



**SISTEMA DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES PARA LA MEDICIÓN
DE CAMPOS DE DESPLAZAMIENTO EN 2D PARA EL LABORATORIO DE
ESTRUCTURAS DE LA F.I.C.**

BRAYAN ALEXIS FERNÁNDEZ CÓRTEZ

YONATAN GUERRERO REALPE

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

POPAYÁN

2025



**SISTEMA DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES PARA LA MEDICIÓN
DE CAMPOS DE DESPLAZAMIENTO EN 2D PARA EL LABORATORIO DE
ESTRUCTURAS DE LA F.I.C.**

BRAYAN ALEXIS FERNÁNDEZ CÓRTEZ

YONATAN GUERRERO REALPE

DIRECTOR:

Ph. D. ROGER ORTEGA C.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

POPAYÁN

2025

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, 15 de mayo de 2025

DEDICATORIA

Dedicatoria de Brayan Alexis Fernández Cortez:

A mis padres, Teresa de Jesús Cortez y Libardo Fernández, agradezco profundamente por cada palabra de aliento y cada gesto de amor. Recuerdo cada día en que estuvieron conmigo y me dijeron: "No te rindas, sigue adelante". Hoy estoy aquí cumpliendo este logro, porque creyeron en mí incluso cuando yo mismo dudaba. A pesar de las dificultades que enfrentaron, nunca dejaron de luchar con firmeza y entrega para brindarnos un mejor futuro. Su orientación, apoyo y fe hicieron posible este momento.

A mis hermanos, Heivy, Gean Carlos y Kevin, por su presencia constante, su cariño y por creer siempre en mí, a mi abuelo José Ortiz, quien, aunque ya no está, me dejó valiosas enseñanzas que guiaron este logro, a mis abuelas Ursulina Ordoñez y Rosa Bolaños, por su amor, fortaleza y sabiduría que siempre me acompañan. Extiendo igualmente esta dedicatoria a todos mis familiares y amigos, cuyo respaldo, palabras y presencia han sido parte fundamental en este camino.

Dedicatoria de Yonatan Ferney Guerrero Realpe:

Dedico este logro con todo mi corazón a mi familia, en especial a mis padres, Luis Alfonso Guerrero y Nelly Realpe, verdaderos ejemplos de valentía, esfuerzo y entrega. Su lucha incansable por brindarme las oportunidades que ellos no tuvieron, su sacrificio silencioso y su fe constante en mí han sido el motor que me impulsó a no rendirme. A mi madre, gracias por tus sabios consejos, por tus palabras llenas de amor y por enseñarme que la perseverancia siempre encuentra recompensa. A mi padre, gracias por tu fortaleza y por ser guía incluso en los momentos más inciertos.

A mi hermana, Derly Estefanía Guerrero, por acompañarme con cariño en este proceso, y a mis abuelos y tíos, por ser esa red de apoyo sólida, siempre presente, siempre firme. Y, sobre todo, agradezco profundamente a Dios, por darme fuerza en los momentos de cansancio, por sostenerme cuando dudé de mí mismo, y por nunca soltar mi mano en los días más difíciles. Esta meta alcanzada es tan mía como de todos ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad del Cauca y al Programa de Ingeniería Civil, por brindarme la formación académica y el respaldo institucional necesario para la ejecución de este proyecto.

Agradezco de manera especial al Ingeniero Roger Ortega, director de esta tesis, por su constante acompañamiento, orientación técnica y disposición durante todas las etapas del trabajo. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Extiendo mi gratitud al laboratorio de estructuras y, en particular, al laboratorista Alfonso, por su colaboración en la logística, ejecución de ensayos y manejo de equipos. Así mismo, agradezco al Ingeniero Diago Martínez, por facilitar parte del instrumental requerido para la validación experimental.

Reconozco también el valioso apoyo de la Ingeniera Natalia Agredo y su empresa Premec, por la generosa donación del concreto empleado en la fabricación de las probetas, lo cual fue esencial para la fase experimental.

Un agradecimiento especial al Ingeniero José Darío Bravo y a su asignatura de Concreto Armado, ya que, como ejercicio académico con sus estudiantes, se fabricaron ocho vigas que fueron utilizadas en los ensayos preliminares. Este insumo fue de gran valor para el ajuste y validación del montaje experimental definitivo.

Finalmente, queremos agradecer sinceramente a nuestros compañeros Lizeth Chaves, Stiven Girón y Miguel Hernández, quienes estuvieron presentes en diferentes momentos de este proceso. Su compañía, apoyo incondicional, ideas y colaboración durante los ensayos hicieron que el camino fuera más llevadero y enriquecedor, tanto en lo académico como en lo personal.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Resumen.....	5
1. Introducción	6
2. Descripción	8
2.1. Planteamiento del problema	8
2.2. Objetivos	10
2.2.1. Objetivo general	10
2.2.2. Objetivos Específicos	10
3. Justificación.....	11
4. Marco de Referencia	13
4.1. Antecedentes	13
4.2. Estado del Arte.....	14
4.3. Marco teórico	17
4.3.1. Correlación subset-based	17
4.3.2. Cinemática y mecánica del continuo	18
4.3.3. Fotogramétrica de calibración de cámara	19
4.4. Marco conceptual.....	19
4.4.1. Correlación digital de imágenes (DIC)	19
4.4.2. Patrón speckle	20
4.4.3. Subset y step size.....	20
4.4.4. Campo de desplazamientos 2D	21
4.4.5. Calibración y corrección off-axis.....	21
5. Metodología	22
5.1. Configuración del sistema DIC 2D	22

5.2.	Calibración del sistema.....	22
5.3.	Elaboración del manual de usuario	23
6.	Implementación del sistema de correlación digital de imágenes	24
6.1.	ensayos preliminares para definir las condiciones del sistema	24
6.2.	Descripción del montaje DEFINITIVO	34
6.3.	ensayo de flexion en probetas de vigas de concreto reforzado.....	39
6.3.1.	Descripción de las pruebas definitivas.....	39
6.3.2.	Comportamiento de las vigas	44
6.3.3.	Análisis de desplazamientos y validación del sistema DIC.....	52
7.	Limitaciones del sistema de medición DIC.	61
8.	Conclusiones	63
9.	Recomendaciones.....	64
10.	Trabajos futuros.....	66
11.	Bibliografía	67
12.	Anexos	72
12.1.	Anexo 1: Manual de correlación digital de imágenes en 2D usando el software libre NCORR.....	72
12.2.	Anexo 2: Resultados de desplazamientos obtenidos mediante la DIC, el sensor de la máquina universal y los deformímetros.....	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Medición de desplazamiento en la viga preliminar, viga 1,1.</i>	31
Tabla 2. <i>Diseño de las vigas definitivas.</i>	41
Tabla 3. <i>Comparación entre la resistencia nominal a flexión y cortante versus la carga de falla experimental en las vigas ensayadas.</i>	48
Tabla 4. <i>Índices de error DIC vs sensor deformímetro 1</i>	54
Tabla 5. <i>Índices de error DIC vs sensor maquina</i>	54

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Instrumentación de un muro de concreto reforzado con más de 30 sensores (potenciómetros, LVDT's, galgas) [25].</i>	8
<i>Figura 2. Número de artículos de investigación indexados en las bases de datos de web of science o scopus [12].</i>	12
<i>Figura 3. Ensayos preliminares del curso de concreto armado.</i>	24
<i>Figura 4. Pruebas preliminares de medición de desplazamientos con DIC, en el laboratorio de estructuras. a) patrón de puntos, b) prueba de carga, c) falla de la viga.</i>	27
<i>Figura 5. Montaje ensayos preliminares finales (Vigas 1.1 y 1.2).</i>	28
<i>FIGURA 6. Procedimiento para el procesamiento de imágenes con el programa NCORR.</i>	29
<i>FIGURA 7. comparación de los desplazamientos obtenidos por el DEF 1 y los obtenidos con el sistema DIC para la viga 1.1.</i>	32
<i>FIGURA 8. comparación de los desplazamientos obtenidos por el DEF 2 y los obtenidos con el sistema DIC en el centro de la viga 1.1.</i>	33
<i>Figura 9. montaje definitivo del sistema.</i>	36
<i>Figura 10. Patrón de puntos.</i>	37
<i>FIGURA 11. Detalles del montaje</i>	39
<i>Figura 12. proceso constructivo de vigas definitivas. a) corte de acero, b) armado de estribos, c) armado de castillos y formaletas, d) fundición, e) acabado.</i>	40
<i>Figura 13. datos de desplazamientos obtenidos mediante el procesamiento.</i>	43
<i>Figura 14. Concentración de esfuerzos y registro de deformaciones unitarias principales.</i>	43
<i>FIGURA 15. Estructura de la maquina universal</i>	44
<i>Figura 16. Deformaciones unitarias ϵ_{xy} en las vigas.</i>	45
<i>Figura 17. Curvas desplazamiento vs. Fuerza para las vigas ensayadas.</i>	49
<i>FIGURA 18. Imágenes sin procesar de los estados finales de las vigas ensayadas.</i>	50
<i>FIGURA 19. Comparación de errores: DEF1– NCORR DEF1</i>	55
<i>FIGURA 20.comparación de errores: m. Universal–ncorr def 2</i>	56
<i>FIGURA 21. Estado final de la viga 2.2</i>	57
<i>FIGURA 22. Rotación de la cámara.</i>	58
<i>FIGURA 23. Comparación de los desplazamientos registrados con DIC y medidos con los sensores y la máquina universal.</i>	59

RESUMEN

En este trabajo se implementó y validó un sistema bidimensional de correlación digital de imágenes (DIC) de bajo costo, con el propósito de medir campos de desplazamiento en vigas de concreto reforzado sometidas a flexión, así como en probetas de otros tipos, como prismas de mampostería, barras o cilindros de concreto, bajo ensayos de tracción o compresión. La metodología se estructuró en cuatro fases: i) preparación del montaje para los ensayos, y calibración de la cámara DSLR, ii) ejecución del ensayo, que incluyó la aplicación de un patrón aleatorio de puntos de alta densidad y la captura sincrónica de secuencias fotográficas durante el ensayo; iii) procesamiento de las imágenes mediante el software libre NCORR con el fin de obtener campos de desplazamiento; y iv) validación del sistema, mediante la comparación de los resultados obtenidos con el sistema DIC frente a las lecturas proporcionadas por deformímetros electrónicos y el transductor interno de la máquina universal.

