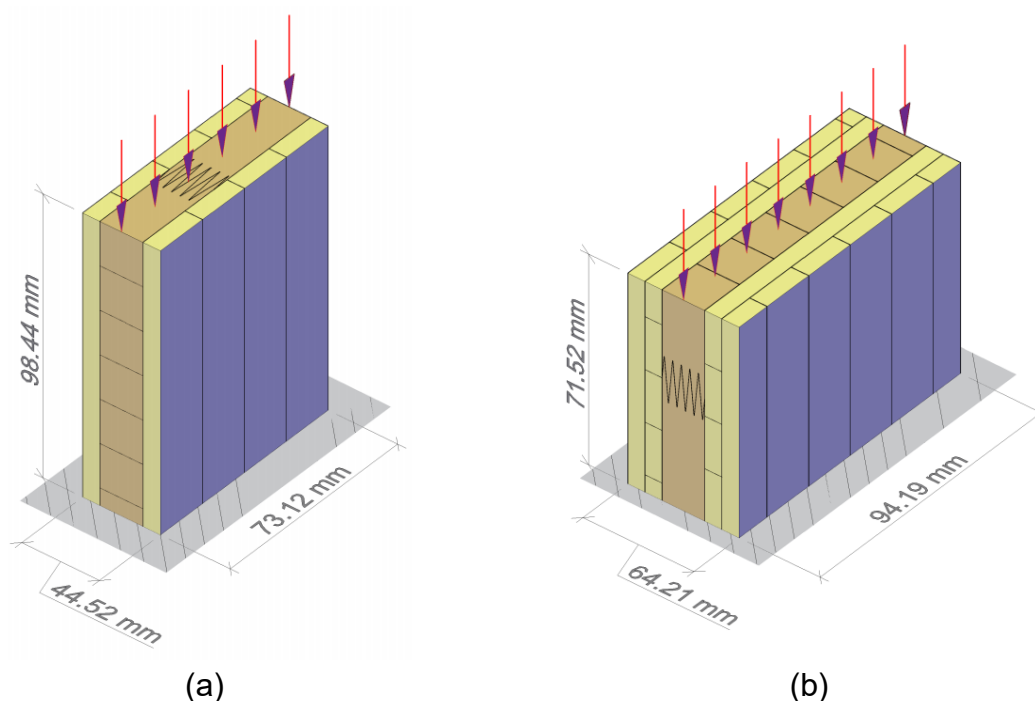


Figura 1. Esquemas de la geometría de la probeta (a) CCLBT3 y (b) CCLBT5.

Fuente: Elaboración Propia.

Captura de Imágenes

Paralelamente, con el fin de implementar la técnica DIC para el análisis del estado de desplazamientos de las probetas, se realizaron los siguientes pasos en el montaje de ensayo:

1. Se midió la altura, la base y el espesor de cada probeta.
2. Se grabó un video desde el inicio de aplicación de carga hasta el final del ensayo, capturando el mecanismo de falla.

Se resalta que, con el fin de identificar las limitaciones del software de análisis DIC, se realizó un tratamiento a la superficie de las probetas, pintándola de blanco y marcando diversos puntos de interés, como se muestra en la Figura 2.



*Figura 2. Probeta de CCLBT3 tratada para el análisis por la metodología DIC.
Fuente: Elaboración Propia.*

Posteriormente, se realizó un tratamiento de los datos para aplicar la metodología DIC. Se descompuso el video grabado en imágenes estáticas, o fotogramas, asociando la cantidad de fotogramas al rango de tiempo que le tomó a las metodologías convencionales tomar sus datos. En este caso, la máquina universal de ensayos utilizada genera un dato de carga y de acortamiento cada segundo, por tanto, el video se descompone en 1 fotograma por segundo.

Análisis de desplazamientos en el software de correlación digital

A continuación, se ingresaron los fotogramas al software de análisis DIC. Para el presente estudio se utilizó el software *Zeiss Correlate* (Carl Zeiss AG [ZEISS], s. f.), en su versión gratuita. Dentro del software se realizaron los siguientes pasos:

1. Se calibró de la escala de la probeta, con el fin de relacionar los datos de cada fotograma con un sistema coordinado y unas dimensiones específicas.
2. Se estableció una superficie de análisis, donde en ella se definieron los puntos de interés.
3. Se determinó el desplazamiento como la variable de estudio en cada punto de interés.

El software ZEISS Correlate evalúa los píxeles de cada fotograma respecto al fotograma 1, identificando el movimiento en cada fotograma subsecuente. En este análisis, el movimiento de píxeles describe el desplazamiento del punto de interés en cada fotograma.

Estimación de propiedades mecánicas

Una vez extraídos los desplazamientos de cada punto de interés en la probeta, se realizaron gráficas de esfuerzos axiales contra deformaciones longitudinales y de deformaciones transversales contra deformaciones longitudinales, con el fin de estimar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del material.

Con el fin de calcular las deformaciones debidas a la carga aplicada, se dividió la distancia relativa entre los pares de puntos seleccionados contra la distancia inicial, utilizando la siguiente ecuación.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

Donde:

- ε es la deformación de la probeta
- ΔL es el cambio de distancia entre puntos debido a la carga axial.
- L_0 es la distancia entre puntos previo a la aplicación de carga.

A su vez, se calculó el esfuerzo promedio de compresión en la probeta con la siguiente ecuación:

$$\sigma_g = \frac{P}{A_g} \quad (2)$$

Donde:

- σ_g es esfuerzo axial promedio ejercido sobre la probeta.