Los resultados confirman que esta metodología, junto con un montaje de bajo costo —es decir, sin necesidad de cámaras de alta resolución ni sistemas complejos—, permite realizar mediciones confiables y precisas. Asimismo, ofrece mayor cantidad de información que la instrumentación convencional, ya que permite obtener campos de desplazamiento en lugar de mediciones puntuales. Esta capacidad facilita un análisis más detallado de la evolución del agrietamiento y de las deformaciones unitarias, por lo que el sistema propuesto se presenta como una alternativa viable, eficiente y asequible para su implementación en laboratorios académicos.

Palabras clave: Correlación digital de imágenes, DIC, procesamiento de imágenes, vigas, concreto.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos convencionales de medición de desplazamientos y deformaciones, que incluyen LVDTs, potenciómetros y galgas extensométricas, presentan limitaciones significativas. Estos sistemas no solo demandan una extensa cantidad de conexiones y equipos adicionales, sino que también ofrecen datos limitados a puntos específicos y en una sola dirección, aumentando así los costos y el tiempo de instalación [1, 2]. En el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, la ausencia de un sistema de medición de desplazamientos y deformaciones resalta la necesidad de implementar métodos confiables a bajo costo.

La implementación de un sistema de correlación digital de imágenes (DIC) en dos dimensiones (2D) utilizando cámaras DSLR y software libre ofrece una solución viable y económica para superar estas limitaciones. Esta metodología no solo reduce los costos en comparación con los sistemas comerciales disponibles, sino que también mejora la precisión de las mediciones, al proporcionar campos de desplazamientos y no solo mediciones puntuales. Esto genera un panorama completo del comportamiento estructural en toda la superficie visible del elemento ensayado. Estudios previos han demostrado que la DIC puede ofrecer datos detallados y fiables, comparables a los obtenidos mediante sensores tradicionales, pero con la ventaja de ser una técnica sin contacto directo [3, 4].

El desarrollo de un sistema de DIC 2D accesible y eficiente es especialmente relevante en las campañas experimentales de investigación. Los sistemas comerciales de DIC, como los ofrecidos por Correlated Solutions y otras compañías, aunque altamente precisos, son excesivamente costosos y de código cerrado, lo que limita su accesibilidad para muchos laboratorios y estudiantes [13]. Por otro lado, soluciones que brindan programas como NCORR y DuoDIC, son de código libre, lo que permite el desarrollo de proyectos como este, en el cual se busca una solución económica y confiable para mediciones experimentales. No obstante, estas aplicaciones también presentan algunas limitaciones en términos de funcionalidad y facilidad de uso, especialmente en casos que requieren análisis tridimensionales más detallados.

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar y validar un sistema de DIC 2D de bajo costo, utilizando cámaras DSLR de alta resolución, como la Canon EOS 70D o similares, y software de

procesamiento de imágenes de código abierto. La implementación de este sistema permitirá medir desplazamientos en múltiples puntos de la superficie de los elementos estructurales por ensayar. Esto ayudará a caracterizar su respuesta ante la aplicación de cargas. Además, se espera que este sistema facilite el ajuste de modelos de elementos finitos y la validación experimental en el análisis estructural [4, 6].

La metodología propuesta para el desarrollo del sistema incluye además del uso de códigos libres para la calibración de las cámaras y el procesamiento de las imágenes, la instalación y configuración de un montaje experimental para la toma de las fotografías, la ejecución de ensayos en vigas de concreto reforzado, y la validación de los resultados obtenidos mediante la comparación con mediciones de sensores convencionales. También, se pretende proporcionar una guía detallada para su implementación no solo en el laboratorio de estructuras, sino en mediciones que requieran otros laboratorios de la FIC.

2. DESCRIPCIÓN

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los ensayos de elementos estructurales, la obtención de mediciones precisas de variables como desplazamientos, cargas y deformaciones es fundamental para comprender el comportamiento de las estructuras. Tradicionalmente, se utilizan sensores electrónicos como LVDTs, potenciómetros, galgas extensométricas y deformímetros digitales, que requieren múltiples sistemas de adquisición, cableados extensos (Figura 1), además de personal altamente calificado. Esto resulta en procesos costosos, dispendiosos y que consumen tiempo. Adicionalmente, estos métodos tienen la limitación de proporcionar información solo en puntos específicos y únicamente en la dirección del sensor. También, los rangos de desplazamiento que se pueden medir son limitados, ya que en casos de grandes desplazamientos los sensores o soportes pueden deformarse y causar errores en las mediciones [7, 9].

La correlación digital de imágenes en dos dimensiones ofrece una alternativa sin contacto, permitiendo medir campos de desplazamiento en toda la superficie de interés. Sin embargo, los sistemas comerciales de DIC son costosos y de código cerrado, lo que los hace inaccesibles para muchos laboratorios. Por lo tanto, es necesario desarrollar un sistema de DIC 2D de bajo costo, utilizando cámaras DSLR y software libre, que proporcione datos completos y precisos sobre el comportamiento estructural, superando las limitaciones, costos y tiempos de instrumentación de los métodos tradicionales y comerciales [8, 9, 10].

FIGURA 1. *Instrumentación de un muro de concreto reforzado con más de 30 sensores (potenciómetros, LVDT's, galgas) [25].*



En el laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, se está planeando la ejecución de ensayos experimentales en elementos como muros, vigas, conexiones metálicas, entre otros. Sin embargo, la ausencia de sensores para medir desplazamientos o deformaciones unitarias impulsa la necesidad de implementar un sistema que facilite la medición de campos de desplazamiento y, en lo posible, de deformaciones unitarias de manera económica. Un sistema de este tipo permitirá obtener información en muchos puntos de las probetas en tiempo real, lo que facilitará la comparación con las mediciones convencionales y proporcionará redundancia en las mediciones experimentales [2, 5]. La ventaja de contar con datos de campos de desplazamientos, en contraste con las mediciones locales o de un solo punto obtenidas con sensores convencionales, radica en la capacidad de capturar información detallada sobre el comportamiento estructural en toda la superficie de interés. Este tipo de sistemas, como el DIC, ofrecen una alta precisión en los resultados. Además, la implementación de sistemas de bajo costo utilizando cámaras relativamente económicas y software libre facilita el acceso a estas tecnologías avanzadas, permitiendo que más laboratorios puedan beneficiarse de sus ventajas sin incurrir en altos costos [2].

Por lo expuesto anteriormente, surge la siguiente pregunta:

¿Cómo implementar un sistema de correlación digital de imágenes en 2D de bajo costo para medir campos de desplazamiento en ensayos de carga en el laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca?

2.2. OBJETIVOS

2.2.1. Objetivo general

Implementar un sistema de correlación digital de imágenes (DIC) en 2D para la medición de campos de desplazamiento en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

2.2.2. Objetivos Específicos

- Implementar un montaje y procedimiento para la medición de campos de desplazamiento con DIC 2D.
- Realizar ensayos de flexión en probetas de vigas de concreto reforzado para probar y calibrar el sistema de DIC 2D.
- Validar la medición de campos de desplazamiento con DIC 2D, comparando los resultados obtenidos con los datos medidos por sensores tradicionales.
- Generar un manual de instrucciones para facilitar el uso de sistema de medición.

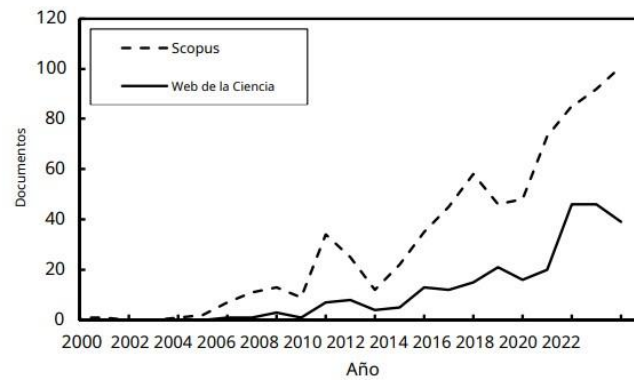
3. JUSTIFICACIÓN

En el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, actualmente no se cuenta con un sistema de medición de desplazamiento o deformaciones robusto y confiable para realizar ensayos experimentales en elementos estructurales. La ausencia de un sistema adecuado impide la obtención de datos completos y detallados sobre el comportamiento mecánico de los materiales, limitando la capacidad de los investigadores para llevar a cabo análisis exhaustivos y afectando la calidad de los resultados experimentales. Los métodos tradicionales, como el uso de sensores LVDTs y potenciómetros, requieren múltiples conexiones, sistemas complejos de adquisición de datos y proporcionan mediciones limitadas a puntos específicos. Esto no solo incrementa los costos y el tiempo necesario para cada ensayo, sino que también reduce la precisión y la representatividad de los resultados obtenidos [9].

Una de las alternativas más avanzadas para la medición de desplazamientos y deformaciones es la Correlación Digital de Imágenes, que permite obtener datos de toda la superficie de los elementos ensayados sin contacto directo. Sin embargo, los sistemas comerciales de DIC, como aquellos ofrecidos por empresas como Correlated Solutions, Dantec Dynamics, entre otros, son extremadamente costosos, con precios que pueden superar los 35,000 USD. Estos costos incluyen tanto el software como el hardware especializado, lo que los hace inaccesibles para muchos laboratorios académicos y de investigación, especialmente en contextos con recursos limitados. Este alto costo se convierte en una barrera significativa, impidiendo la adopción de tecnologías avanzadas en instituciones educativas que buscan mejorar la calidad de sus investigaciones y la formación de sus estudiantes [13, 14].

La correlación digital de imágenes ha transformado las mediciones al simplificar la captura del campo de deformaciones de una muestra. Su creciente popularidad y efectividad se evidencia en el respaldo de numerosos fabricantes, desarrolladores y usuarios. La Figura 2, muestra cómo ha aumentado el uso de DIC para aplicaciones civiles entre 2010 y 2020, según Web of Science y Scopus [12].

FIGURA 2. *Número de artículos de investigación indexados en las bases de datos de web of science o scopus [12].*



La implementación de este sistema no solo optimizará los recursos del laboratorio, sino que también fortalecerá la capacidad investigativa y contribuirá al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería civil.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. ANTECEDENTES

La técnica de correlación digital de imágenes (DIC) se ha desarrollado significativamente desde sus inicios en la década de 1970. Terrence J. Keating, Paul R. Wolf, Frank L. Scarpace [15]. mejoraron los métodos iniciales de correlación digital de imágenes, permitiendo la aplicación práctica de esta técnica para medir desplazamientos y deformaciones con mayor precisión y fiabilidad. Este avance inicial fue crucial para establecer la base de la técnica de DIC, que ha sido ampliamente adoptada en diversas disciplinas de la ingeniería. Posteriormente, Sutton, Orteu, y Schreier proporcionaron una base fundamental para la técnica, detallando su aplicación para la medición de formas, movimiento y deformaciones. Este trabajo ha sido esencial para la estandarización y expansión de DIC en diferentes campos, lo que ha permitido su adopción generalizada y su constante evolución [6].

En la década de 1980, Sutton y sus colegas mejoraron estos métodos y demostraron la aplicación de DIC para analizar rotaciones y deformaciones en sólidos. Sus investigaciones pioneras mostraron que la DIC podría utilizarse para obtener mediciones precisas de desplazamientos en una variedad de materiales y estructuras, abriendo nuevas oportunidades para la investigación experimental en mecánica de sólidos [6]. Desde entonces, la técnica ha evolucionado significativamente, consolidándose como una herramienta fundamental en la mecánica experimental de materiales y estructuras. Blaber, Adair y Antoniou desarrollaron Ncorr, un software de código abierto en MATLAB que facilita la correlación digital de imágenes en 2D, ofreciendo una alternativa accesible y eficiente a los costosos programas comerciales, democratizando así el acceso a esta poderosa técnica [4, 6, 16].

El uso de DIC ha evolucionado para incluir la medición de campos de deformación tanto térmicos como mecánicos. Nowak y Maj demostraron la integración de DIC con termografía infrarroja para determinar campos mecánicos y térmicos acoplados, ampliando las aplicaciones de la técnica en el análisis estructural y ofreciendo nuevas posibilidades para el estudio de materiales bajo condiciones térmicas variables [17].

En el ámbito de la ingeniería civil, Lu, Cui, y Teng utilizaron operadores de detección de bordes para el monitoreo de desplazamientos y deformaciones estructurales, demostrando la efectividad de DIC en el análisis de grandes infraestructuras. Esta técnica permitió obtener datos

detallados y precisos sobre el comportamiento de estructuras bajo diversas condiciones de carga, lo que es esencial para la evaluación y mantenimiento de infraestructuras críticas [18]. La técnica también ha sido aplicada para estudiar el comportamiento de elementos estructurales bajo diversas condiciones de carga. Leibovich, Yankelevsky, y Dancygier utilizaron DIC para analizar desplazamientos y deformaciones locales en pruebas de arrancamiento, proporcionando datos detallados sobre el comportamiento del material en situaciones de estrés, lo que es crucial para el diseño y análisis de elementos estructurales [19].

Musiał, Nowak, y Maj aplicaron DIC para determinar campos de esfuerzo, mostrando cómo la técnica puede ser utilizada para obtener datos precisos y detallados sobre el comportamiento mecánico de materiales bajo carga, contribuyendo al desarrollo de modelos más precisos y fiables para el análisis estructural. Niu et al. desarrollaron campos de deformación a lo largo de grietas en concreto de ultra alto rendimiento reforzado con fibras (UHPFRC) utilizando DIC, lo que subraya la capacidad de la técnica para analizar materiales avanzados y mejorar nuestra comprensión de su comportamiento bajo carga [20, 21].

En el contexto de ensayos estructurales, Harenberg et al. emplearon DIC para medir deformaciones en prismas de concreto de ultra alto rendimiento bajo esfuerzos estáticos y cíclicos, validando la precisión y utilidad de DIC en aplicaciones estructurales avanzadas. Este estudio demostró que DIC puede proporcionar datos valiosos sobre el comportamiento de materiales de alta resistencia, lo que es crucial para el desarrollo de nuevas aplicaciones estructurales. Sieffert et al. realizaron mediciones de campo completo durante ensayos en una mesa vibratoria de una estructura de madera rellena de piedras y tierra, demostrando la aplicabilidad de DIC en estudios de comportamiento dinámico de estructuras y proporcionando datos cruciales para el diseño y análisis de estructuras bajo condiciones sísmicas [22,23].

4.2. ESTADO DEL ARTE

La correlación digital de imágenes es una técnica óptica no destructiva que permite medir desplazamientos y deformaciones de superficies mediante el análisis de imágenes digitales capturadas antes y después de aplicar una carga. Esta técnica, desarrollada y perfeccionada a lo largo de las últimas décadas, se basa en algoritmos que comparan patrones de puntos en las imágenes para calcular desplazamientos y deformaciones, proporcionando datos detallados sobre el comportamiento mecánico de los materiales y estructuras. La obra de Sutton, Orteu, y Schreier

ofrece una base comprensiva sobre los principios teóricos y aplicaciones prácticas de la DIC, destacando su capacidad para capturar deformaciones en tiempo real, lo que la hace ideal para el monitoreo de estructuras bajo carga [6].

Desde sus inicios, la DIC ha experimentado mejoras significativas. Justin Blaber desarrolló Ncorr, un software de código abierto en MATLAB, que ha democratizado el acceso a la DIC 2D. Ncorr ofrece una interfaz gráfica de usuario accesible e intuitiva, utilizando algoritmos optimizados mediante el uso de C++/MEX para el cálculo intensivo, y herramientas de trazado para la creación de figuras. Este software permite realizar análisis de DIC 2D con alta precisión y flexibilidad, lo que lo hace ideal para aplicaciones educativas y de investigación en entornos con recursos limitados. Sin embargo, Ncorr está limitado a mediciones en dos dimensiones, lo que puede ser una restricción en aplicaciones que requieren análisis tridimensionales más detallados [5, 16].

Por otro lado, Correlated Solutions ofrece software avanzado para DIC, como VIC-2D y VIC-3D, que son altamente valorados por su precisión y robustez en la medición de desplazamientos y deformaciones. Estos programas, aunque excelentes en desempeño, tienen un costo muy elevado, lo que puede ser prohibitivo para laboratorios con presupuestos limitados [13]. La inversión en estos sistemas incluye no solo el software, sino también el hardware especializado, lo que aumenta significativamente el costo total de implementación. Este factor económico puede ser una barrera para su adopción en instituciones con menores recursos, limitando su accesibilidad a laboratorios de investigación más grandes y mejor financiados.

Para abordar estas limitaciones económicas, Devan Atkinson y Thorsten Hermann Becker desarrollaron un marco teórico para la DIC en 2D y un código abierto modular en MATLAB. Este código ha sido validado y muestra un rendimiento a la par con los softwares comerciales, lo que lo hace suficientemente fiable para su uso práctico. Su diseño modular facilita la adaptación y expansión, sirviendo como recurso educativo y base para el desarrollo de capacidades avanzadas en DIC. Este enfoque modular permite que investigadores y estudiantes adapten y amplíen el software según sus necesidades específicas, promoviendo la innovación y el desarrollo continuo en este campo [4].

Dana Solav y su equipo en el Technion han contribuido significativamente al desarrollo de herramientas DIC en 3D con el lanzamiento de MultiDIC y DuoDIC, ambos sistemas de código abierto en MATLAB. MultiDIC permite una rápida calibración y fusión de datos de múltiples

cámaras, mientras que DuoDIC integra Ncorr para reconstruir superficies 3D a partir de imágenes estéreo. Aunque estas herramientas son poderosas, enfrentan desafíos significativos en el procesamiento de datos, especialmente debido a la carga secuencial de imágenes ("lazy loading"), que puede hacer que el análisis sea lento y tedioso para grandes conjuntos de datos. Este tipo de carga de imágenes una por una puede ser una limitación significativa cuando se trabaja con volúmenes de datos elevados, afectando la eficiencia y velocidad del procesamiento [16].

En el ámbito de la ingeniería civil, la DIC 2D ha demostrado ser una herramienta invaluable para el análisis y monitoreo de estructuras. Franco et al. exploró el uso de cámaras de bajo costo para realizar mediciones estáticas y dinámicas de desplazamientos en estructuras, utilizando técnicas de RGB-D-DIC. Estos estudios demostraron que es posible obtener datos precisos y fiables con sistemas de bajo costo, comparables a los resultados obtenidos con sensores tradicionales. Esta accesibilidad económica permite a más laboratorios implementar estas técnicas, ampliando la capacidad de monitoreo y análisis estructural sin necesidad de grandes inversiones [3].

En la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, se desarrolló un sistema 2D DIC compuesto por una cámara DSLR Nikon D3400 y un lente AF-S DX Nikkor 18-105 mm, junto con lámparas LED para iluminación y el software GOM Correlated. Este sistema permitió describir el comportamiento de diferentes polímeros, comparando favorablemente con los resultados obtenidos mediante extensómetros. Los resultados demostraron que un sistema de bajo costo puede proporcionar datos precisos y detallados sobre el comportamiento mecánico de los materiales, validando su uso en contextos académicos y de investigación con recursos limitados [24].

A pesar de sus numerosas ventajas, la DIC 2D presenta ciertos desafíos y limitaciones. Los sistemas comerciales de DIC, como los ofrecidos por Correlated Solutions, pueden ser prohibitivamente costosos. Además, la precisión de las mediciones de DIC puede verse afectada por factores como la calidad de las imágenes capturadas y las condiciones ambientales durante los ensayos. Factores como la iluminación, la estabilidad de la cámara y la calidad de los patrones de puntos son cruciales para obtener resultados precisos y confiables. La implementación de Ncorr, aunque gratuita y accesible, está limitada a mediciones en 2D, lo que puede ser una limitación para estudios que requieren un análisis tridimensional más detallado [5].

DuoDIC, aunque es una herramienta robusta y flexible para DIC 3D, enfrenta el desafío de la carga secuencial de imágenes, lo que puede ser una desventaja significativa especialmente cuando se trabaja con grandes volúmenes de datos. Este desafío subraya la importancia de seleccionar y configurar adecuadamente el sistema de DIC según las necesidades específicas del estudio y los recursos disponibles. La optimización de la carga y procesamiento de imágenes es esencial para manejar grandes conjuntos de datos de manera más eficiente [16].

Las tendencias actuales en la DIC incluyen el desarrollo de sistemas de bajo costo y la integración de software de código abierto que permita una mayor accesibilidad y flexibilidad en su uso. Atkinson y Becker presentaron un código de DIC 2D en MATLAB que es fácil de usar y modular, facilitando su adaptación a diferentes necesidades experimentales. Este tipo de desarrollo permite a los investigadores personalizar y mejorar el software según sus necesidades, fomentando la colaboración y el avance tecnológico en el campo [4].

4.3. MARCO TEÓRICO

4.3.1. Correlación subset-based

Las raíces matemáticas de la DIC descansan en la maximización de una métrica de similitud entre pequeñas ventanas —*subsets*— extraídas de dos imágenes: la de referencia, capturada antes de aplicar carga, y la deformada [26]. En la formulación clásica se emplea la función ZNSSD, cuyas propiedades de invarianza frente a cambios globales de iluminación reducen la sensibilidad al ruido. El proceso consiste en hallar, para cada subset, el vector de desplazamiento $\mathbf{u}$ que minimiza la distancia estadística entre intensidades. Un algoritmo tipo *coarse-fine* inicializa la búsqueda con un *cross-correlation* en malla gruesa y la refina mediante Newton-Raphson, garantizando convergencia cuadrática [27].