- P es la carga aplicada sobre por la maquina universal de ensayos
- A_g es el área neta perpendicular a la dirección de la carga P aplicada, la cual es de 3255.40 mm² y 6049.22 mm² para la probeta CCLBT3 y CCLBT5, respectivamente.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para estas probetas se realizó la toma de video en la cara frontal, lateral izquierda y posterior. La descomposición a fotogramas se hizo con la librería *OpenCV de Python*. A continuación, en la Figura 3 y en la Figura 4, se muestran los puntos de interés identificados en la superficie de cada cara frontal de las probetas CCLBT3 y CCLBT5, respectivamente.

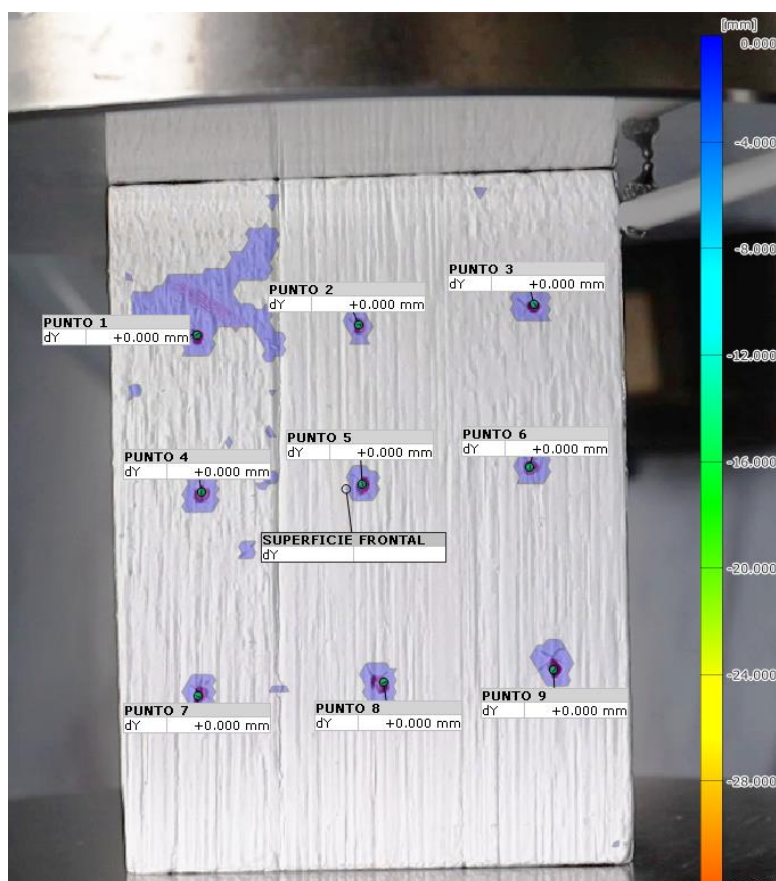
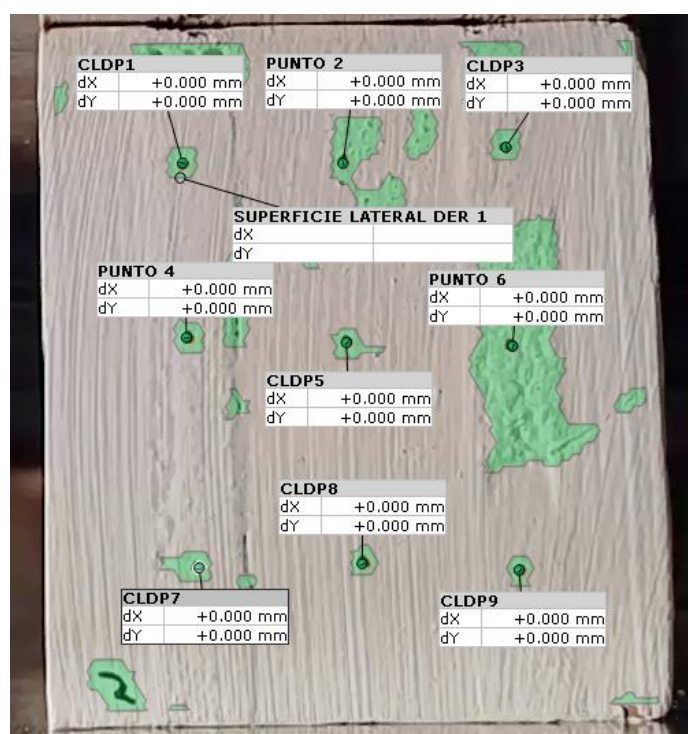


Figura 3. Nube de puntos sobre la cara frontal de la probeta CCLBT3.
Fuente: Elaboración Propia.

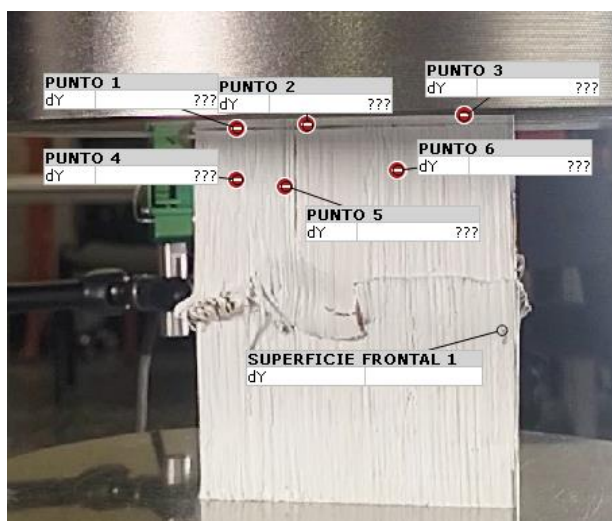


*Figura 4. Nube de puntos sobre la cara frontal de la probeta CCLBT5.
Fuente: Elaboración Propia.*

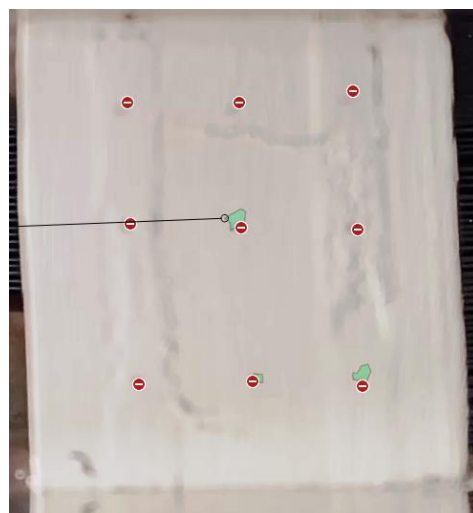
Los datos de interés para los puntos de evaluación en las probetas fueron los desplazamientos, tanto horizontales como verticales, con el fin de estimar las propiedades mecánicas de cada configuración.

Análisis de desplazamientos en el software de correlación digital

En este procedimiento, se observó que la perpendicularidad y el enfoque de los videos grabados son factores limitantes en el análisis utilizando DIC, debido a que los videos obtenidos de la cara posterior de la probeta CCLBT3 y la cara frontal de la probeta CCLBT5 tuvieron distorsiones al no ser perpendiculares al lente de la cámara, así como errores por desenfoque a lo largo del ensayo. Este tipo de fallas técnicas generan que la superficie de análisis de los pixeles se pierda de un fotograma a otro, afectando la continuidad del análisis de los pixeles a lo largo del ensayo, como se muestran en la Figura 5.



(a)



(b)

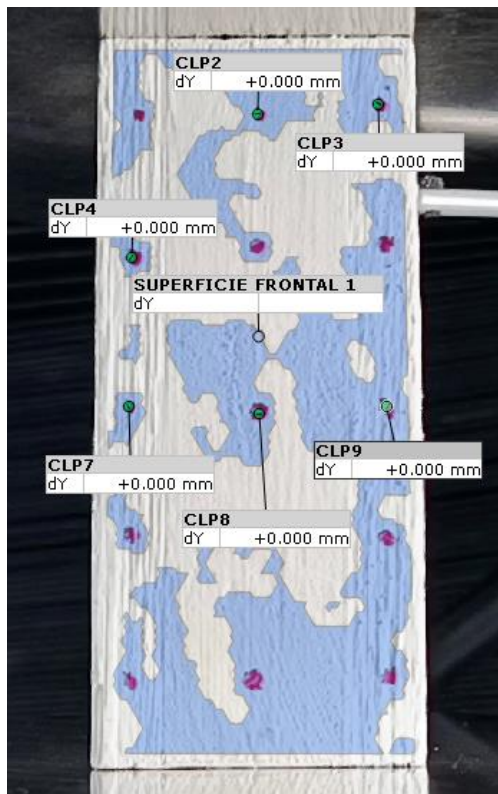
Figura 5. Pérdida de información por (a) errores de perpendicularidad en la probeta CCLBT3 y (b) errores de enfoque en la probeta CCLBT5.

Fuente: Elaboración Propia.

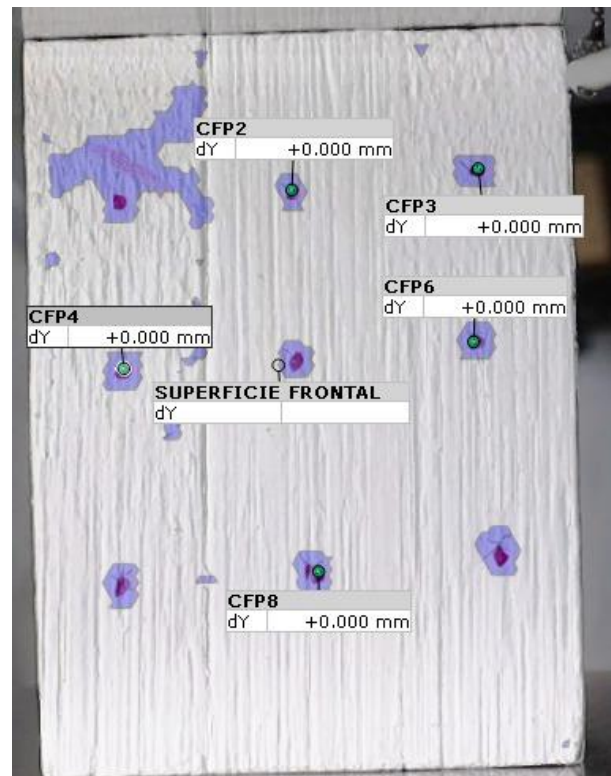
A continuación, una vez verificado el comportamiento de cada superficie de análisis, se seleccionaron puntos específicos para extraer los datos de desplazamiento con el fin de comparar los desplazamientos verticales generados en la placa superior de carga y directamente en la probeta.

Los puntos seleccionados para esta comparación en la probeta CCLBT3 fueron los ubicados en la cara frontal CFP2 y en la cara lateral CLP2. Así mismo, para la probeta CCLBT5, se ubicaron los puntos en la cara lateral izquierda CLIP2 y en la cara lateral derecha CLDP1.

A continuación, en la Figura 6 y en la Figura 7, se muestra dónde se ubican los puntos en cada cara de las probetas CCLBT3 y CCLBT5, y en cada probeta, utilizados para realizar los análisis de desplazamientos.