Pan et al. introdujeron el criterio *Reliability-Guided DIC* (RGDIC), que encadena el cálculo siguiendo un gradiente de confianza de modo análogo a como el agua busca el cauce más seguro: primero se resuelven las regiones con textura de alta entropía y después se propagan a las menos confiables, reduciendo la probabilidad de falsos máximos [28]. Ello permitió abordar superficies reducidas de contraste sin necesidad de repintar el patrón.

El advenimiento del código abierto a catalizado una adopción masiva ya que, —desarrollado originalmente en MATLAB y liberado bajo licencia GPL— amalgama las mejoras

algorítmicas propuestas durante dos décadas y ofrece al investigador una “caja de herramientas” que se integra sin fricciones a flujos de trabajo experimentales y de validación numérica [29]. La filosofía *open-source* no solo abarata costos: también democratiza la innovación y hace posible que laboratorios con presupuestos austeros, como el de la FIC, se sumen a la frontera del conocimiento.

Finalmente, investigaciones recientes exploran la hibridación con aprendizaje profundo. StrainNet-LD aplica redes convolucionales para inferir desplazamientos de gran amplitud en tiempo real, conciliando robustez y velocidades de cuadro compatibles con ensayos dinámicos [8]. Aunque su madurez industrial aún es incipiente, abre una senda hacia “cámaras inteligentes” que integren correlación *on-chip*.

4.3.2. Cinemática y mecánica del continuo

Medir desplazamientos sería un ejercicio estético si no se tradujera en deformaciones y tensiones con significado físico. La teoría cinemática del continuo establece la cartografía entre el campo vectorial $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ y el tensor de deformación ϵ , ya sea en pequeño o gran desplazamiento. En régimen infinitesimal, las componentes ϵ_{ij} se obtienen como simetría del gradiente $\partial u_i / \partial x_j$; sin embargo, las estructuras civiles suelen experimentar no linealidades geométricas de segundo orden, sobre todo cerca de la falla. Por ello, el tratamiento de grandes deformaciones recurre al tensor de Green-Lagrange, preservando objetividad y permitiendo la conexión con formulaciones de elementos finitos [27].

El reto práctico radica en calcular derivadas espaciales a partir de campos discretos sometidos a ruido de cuantificación. La literatura aconseja filtros de derivación Savitzky-Golay y regularización Tikhonov para suavizar sin borrar singularidades —como fisuras— cuya firma matemática se asemeja al relámpago que fractura el cielo en una tormenta veraniega. Estudios de fatiga en vigas de concreto demostraron la capacidad de la DIC para captar la nucleación de microgrietas mucho antes de que resulten visibles a simple vista; ello se traduce en curvas S-N con menor dispersión y diagnósticos de vida útil más confiables [10].

Los ensayos *off-axis* añaden complejidad: cuando el plano de la cámara no es paralelo al de la probeta aparecen componentes de desplazamiento ficticias. Un modelo de distorsión proyecto-afin, calibrado sobre marcadores geométricos, permite corregir esa “mirada oblicua” y

volver a un campo pseudo-plano con errores inferiores al 1 % de la amplitud total [30]. De esa manera, la DIC se convierte en un “láser sin rayo” que mide sin tocar y sin interferir con la física del fenómeno.

4.3.3. Fotogramétrica de calibración de cámara

Antes de que la correlación comience, la cámara debe ser “desnudada” de sus imperfecciones ópticas. La teoría fotogramétrica concibe el sensor como un modelo de *pinhole* complementado por distorsiones radial y tangencial. Zhang propuso en 1999 un método flexible que emplea un tablero ajedrezado visto desde múltiples orientaciones; el algoritmo resuelve en forma cerrada la matriz de homografías y extrae los parámetros intrínsecos con exactitud decimétrica [31]

En aplicaciones estructurales, la distancia entre cámara y objeto puede superar el metro y las lentes DSLR introducen aberraciones dependientes de la apertura. Por tanto, se recomienda recalibrar *in situ* con la apertura y la distancia de enfoque finales: la cámara debe “confesar” sus sesgos en las mismas condiciones en que se le pedirá ver con claridad. Buenas prácticas recopiladas por Reu subrayan la importancia de la relación $f/\#$ para maximizar la profundidad de campo sin sacrificar nitidez, así como la necesidad de fijar ISO y tiempo de exposición para garantizar linealidad radiométrica [32]

La calibración se extiende a la sincronización temporal cuando se emplean dos cámaras en estéreo o vídeo de alta velocidad. El retardo entre disparos actúa como un “tic nervioso” que distorsiona la coherencia entre cuadros; por ello se utiliza un generador de pulsos o un flash común como latigazo lumínico para alinear cronologías. Una vez calibrado el sistema, la proyección inversa de píxeles a coordenadas físicas se vuelve trivial, y los desplazamientos pueden expresarse en milímetros.

4.4. MARCO CONCEPTUAL

4.4.1. Correlación digital de imágenes (DIC)

La técnica DIC compara una imagen tomada antes del ensayo con otra capturada después de aplicar carga, identificando pequeños desplazamientos mediante el análisis de zonas (subsets) que se rastrean entre ambas imágenes. Para asegurar precisión, se utiliza el coeficiente ZNSSD, que es resistente a cambios en la iluminación.

$$ZNSSD = \sum_{i=1}^N [(I_r(i) - \bar{I}_r) - (I_d(i + u) - \bar{I}_d)]^2$$

La Correlación Digital de Imágenes (DIC) estima desplazamientos evaluando la similitud entre pequeñas subregiones (subsets) de una imagen de referencia y su contraparte deformada. Esta similitud se mide con el coeficiente ZNSSD, robusto frente a variaciones de iluminación. Una vez identificada la zona de mayor coincidencia, el vector de desplazamiento se refina mediante interpolaciones bicúbicas y el algoritmo de Newton-Raphson, alcanzando precisión subpíxel ($\approx 0,01$ px). Con calibraciones apropiadas, esto permite detectar deformaciones del orden de micras. La DIC, por tanto, ofrece una alternativa no invasiva y altamente resolutive para análisis estructurales, siempre que se controle rigurosamente el enfoque, la iluminación y el patrón aplicado sobre la superficie.

4.4.2. Patrón speckle

Para garantizar una correlación robusta, el patrón aplicado debe ser aleatorio, pero con suficiente contraste para que cada subset contenga características únicas. Se recomienda que los puntos tengan un diámetro medio de 3 a 5 píxeles, con una distribución uniforme de niveles de gris y una relación área negra/área blanca cercana al 50 %. Esto maximiza la información útil y mejora la sensibilidad del algoritmo

4.4.3. Subset y step size

El subset es una ventana cuadrada de tamaño $s \times s$ píxeles que se desplaza entre imágenes para calcular el campo de deformaciones. Su tamaño afecta directamente la precisión: subsets grandes reducen el ruido estadístico, pero sacrifican resolución espacial, mientras que subsets pequeños detectan detalles finos (como fisuras), aunque incrementan la incertidumbre. Para hormigón estructural, valores típicos van desde $s=31$ px (estándar) hasta $s=51$ px para superficies rugosas. El *step size* define la distancia entre centros de subsets; una buena práctica es establecerlo en un 25 % del subset para garantizar solapamiento adecuado y evitar zonas no correlacionadas.

Desde el enfoque numérico, cada subset genera una matriz Hessiana que condiciona la convergencia del método de Newton-Raphson. Patrones con buena textura generan matrices bien condicionadas, permitiendo usar subsets más pequeños. En materiales homogéneos o con bajo contraste, puede ser necesario ampliar s o aplicar enfoques globales de correlación con

regularización espacial. El procesamiento moderno puede beneficiarse de aceleración por GPU, reduciendo significativamente los tiempos de análisis incluso en conjuntos grandes de imágenes.

4.4.4. Campo de desplazamientos 2D

Una vez cada subset halla su “doble” en la imagen deformada, los vectores $u(x, y)$ se ensamblan en un tapiz continuo que describe cómo la superficie del material se ha movido. En un ensayo de flexión a cuatro puntos, por ejemplo, el perfil vertical del desplazamiento central revela la curvatura y, al derivarse dos veces, conduce al momento flector por la famosa ecuación elástica $M = EI\kappa$. Pero la utilidad del campo 2D va más allá: permite identificar zonas rígidas, localizar la aparición de rotulas plásticas y, apoyado en filtros de gradiente, detectar el comportamiento temprano en una grieta antes de que sea visible.

4.4.5. Calibración y corrección off-axis

El ojo de la cámara distorsiona: el centro óptico rara vez coincide con el centro geométrico, las lentes convexas inflan las líneas rectas y la distancia focal varía con la temperatura. La calibración intrínseca —focal f , punto principal (c_x, c_y) , coeficientes de distorsión radial k_1, k_2, k_3 y tangencial p_1, p_2 — se resuelve mediante el método de Zhang y se extraen homografías H_i . La ecuación

$$A = K [R \mid t]$$

relaciona la matriz de cámara K con la rotación R y la traslación t . Minimizando el error reproyectado se obtienen K y los parámetros de distorsión. Una vez conocida la óptica, se pasa a la calibración extrínseca: se alinea el sistema de coordenadas de la probeta con el de la imagen mediante una homografía que, en el caso 2D, se ajusta con cuatro puntos no colineales sobre la superficie del espécimen.

Cuando la cámara no puede situarse normal al plano —por obstrucción de actuadores, por ejemplo— aparece el efecto *off-axis*: el píxel ya no es cuadrado en la métrica del objeto. La transformación proyecto-afín se corrige aplicando

$$[x', y', 1]^T = H [x, y, 1]^T,$$

donde H se estima con marcadores geométricos adheridos a la superficie. La incertidumbre final depende de la relación distancia-focal-píxel y suele quedar por debajo de 0,5 %. Para

sincronizar disparos múltiples se emplea un flash estroboscópico como “latigazo cero” y se mide el *jitter* relativo; con cámaras Canon EOS serie-D esa fluctuación es <2 ms, suficiente para ensayos quasi-estáticos [31] [32].

5. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló en cuatro fases, como se describe a continuación:

5.1. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DIC 2D

El proyecto inició con la selección y revisión de la cámara fotográfica y los lentes disponibles. Para este estudio se utilizó una cámara DSLR Canon EOS 70D, conectada mediante USB 2.0 y operada de forma remota. La cámara se montó sobre un soporte con nivel esférico, lo que permitió realizar ajustes finos en dos direcciones y asegurar su alineación precisa con el objeto de estudio.