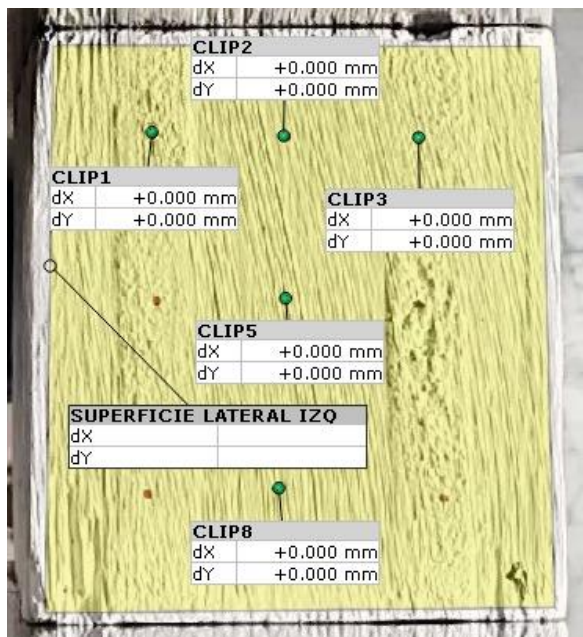
(a)



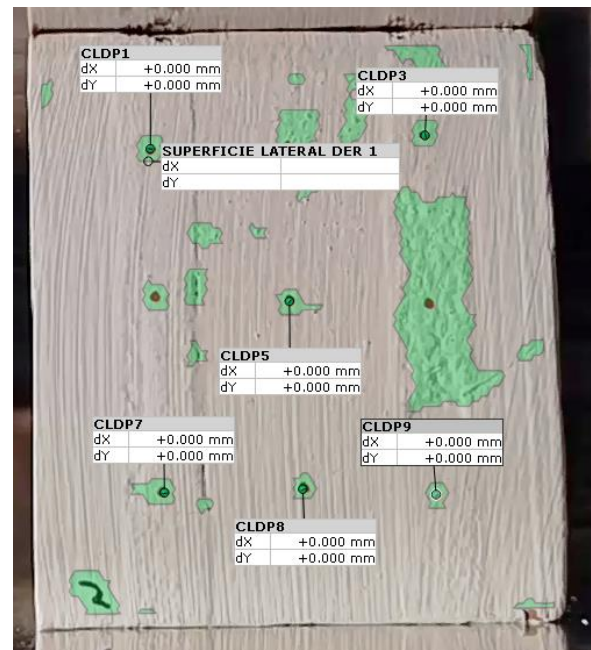
(b)

Figura 6. Ubicación de puntos de estudio en la probeta CCLBT3 (a) Cara lateral (CL) y (b) Cara frontal (CF).

Fuente: Elaboración Propia.



(a)



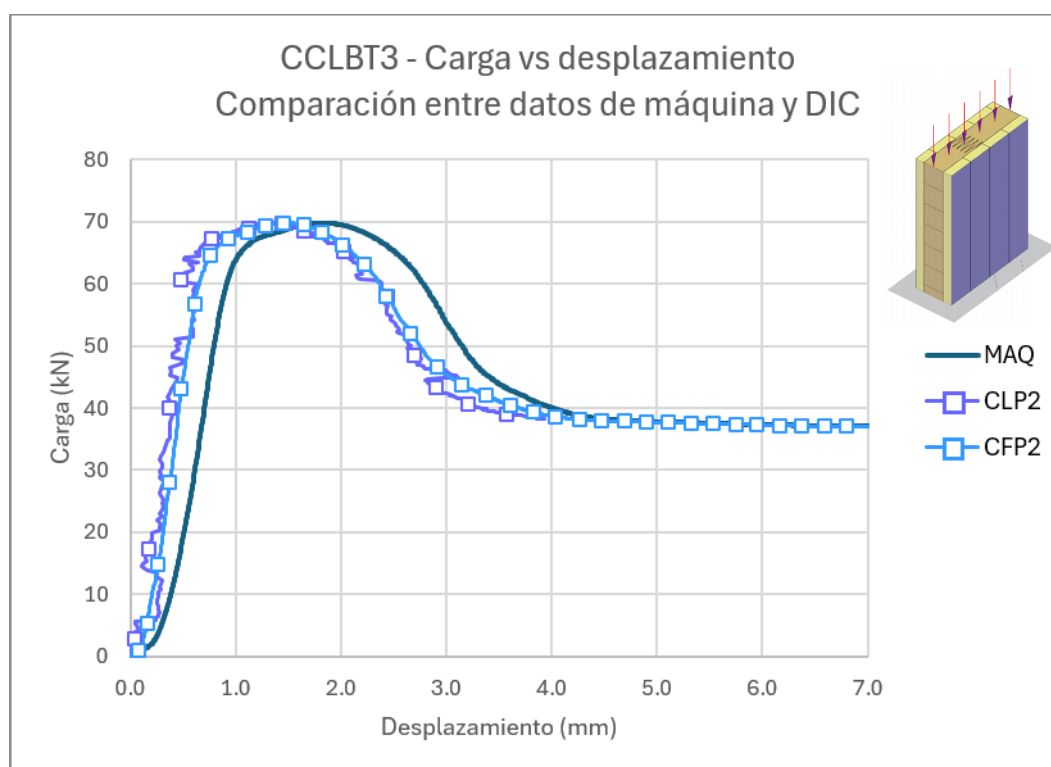
(b)

Figura 7. Ubicación de puntos de estudio en la probeta CCLBT5 (a) Cara lateral izquierda (CLI) y (b) Cara lateral derecha (CLD).

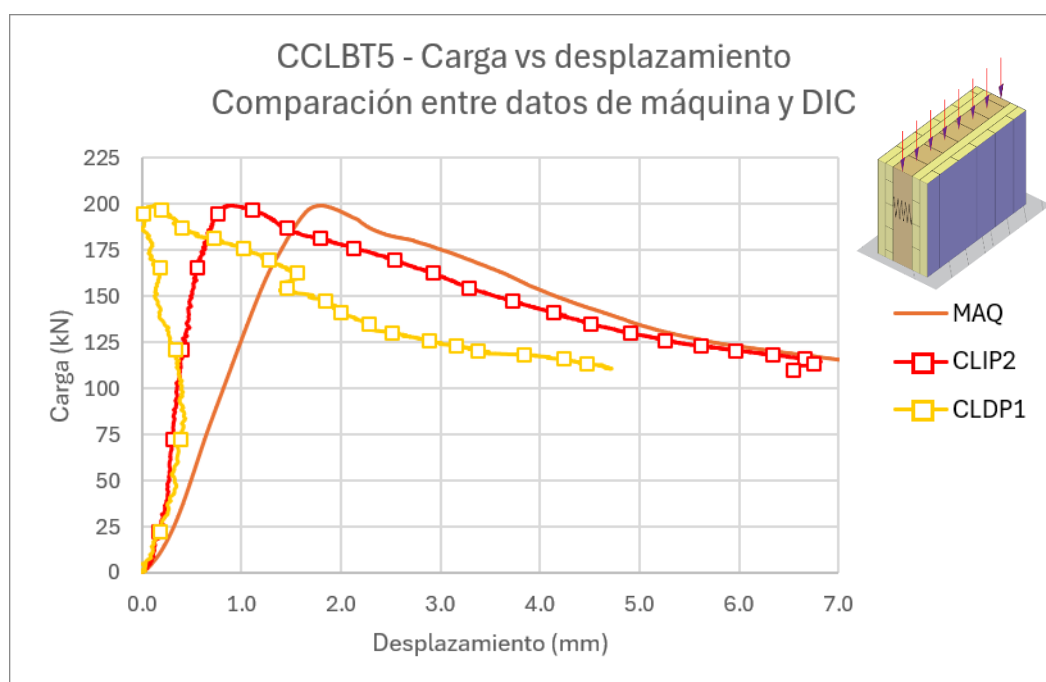
Fuente: Elaboración Propia.

Como medio de contraste para validar la metodología DIC en la Figura 8 y en la Figura 9, se compararon tres curvas para las probetas CCLBT3 y CCLBT5 (i) la carga aplicada sobre las probetas CLBT y el acortamiento medido en la máquina universal de ensayos (MAT), (ii) la carga aplicada con los datos de acortamiento obtenidos mediante el uso del software DIC para el punto de interés lateral, y (iii) la carga aplicada con los datos de acortamiento obtenidos mediante el uso del software DIC para el punto de interés frontal.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos, se unificaron las líneas de comportamiento para los puntos analizados en cada probeta junto con la línea de comportamiento obtenido usando medición convencional y verificar las zonas de distorsión o de comportamiento irregular.



*Figura 8. Comparación de datos usando el método convencional y DIC para CCLBT3.
Fuente: Elaboración Propia.*



*Figura 9. Comparación de datos usando el método convencional y DIC para CCLBT5.
Fuente: Elaboración Propia.*

Como se evidencia en la Figura 8 y en la Figura 9, se observa un comportamiento similar entre los datos capturados por la máquina de ensayos contra la metodología DIC. Sin embargo, dentro de las mismas se presenta una distorsión relacionada a errores de enfoque y cambios de iluminación durante la grabación del ensayo.

Se resalta el comportamiento del punto CLDP1 en la probeta CCLBT5, donde se evidencia un mayor desplazamiento para el mismo nivel de carga respecto al punto CLIP2 hasta un valor de carga de 75 kN, donde luego empieza a disminuir el desplazamiento del punto CLDP1, indicando que se está moviendo hacia arriba. Esto puede suceder debido a que las superficies inferior y superior de la probeta CCLBT5 no fueron completamente perpendiculares, generando un pequeño momento que hizo que la superficie derecha experimentara esfuerzos axiales de tensión, mientras que en la superficie izquierda se generaron esfuerzos axiales de compresión.

Estimación de propiedades mecánicas

De otra parte, con el fin de utilizar los datos de desplazamientos generados mediante la metodología DIC para calcular el módulo de elasticidad de las probetas, se seleccionaron puntos adicionales para medir cambios en desplazamientos entre puntos, con el fin de estimar las deformaciones longitudinales.

Para la probeta CCLBT3 los puntos seleccionados para evaluar las deformaciones longitudinales fueron los ubicados en la cara lateral CLP2 y CLP8. Así mismo, para la probeta CCLBT5, se seleccionaron los puntos en la cara lateral derecha CLDP3 y CLDP9. Estos puntos pueden ubicarse en la Figura 6 y en la Figura 7 para la probeta CCLBT3 y CCLBT5, respectivamente. Cabe resaltar que los puntos seleccionados deben estar en una misma posición horizontal.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los puntos utilizados para este cálculo, junto con la distancia entre los puntos antes de iniciar la carga.