La captura de imágenes se realizó mediante el software gratuito EOS Utility, el cual permite controlar de manera remota las funciones de disparo de la cámara desde un computador o tableta. Se configuró una frecuencia de captura de una imagen cada 5 segundos, intervalo que resultó adecuado para registrar el comportamiento cuasi estático de las vigas durante los ensayos hasta la falla. Las imágenes se almacenaron directamente en formato JPEG de alta calidad en una carpeta específica del equipo de trabajo, para su posterior procesamiento en el software NCORR.

Aunque el sistema de captura no estaba sincronizado electrónicamente con la máquina universal Shimadzu, fue posible comparar los resultados de desplazamiento obtenidos mediante DIC con los registros de los sensores tradicionales. Esto se logró mediante una correlación temporal, filtrando los datos de la máquina en intervalos de 5 segundos —coincidentes con la frecuencia de captura de las imágenes— lo que permitió alinear ambos conjuntos de datos para su análisis conjunto.

5.2. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

La calibración del sistema, o puesta a punto del montaje, se llevó a cabo mediante pruebas piloto que permitieron identificar y realizar los ajustes necesarios para optimizar la instalación y asegurar la confiabilidad de las mediciones. Estas pruebas facilitaron la verificación y ajuste de

aspectos críticos del sistema de captura, tales como la estabilidad del soporte de la cámara, la uniformidad en la iluminación, y la configuración adecuada de los parámetros de la cámara, incluyendo la sensibilidad ISO, la apertura del diafragma, la velocidad de obturación, el enfoque manual y la activación de la función de reducción de ruido por larga exposición.

5.3. ELABORACIÓN DEL MANUAL DE USUARIO

A partir de la configuración óptima del sistema y de los procedimientos validados durante la fase experimental, se elaboró un manual de usuario en formato PDF que permite replicar el proceso completo de análisis con el software libre NCORR. El documento está organizado en dos grandes secciones: Preprocesamiento y Procesamiento.

En la sección de Preprocesamiento se incluyen los requerimientos del sistema, tanto del software NCORR como del entorno de MATLAB, así como las instrucciones detalladas para su instalación y configuración (incluyendo la vinculación con compiladores mediante MEX).

La sección de Procesamiento describe de forma cronológica y clara cada uno de los pasos necesarios para realizar un análisis completo de deformaciones con DIC, comenzando con la selección de la imagen de referencia y la carga de imágenes del ensayo. Se detalla el proceso de definición de la región de interés (ROI), configuración de parámetros clave como el tamaño del subset, criterios de correlación y análisis en condiciones específicas (como grandes deformaciones o discontinuidades). Posteriormente, se describen los pasos para realizar el análisis DIC, calcular desplazamientos y deformaciones, y finalmente, generar gráficas e informes exportables de los resultados.

El manual incluye también explicaciones visuales, recomendaciones prácticas, y scripts en C++ para la extracción automática de datos y su posterior análisis en hojas de cálculo.

6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES

6.1. ENSAYOS PRELIMINARES PARA DEFINIR LAS CONDICIONES DEL SISTEMA

En los ensayos preliminares iniciales, se evaluaron dos vigas de concreto reforzado con el objetivo de determinar los parámetros adecuados para el montaje del sistema. En estas pruebas se utilizaron deformímetros analógicos para registrar los desplazamientos, lo que permitió establecer una referencia comparativa para los ensayos posteriores con el sistema DIC. Además, estos ensayos fueron cruciales para el reconocimiento y ajuste del sistema, así como para familiarizarse con el software NCORR utilizado en el procesamiento de imágenes. Esto facilitó el manejo del sistema DIC en las pruebas definitivas.

Posteriormente, dentro del marco de una práctica académica del curso de concreto armado, se ensayaron ocho vigas. Al igual que en los ensayos preliminares, se utilizaron deformímetros analógicos para medir los desplazamientos como se muestra en la Figura 3. Los datos obtenidos en estos ensayos, junto con los resultados de las pruebas preliminares iniciales, fueron fundamentales para ajustar y mejorar los parámetros del montaje y asegurar la viabilidad del sistema.

FIGURA 3. *Ensayos preliminares del curso de concreto armado.*



Continuación Figura 3.



Una vez definidos y mejorados estos parámetros, se procedió a realizar dos ensayos preliminares finales, los cuales fueron esenciales para evaluar la posición de la cámara fotográfica y realizar los ajustes finales. En total se realizaron 12 pruebas preliminares, antes de los ensayos definitivos.

A continuación, se describen brevemente algunos detalles de la ejecución de las pruebas preliminares. Inicialmente, se construyeron dos vigas de concreto reforzado, se pintaron de blanco en una de sus caras y se aplicó manualmente un patrón aleatorio de puntos negros sobre su superficie. Estas vigas fueron sometidas a un ensayo de flexión, con carga aplicada en el centro de la luz mediante la máquina universal, con el objetivo de observar su comportamiento y registrar sus desplazamientos. La carga se aplicó de manera controlada durante un tiempo moderado, de tal forma que fuera posible realizar la toma de fotografías. En el primer ensayo, se tomaron un total de 60 imágenes, con intervalos de 5 segundos entre cada captura, para una duración total de 5 minutos. En la Figura 4 se muestran detalles del montaje preliminar. Cabe anotar que en las pruebas preliminares la carga se registró mediante un anillo de carga calibrado y certificado, posteriormente, ya fue posible usar el sensor de carga de la máquina, puesto que se implementó, por parte de los estudiantes del programa de Ingeniería Automática Industrial, una adecuación para automatizar el registro de los datos de carga y desplazamiento para este equipo.

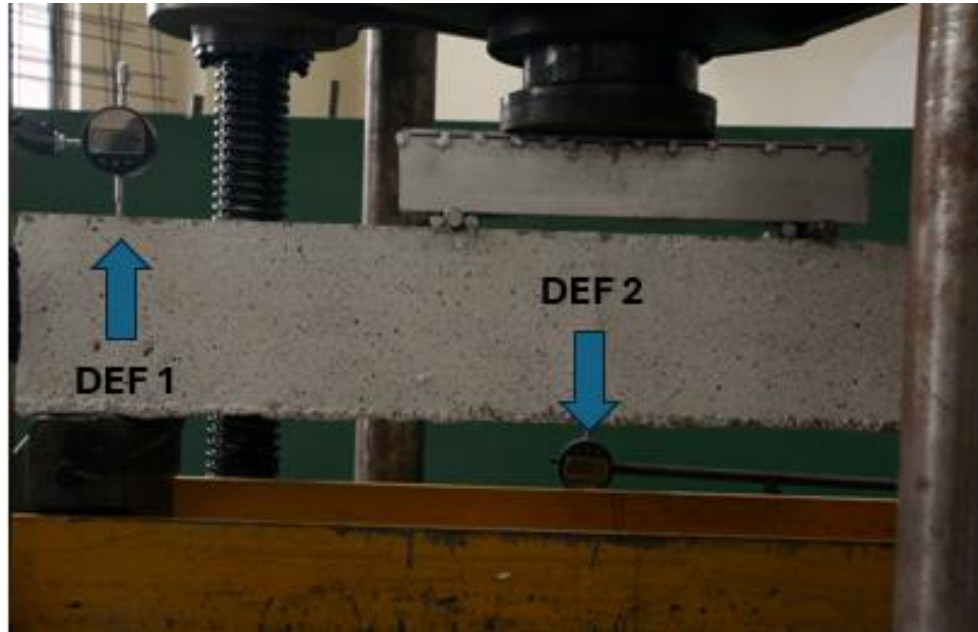
FIGURA 4. Pruebas preliminares de medición de desplazamientos con DIC, en el laboratorio de estructuras. a) patrón de puntos, b) prueba de carga, c) falla de la viga.



En los ensayos preliminares finales, correspondientes a las dos últimas vigas que se ensayaron antes de las probetas definitivas, ya se usó el sistema mejorado de adquisición de datos de la máquina universal. Estas probetas se denominaron 1.1 y 1.2. El ensayo de la primera probeta aportó información valiosa y sus resultados ayudaron a realizar los ajustes definitivos y permitieron tomar la decisión de desarrollar los ensayos finales. En la segunda de estas, correspondiente a la viga 1.2, se presentaron varios inconvenientes que comprometieron la calidad de los datos. Durante el ensayo, el perfil metálico ubicado en la parte inferior del montaje obstruyó la visibilidad del deformímetro central (DEF 2) a medida que la máquina aplicaba la carga. Además, al revisar la secuencia de imágenes capturadas, se evidenció que los deformímetros se apagaron de manera inesperada, lo que generó registros erróneos con valores negativos. En la

Figura 5 se muestra el procedimiento y el montaje utilizados en estas dos pruebas preliminares finales.

FIGURA 5. *Montaje ensayos preliminares finales (Vigas 1.1 y 1.2).*



De acuerdo con los resultados de las pruebas preliminares, se confirmó la importancia de realizar una adecuada medición de los desplazamientos mediante sensores tradicionales. Por ello, se mejoró la ubicación y el soporte de los deformímetros, para garantizar lecturas confiables durante los ensayos finales.

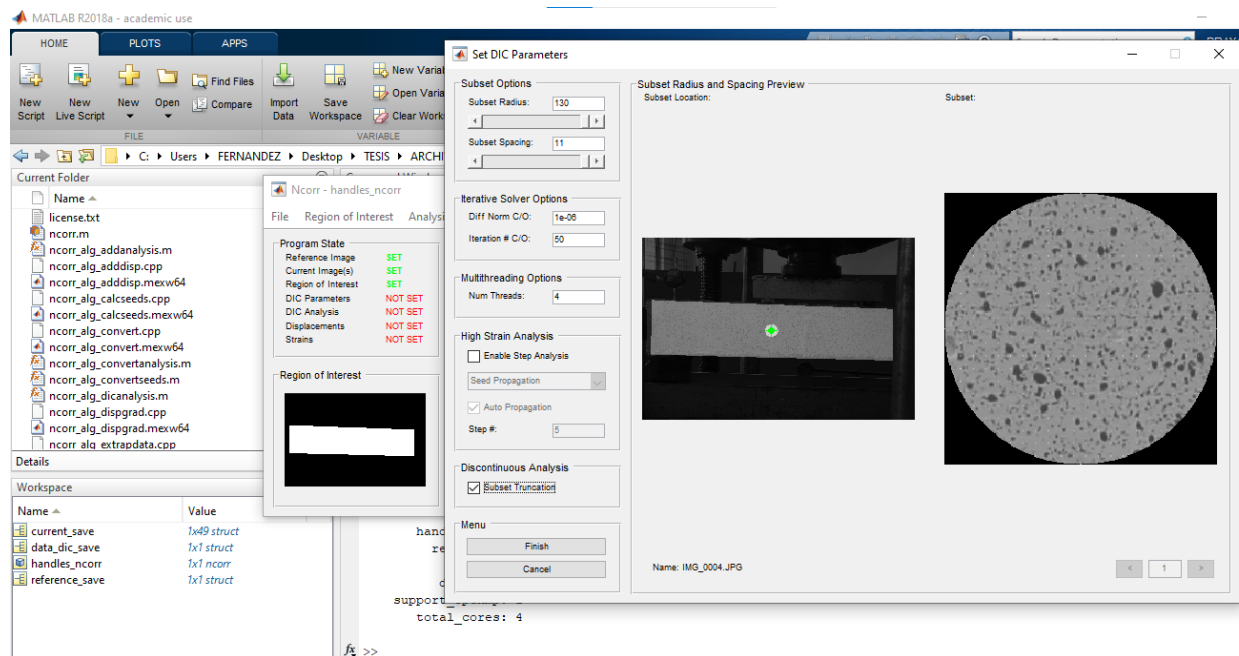
En la Figura 5 se muestra la disposición inicial de los deformímetros instalados en las vigas. El deformímetro 1 se ubicó estratégicamente en el borde izquierdo de la probeta, mientras que el deformímetro 2 se instaló en el centro de esta. Esta configuración respondió a la necesidad de contar con dos puntos de referencia para la medición de desplazamientos durante el ensayo.

Basados en el comportamiento típico de una viga sometida a flexión, se esperaba inicialmente que la mayor deformación ocurriera en el centro de la luz libre. Sin embargo, debido a las características particulares del ensayo, donde la máquina aplica la carga de manera “ascendente”, desde la base, se observó que las mayores deformaciones se concentraban en los extremos de la viga, mientras que el centro permanecía relativamente estable. Por esta razón, se decidió ubicar los deformímetros, en el extremo de la viga, con el objetivo de obtener un mejor

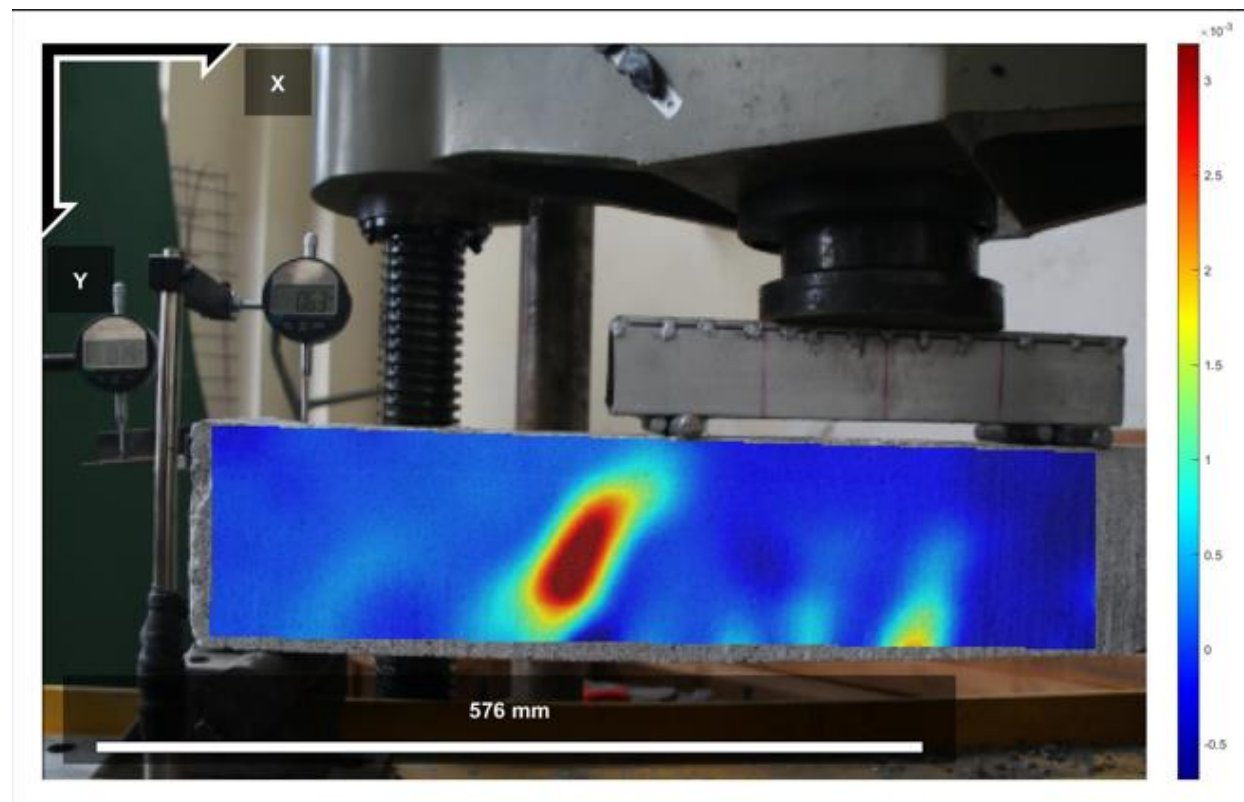
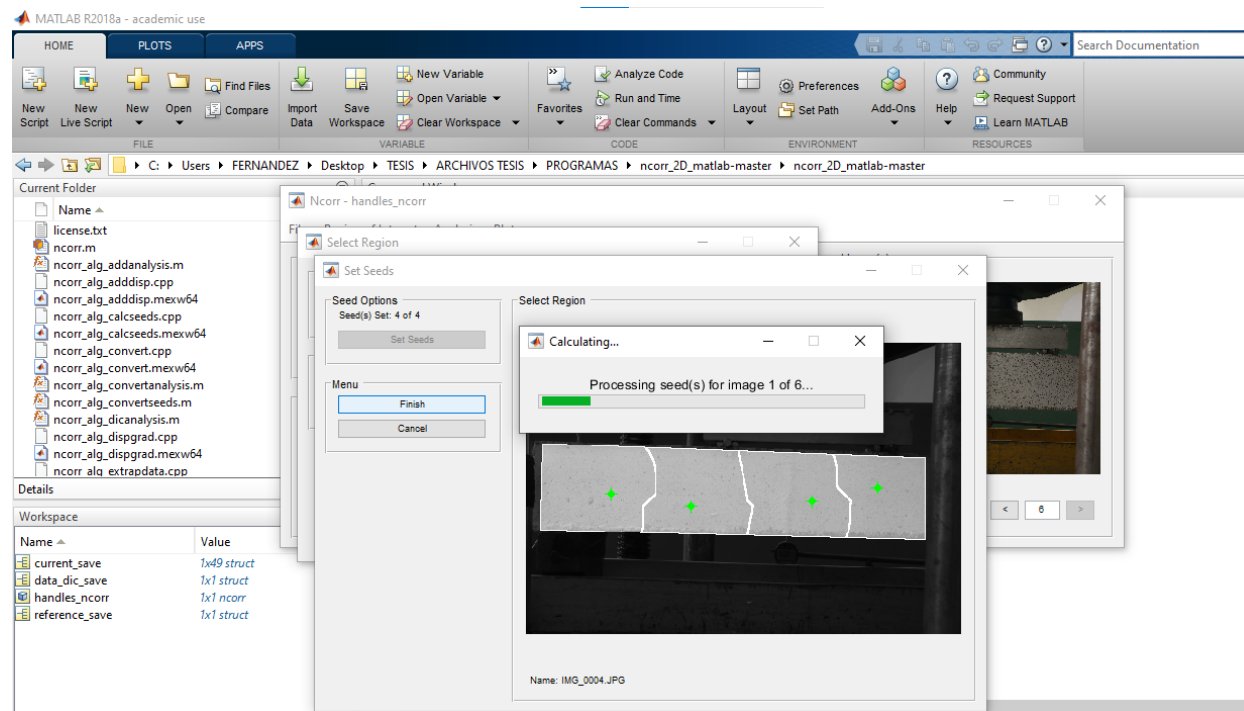
registro en los ensayos finales. En la siguiente sección se describe el montaje definitivo y se muestra la posición mencionada de los sensores.

Estas pruebas permitieron reconocer el uso del software y también sirvieron para confirmar la viabilidad del trabajo, identificando los ajustes necesarios para su desarrollo. Para el procesamiento de imágenes se utilizó el software **NCORR**, como se mencionó anteriormente. Este es un código abierto desarrollado para la correlación digital de imágenes en dos dimensiones (2D), que permite obtener campos de desplazamiento y deformación a partir de secuencias fotográficas. En la Figura 6 se ilustran, a modo de ejemplo, algunos pasos del proceso de análisis realizados con el programa, incluyendo la selección de regiones de interés y la obtención de resultados.

FIGURA 6. *Procedimiento para el procesamiento de imágenes con el programa NCORR.*



Continuacion de la Figura 6.



Los datos obtenidos después de aplicar el sistema de correlación digital de imágenes (DIC) mediante el software NCORR fue organizada en hojas de cálculo, donde se registraron el número de observaciones válidas, el valor promedio de los desplazamientos, así como los desplazamientos máximos y mínimos obtenidos. Durante los ensayos se identificaron algunas inconsistencias menores, atribuibles a factores como movimientos accidentales de la cámara, lo cual permitió implementar mejoras en el sistema de fijación del equipo. De igual manera, se elaboró una tabla complementaria a partir de los registros de la máquina universal, en la cual se documentaron las fuerzas aplicadas y el número de lecturas obtenidas. El análisis conjunto de los resultados de desplazamiento y carga permitió establecer un grado aceptable de correlación entre ambas mediciones, la convencional y el uso de imágenes.

Algunos de los resultados del análisis mediante correlación digital de imágenes (DIC), obtenidos a partir del procesamiento realizado con el software NCORR, se resumen en la Tabla 1. Estas corresponden a los resultados del ensayo preliminar de la viga 1.1. En ellas se presenta una comparación de los valores máximos, mínimos y promedios de desplazamiento registrados por los deformímetros 1 y 2 (DEF 1 y DEF 2), frente a los resultados obtenidos mediante el sistema DIC, con el fin de evaluar la concordancia entre ambos métodos de medición.