Estimación de deformaciones longitudinales			
Probeta	Punto superior	Punto inferior	Distancia inicial vertical (mm)
CCLBT3	CLP2	CLP8	51.67
CCLBT5	CLDP3	CLDP9	44.83

*Tabla 1. Información de los puntos para estimar deformaciones longitudinales
Fuente: Elaboración Propia.*

A partir de los datos de deformación calculados, utilizando los desplazamientos calculados en cada punto mediante la metodología DIC, se realizaron gráficas de esfuerzo axial vs deformación longitudinal en el rango lineal elástico para cada probeta, con las cuales se estimaron valores de módulo de elasticidad en el rango lineal, definidos como la pendiente de la curva. Estas curvas se muestran en la Figura 10 y en la Figura 11 para la probeta CCLBT3 y CCLBT5, respectivamente.

Además, con el fin de estimar la relación de Poisson en las caras laterales de las probetas de CLBT, se calcularon las deformaciones transversales a la acción de la carga de compresión, extrayendo los datos de desplazamientos horizontales en puntos seleccionados a la misma altura de cada probeta. Para la probeta de CCLBT3, los puntos seleccionados para extraer estos datos fueron los puntos CLP7 y CLP9, mientras que, para la probeta CCLBT5, los puntos seleccionados fueron los puntos CLDP1 y CLDP3. Estos puntos pueden observarse en la Figura 6 y la Figura 7. Así mismo, en la Tabla 2, se muestra un resumen de los puntos utilizados, junto con la distancia horizontal antes de carga entre ellos.

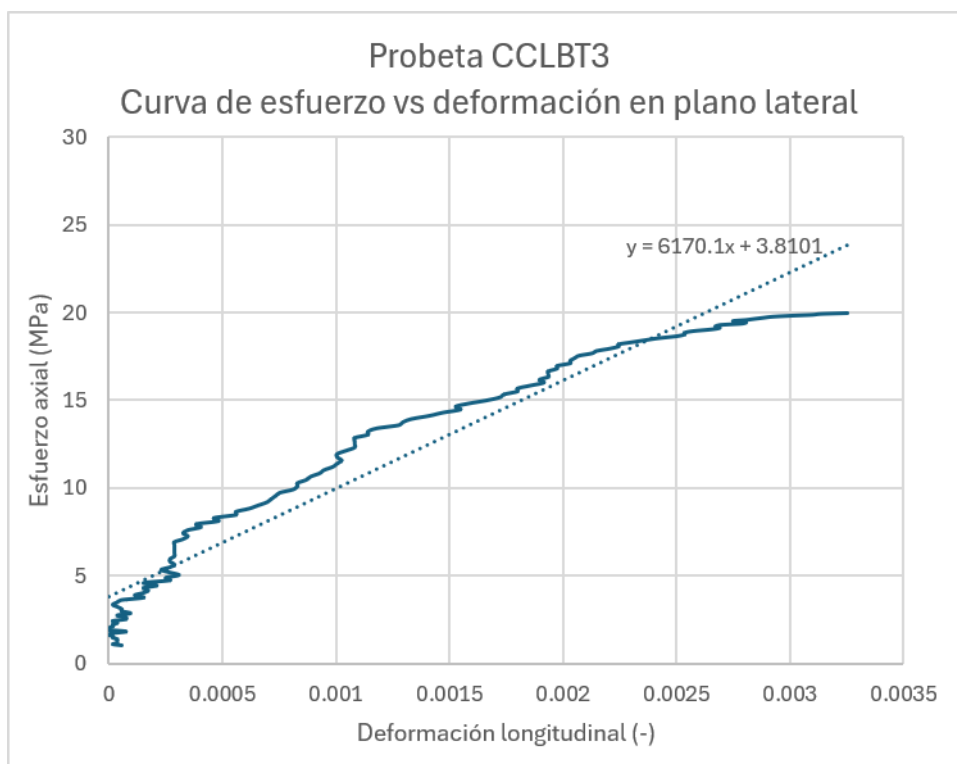


Figura 10. Esfuerzo axial contra deformación longitudinal para la probeta CCLBT3.
Fuente: Elaboración Propia.