TABLA 1. *Medición de desplazamiento en la viga preliminar, viga 1,1.*

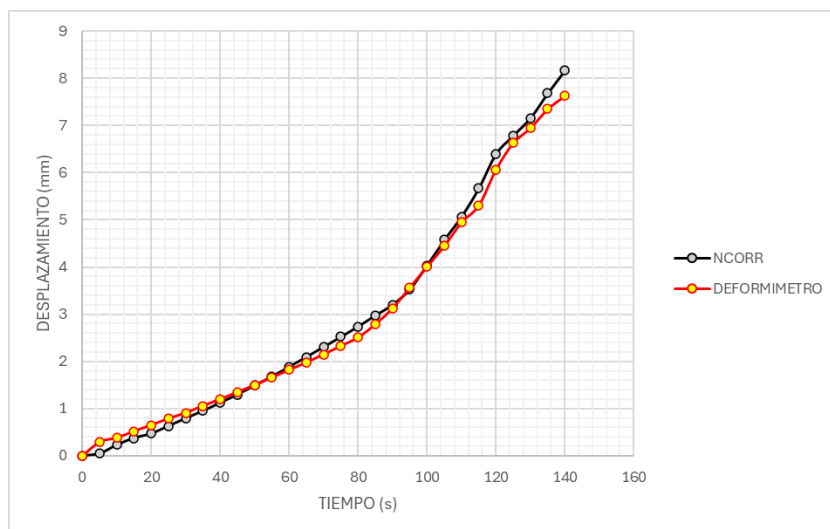
Sistema de medición	Desplazamiento máximo	Desplazamiento mínimo
NCORR	9.25	0.047
Deformímetro 1	8.94	0.29
NCORR	3.56	0.40
Deformímetro 2	4.01	0.27

Los resultados mostrados en la tabla anterior confirmaron que los mayores desplazamientos se registraron en los extremos de la probeta, mientras que en el centro de la luz el desplazamiento

fue considerablemente menor. Esto confirmó el hecho de que, debido a las características del montaje y de la aplicación de la carga, el centro de la viga tiende a permanecer prácticamente estático durante el ensayo.

En la Figura 7 se muestra la comparación de los desplazamientos obtenidos mediante los deformímetros digitales (curva naranja) y el sistema DIC procesado en NCORR (curva negra) en función del tiempo. Se observa que ambos métodos presentan una tendencia similar, especialmente en la primera etapa del ensayo (hasta aproximadamente 120 segundos), donde las curvas prácticamente se superponen, indicando que el método de correlación digital de imágenes (DIC) reproduce adecuadamente el comportamiento captado por los sensores tradicionales.

FIGURA 7. Comparación de los desplazamientos obtenidos por el DEF 1y los obtenidos con el sistema DIC para la viga 1.1.



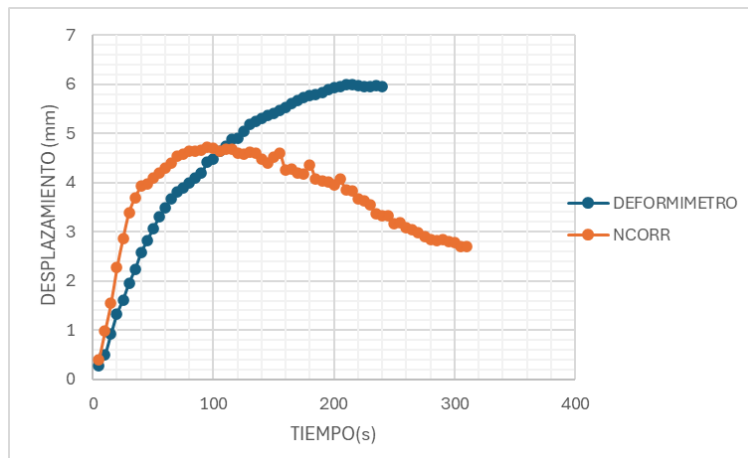
Sin embargo, hacia el final del ensayo (después de los 120 segundos), se evidencia una ligera desviación entre ambas mediciones. El sistema DIC registró mayores desplazamientos en comparación con los datos del deformímetro. Esta diferencia podría atribuirse a varios factores, entre ellos:

- i) Acumulación de pequeños errores de correlación en las imágenes debido a la aparición de micro fisuras o a una mayor distorsión local en la superficie de la viga.

- ii) Limitaciones propias del método DIC cuando la deformación comienza a ser considerablemente elevada, lo que puede afectar la precisión en la identificación de los desplazamientos.
- iii) Rigidez y precisión del montaje de los deformímetros, que podría presentar un ligero desfase en el registro de desplazamientos extremos.

En general, la correlación observada durante la mayor parte del ensayo mostró que el sistema DIC implementado proporcionaba mediciones confiables de desplazamiento, especialmente en rangos de deformación moderada. Con estas pruebas preliminares, se logró una medición satisfactoria de los desplazamientos y fue posible identificar los aspectos del montaje que requerían ajustes. Estos ensayos permitieron establecer parámetros adecuados para el posicionamiento de los sensores y la captura de imágenes, lo cual sirvió como base para los ensayos definitivos. Como parte de las conclusiones de este proceso, se evidenció que el deformímetro central no proporcionó resultados representativos como se evidencia en la Figura 8, debido a que el centro de la viga permanecía prácticamente inalterado durante la aplicación de la carga. Esta observación fue clave para reubicar los puntos de medición en las siguientes fases del experimento.

FIGURA 8. Comparación de los desplazamientos obtenidos por el DEF 2 y los obtenidos con el sistema DIC en el centro de la viga 1.1.



En la Figura 8 se presenta la comparación entre el desplazamiento registrado por el sensor 2, ubicado en el centro de la viga, y el obtenido mediante el sistema DIC, durante uno de los

ensayos preliminares. En este caso, se observó una diferencia significativa entre ambos registros. Esta discrepancia puede estar relacionada con las condiciones específicas del montaje de ese sensor, que dificultaron una lectura precisa. Aunque previamente se concluyó que los extremos de la viga eran más representativos para ubicar los deformímetros —dado que concentran mayores desplazamientos—, este ensayo corresponde a una de las pruebas preliminares finales, cuando aún se estaba evaluando la ubicación óptima de los sensores. Por tanto, los resultados obtenidos con el sensor 2 no reflejan con precisión el comportamiento real de la viga, en comparación con los valores más consistentes entregados por el sistema DIC.

6.2. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DEFINITIVO

Los resultados obtenidos en las pruebas anteriormente descritas permitieron definir las condiciones y parámetros del montaje definitivo, como ya se mencionó. A continuación, se describe el equipo mínimo del montaje:

1. Una cámara fotográfica tipo DSLR. En este caso, según la disponibilidad de los equipos se usó una cámara Canon EOS 70D equipada con sensor APS C de 20,2 MP.
2. Un reflector LED de 360 W.
3. Un trípode para cámara fotográfica
4. Dos sensores digitales (CLOCKWISE-DITR-0105)
5. Sistema de aplicación de la carga. Este consiste en la Máquina universal con los dispositivos necesarios para la aplicación de la carga. El Laboratorio de Estructuras cuenta con una Máquina Shimadzu con capacidad de hasta 50 toneladas.
6. Soportes metálicos para ubicación de los sensores

La preparación de la probeta, que en este caso fueron vigas de concreto, fueron pintadas de blanco una de sus caras laterales —la cual se convirtió en la superficie de análisis— y sobre ella se aplicó un patrón aleatorio de puntos negros. El tamaño de estos puntos osciló entre 0,1 mm y 2 mm, con una distribución irregular y homogénea en toda el área de estudio.

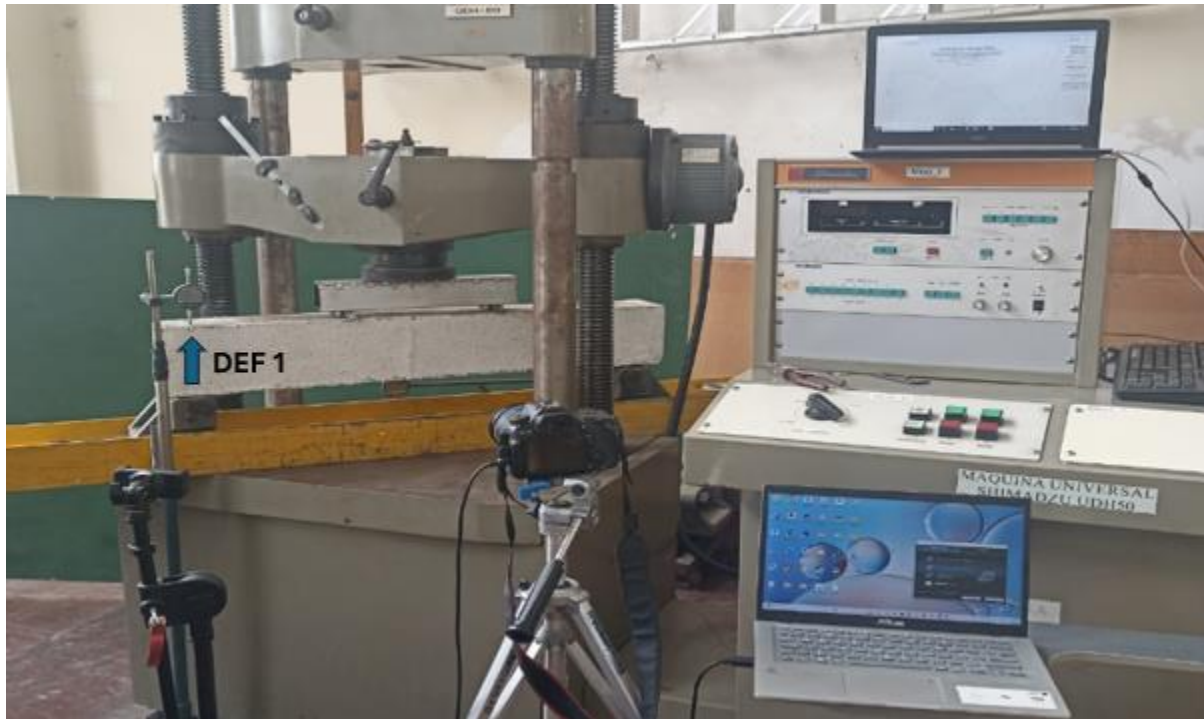
Previo a definir este patrón de puntos, se realizaron varias pruebas con diferentes métodos de aplicación. Inicialmente, se utilizó un marcador permanente de 3 mm de punta, pero se

comprobó que el patrón resultante era demasiado regular y los puntos eran muy grandes, lo cual dificultaba la correlación en NCORR. Finalmente, se optó por el uso de pintura en spray negra aplicada manualmente, lo cual permitió alcanzar una mayor densidad de puntos y una mejor aleatoriedad en su distribución, condiciones necesarias para un procesamiento fiable.