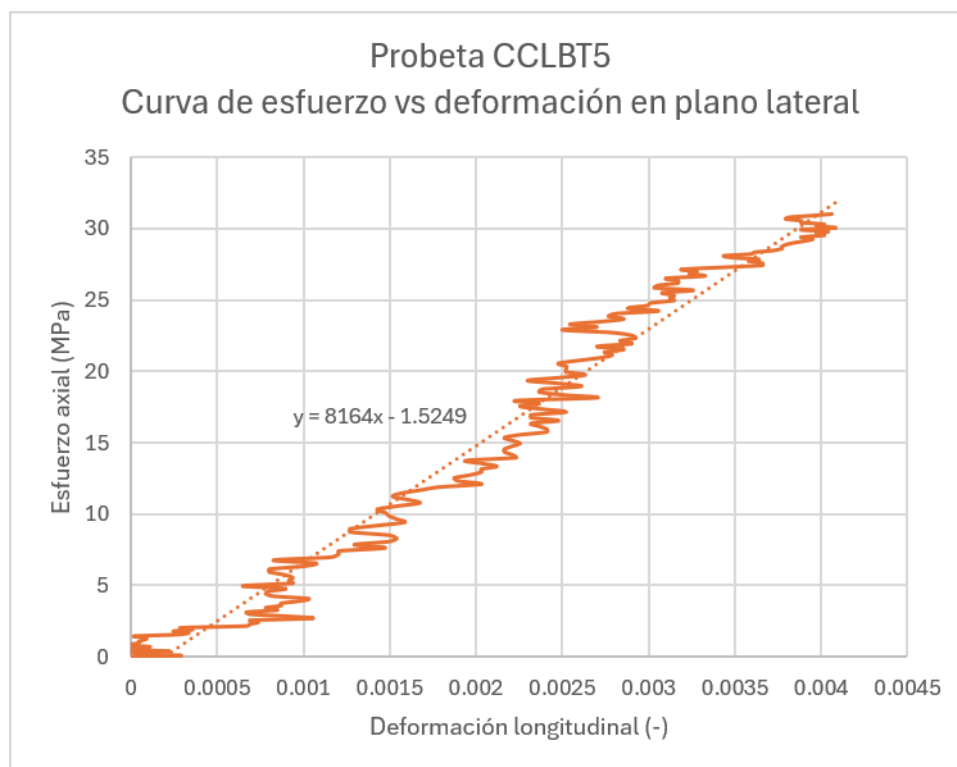
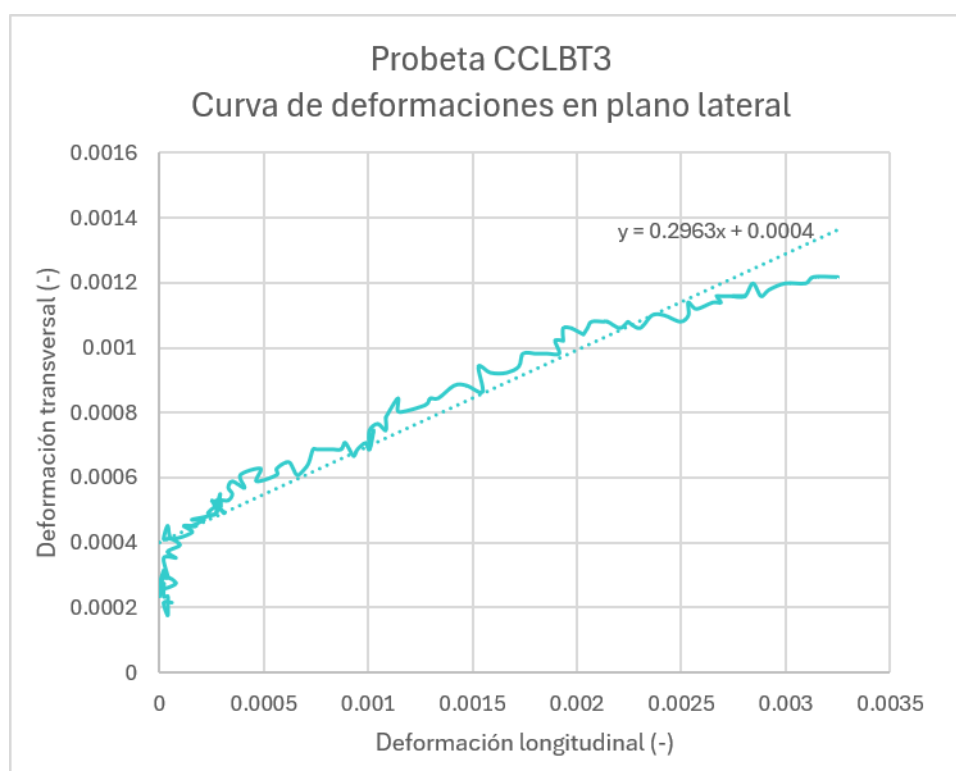


Figura 11. Esfuerzo axial contra deformación longitudinal para la probeta CCLBT5.
Fuente: Elaboración Propia.

Estimación de deformaciones transversales			
Probeta	Punto izquierdo	Punto derecho	Distancia inicial horizontal (mm)
CCLBT3	CLP7	CLP9	50.92
CCLBT5	CLDP1	CLDP3	34.46

*Tabla 2. Información de los puntos para estimar deformaciones transversales.
Fuente: Elaboración Propia.*

Así, se realizaron gráficas de deformación transversal contra deformación longitudinal en el rango lineal elástico, donde se estimó la relación de Poisson en los planos laterales de las probetas, definido como la pendiente de la regresión lineal. Estas curvas, junto con sus respectivas regresiones lineales, se muestran en la Figura 12 y en la Figura 13.



*Figura 12. Deformación longitudinal contra deformación transversal de la probeta CCLBT3.
Fuente: Elaboración Propia.*

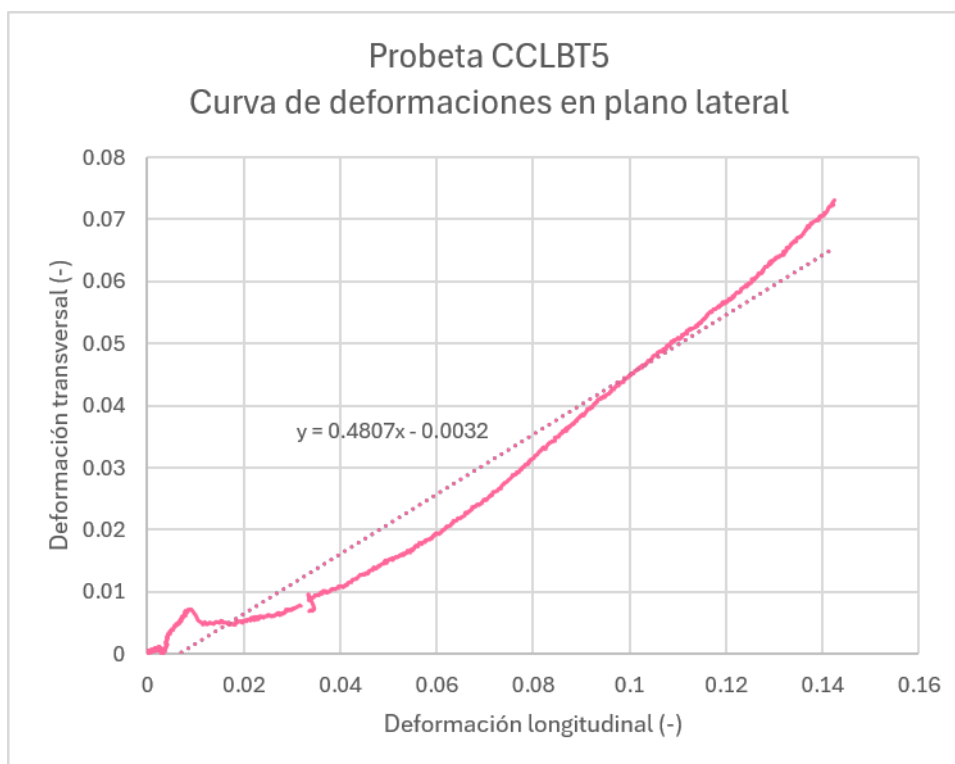


Figura 13. Deformación longitudinal contra deformación transversal de la probeta CCLBT5.
Fuente: Elaboración Propia.

Las propiedades mecánicas estimadas de cada probeta se resumen en la Tabla 3.

Probeta	Módulo de Elasticidad (MPa)	Relación de Poisson (-)
CCLBT3	6170.1	0.296
CCLBT5	8164.0	0.481

Tabla 3. Propiedades mecánicas para las probetas CCLBT.
Fuente: Elaboración Propia.

Cabe destacar que los valores de módulo de elasticidad calculados para cada probeta son aproximaciones, debido a la naturaleza ortótropa del material CLBT, el cual es un biomaterial compuesto por un contralaminado de madera de *Acacia mangium* y bambú *Guadua angustifolia* Kunth. En consecuencia, el presente análisis asume un comportamiento global y no consideró la resistencia mecánica individual de cada material constituyente ni su aporte específico al compuesto.

Así mismo, se destaca que el dato calculado de relación de Poisson para cada probeta corresponde a un estimado en la cara evaluada, es decir, en las caras laterales,

denominadas *cantos* del material CLBT. Esta precisión se realiza debido a que, al estar compuesto de dos biomateriales, el material CLBT experimenta un comportamiento mecánico de material ortótropo. Esta definición del material implica que no existe una única relación de Poisson, sino que existen varias en función de la cara que se esté evaluando.

CONCLUSIONES

El método de correlación digital de imágenes (DIC) permite evaluar propiedades mecánicas de materiales, como es la madera y el bambú contralaminado, con algunas limitaciones en precisión. Además, este método permite estimar el estado de desplazamientos en una superficie del elemento a evaluar, y no únicamente a un punto como convencionalmente se realizan estas mediciones.

Adicionalmente, la metodología DIC empleada resultó útil para detectar defectos de fabricación en las probetas, como se evidenció en el análisis de las caras laterales en la probeta CCLBT5. Al tener más zonas de medición respecto a las metodologías convencionales, se puede hacer un estudio más profundo de las probetas y su idoneidad en los ensayos.

En cuanto al uso del software y de las tecnologías DIC, es fundamental destacar las dificultades técnicas que pueden surgir. Se recomienda un control del ambiente riguroso para aplicar esta tecnología, debido a que cambios en la iluminación pueden generar datos incorrectos de desplazamiento de los puntos, agregando incertidumbres al análisis posterior. Asimismo, la cámara que se utiliza en estos procedimientos no sólo debe ubicarse perpendicular a la superficie de la probeta, sino que exige una configuración de enfoque manual.

Por otro lado, cabe mencionar la necesidad de contar con una Unidad de Procesamiento Gráfico dedicado (GPU). Según los requisitos del sistema del desarrollador (Carl Zeiss AG [ZEISS], s. f.), este componente es vital para el procesamiento de las imágenes, lo cual podría representar una limitante técnica y económica al evaluar la implementación de esta herramienta a nivel institucional.

Este documento busca dejar en evidencia la posibilidad de utilizar diferentes tipos de tecnologías, al alcance de los investigadores, para mejorar la calidad de la toma de datos.

COLABORADORES

- Ing. EDGAR ESPEJO MORA, Docente titular adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica.

Brindó asesoría en la preparación de los ensayos experimentales y el montaje de la captura de datos mediante video.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional de Colombia por brindarnos los servicios del Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería y por el asesoramiento de los docentes e investigadores de la institución.
- De igual manera agradecer al Semillero de Vivienda SUE-VIS por el acompañamiento y colaboración durante el desarrollo del proyecto de investigación.
- Por último, agradecemos al proyecto “UN-DICAM - Software para la Caracterización Mecánica de Materiales de Construcción a Través de la Correlación Digital de Imágenes” por el financiamiento de la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Hassan, G. M. (2021). Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 137, Artículo 106394. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106394>
- Magaña-Rodríguez, R., Gayosso-Melo, M. A., Saldaña-Heredia, A., Susarrey-Huerta, O., & Pascual-Francisco, J. B. (2024). Sistema de medición de deformaciones en tiempo real basado en correlación digital de imágenes, para prueba uniaxial de tensión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(Especial 4), 7–14. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13250>
- TalentoTech. (s.f.). *Introducción y funcionamiento de OpenCV*. iMaster Academy. <https://imaster.academy/contenidos-tematicos/talentotech/TalentoTech/InteligenciaArtificial2/Mision2/Unidad3/7.->

[IntroduccionyfuncionamientodeOpenCV.pdf.pdf](#)

- Carl Zeiss AG. (s. f.). *ZEISS CORRELATE: System requirements & software support*. <https://www.zeiss.com/metrology/en/software/zeiss-correlate/system-requirements.html>