La aleatoriedad del patrón es fundamental en esta técnica, ya que el software de correlación rastrea el movimiento de pequeñas subregiones de imagen a lo largo del ensayo. Si los puntos son demasiado grandes, repetitivos o están mal distribuidos, el algoritmo puede perder la referencia espacial, generando errores o zonas sin datos. Por ello, el patrón debe cubrir uniformemente la superficie, sin formas reconocibles, asegurando un contraste alto y una textura visual rica que permita el seguimiento preciso de los desplazamientos.

Una vez se instala la probeta en el sistema de aplicación de carga, para lo cual se fabricó un pequeño soporte metálico que permitiera la aplicación de la carga en aproximadamente el tercio central de la viga, se ubica la cámara de forma ortogonal a esta (Figura 9). Previamente, se determinó, en los ensayos preliminares, que la distancia adecuada entre la superficie de la viga y la lente de la cámara fuera de 1 metro, recordando que, a menor distancia entre la cámara y el objeto, más píxeles cubren un área específica de la superficie, lo que incrementa el detalle capturado por imagen. Esto mejora la resolución espacial y la precisión en el análisis de desplazamientos. Inicialmente se realizaron pruebas con 1.5 m. Garantizar la ortogonalidad de la cámara y definir la distancia adecuada son aspectos claves para lograr una adecuada correlación, ya que se mitiga la distorsión de la proyección y se aumenta la resolución espacial efectiva por píxel.

FIGURA 9. *Montaje definitivo del sistema.*



En la Figura 10 se muestra el patrón de puntos aleatorios seleccionado tras los ensayos preliminares. Su distribución fue optimizada para asegurar una correcta correlación durante el análisis.

FIGURA 10. *Patrón de puntos.*



Respecto de la preparación para la toma de fotografías durante las pruebas, fue necesario automatizar la captura secuencial de imágenes. Para esto se usó la aplicación EOS Utility [57] de Canon. Las imágenes se tomaron, para estas pruebas, a razón de una fotografía cada cinco segundos mediante disparo remoto.

Es importante mencionar que con los ensayos previos se verificó la sensibilidad del algoritmo del software NCORR al tamaño y densidad de los puntos aleatorios. Diámetros superiores a dos píxeles inducen ambigüedad por similitud de texturas, mientras que diámetros inferiores a un píxel diluyen el contraste y elevan el ruido. La configuración óptima se alcanzó con un 40% de densidad en puntos de 1 a 2 mm. Con dicha disposición se obtuvieron sesenta fotogramas por ensayo, suficientes para seguir la evolución del daño. La iluminación media durante los ensayos se mantuvo constante, suficiente para garantizar imágenes claras y bien definidas. En este caso, asegurar un nivel adecuado de luz fue fundamental para el correcto funcionamiento del sistema DIC. Si el nivel de iluminancia es muy bajo, la cámara puede generar ruido visual en las imágenes, apareciendo líneas horizontales o verticales que no existen realmente en la superficie de la viga. Estas líneas artificiales pueden ser interpretadas por el software NCORR como desplazamientos o deformaciones falsas, afectando la precisión del análisis.

Con el propósito de facilitar que posteriormente se puedan implementar pruebas con este sistema en otras probetas o elementos similares, se elaboró un protocolo operativo, el cual se presenta en el Manual de implementación del sistema que se encuentra en el Anexo 1. Este resume la secuencia del procedimiento: 1) calibración de la cámara, 2) ajuste de la iluminación, 3) aplicación del patrón aleatorio de puntos, 4) instalación de deformímetros, 5) captura automática de fotografías, 6) aplicación de la carga, 7) transferencia de imágenes y 8) procesamiento de imágenes en el software NCORR para la obtención de los desplazamientos en el tiempo, en el plano $u(x,y)$. En un archivo de extensión CSV se almacena la información de estos vectores de desplazamiento.

La cámara Canon EOS 70D fue montada sobre un trípode de precisión, que permite micro ajustes en los tres ejes cartesianos (X, Y y Z) con una precisión de hasta 0,01 mm, facilitando una alineación cuidadosa entre la cámara y la superficie de estudio. Además, el cabezal incorpora un nivel esférico de alta sensibilidad con resolución de 0,05°, lo que asegura una correcta ortogonalidad respecto a la viga ensayada.

En términos prácticos, el tiempo necesario para instalar todo el sistema se redujo de 60 minutos a solo 15 minutos por muestra. La facilidad de transporte —resultado de eliminar cables innecesarios y de usar un montaje más compacto— permite trasladar el equipo a otros laboratorios, siempre que se cuente con una superficie que pueda ser pintada y haya una línea de visión libre entre la cámara y el objeto.

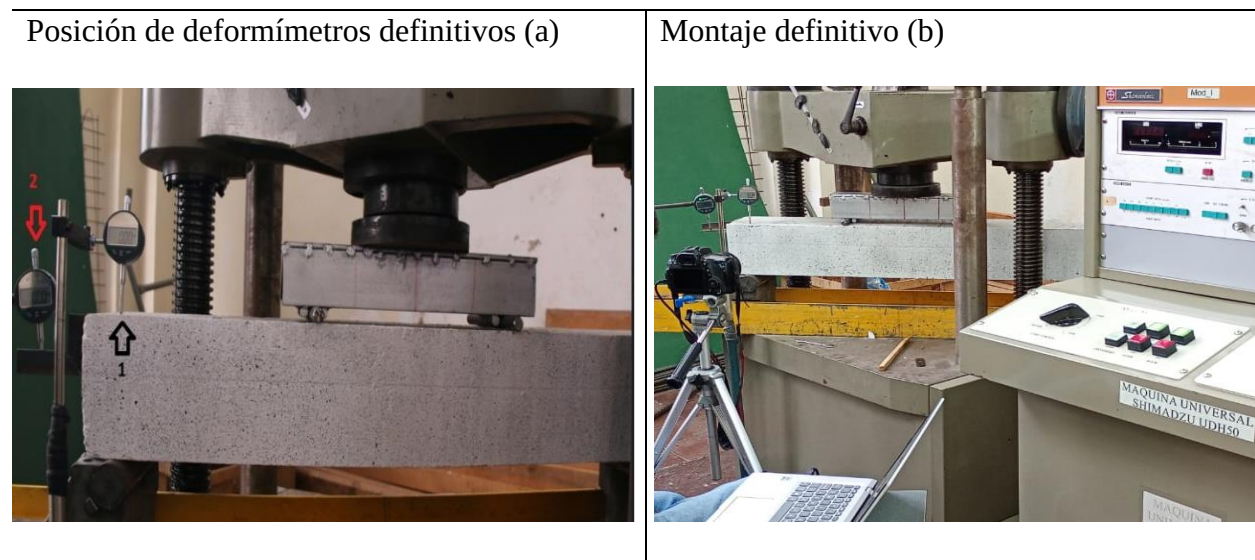
Como recomendaciones finales para lograr un ensayo satisfactorio, se resalta: mantener la cámara perpendicular a la muestra utilizando soportes ajustables; reducir el retraso en la toma de fotografías, optimizando el funcionamiento interno de la cámara; asegurar una iluminación uniforme, incluso considerando aumentar la cantidad de luz si es necesario; y documentar cada ensayo, tomando fotografías generales del montaje, para garantizar que se pueda seguir el control y trazabilidad de todo el proceso de medición.

6.3. ENSAYO DE FLEXION EN PROBETAS DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO.

6.3.1. Descripción de las pruebas definitivas.

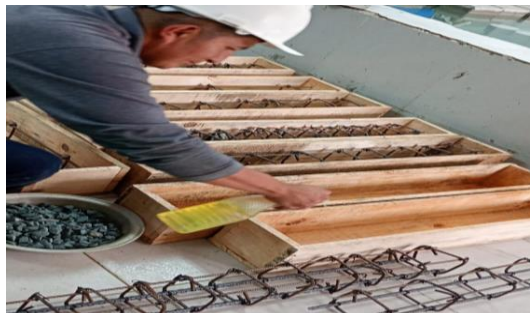
En la Figura 11 se presenta la estructura definitiva del montaje para la implementación del sistema DIC.

FIGURA 11. *Detalles del montaje*



Una vez se definió el montaje y parámetros para la correcta ejecución de los ensayos, se procedió a fabricar 8 vigas prismáticas de 1000 mm de luz, con una sección transversal de 150 mm $\times$ 150 mm y recubrimiento de 20 mm, curadas bajo inmersión total (Figura 12). El concreto utilizado en los ensayos fue dosificado en proporciones 1:2:2,4 (cemento: arena: grava) con una relación agua-cemento de 0,55, lo cual proporcionó buena trabajabilidad y permitió alcanzar una resistencia a la compresión aproximada de 28 MPa. Las vigas se desencofraron a las 48 horas. Después del proceso de curado, se aplicó el patrón de puntos aleatorio, con las medidas anteriormente mencionadas, sobre la cara más lisa de la viga, mediante aerosol de color negro.

FIGURA 12. *Proceso constructivo de vigas definitivas. a) corte de acero, b) armado de estribos, c) armado de castillos y formaletas, d) fundición, e) acabado.*



Las vigas definitivas, denominadas como viga 2.1, viga 2.2 y así sucesivamente hasta la viga 2.8, fueron diseñadas con distintas cuantías de refuerzo longitudinal, abarcando configuraciones cercanas a la cuantía mínima, balanceada y máxima, con el objetivo de analizar comparativamente su respuesta estructural bajo flexión. En la Tabla 2 se resumen los valores establecidos para cada viga. Donde, d , corresponde a la profundidad efectiva, A_s , es el área de refuerzo, y ϕV_n y ϕM_n , son las resistencias nominales a cortante y flexión, respectivamente.

TABLA 2. *Diseño de las vigas definitivas.*

Viga	Dimensiones (cm)	d (cm)	Refuerzo (# de barras)	A_s (cm ²)	Cuantía- ρ	ϕV_n (kN)	ϕM_n (kN-m)	P (kN)
v 2,1	15x15	11.9	2#2	0.64	0.0036	28.45	3.10	28.95
v 2,2	15x15	11.9	3#2	0.96	0.0054	28.45	4.57	31.08
v 2,3	15x15	11.9	2#3	1.42	0.0080	28.45	6.60	51.90
v 2,4	15x15	11.9	2#3 + 1#2	1.74	0.0097	39.89	7.95	44.94
v 2,5	15x15	11.9	3#3	2.13	0.0119	47.04	9.52	62.46
v 2,6	15x15	11.9	2#4	2.54	0.0142	50.49	11.10	67.48
v 2,7	15x15	11.9	2#4 + 1#3	3.25	0.0182	60.33	13.63	83.84
v 2,8	15x15	11.9	3#4	3.81	0.0213	78.03	15.45	83.36

La cámara Canon EOS 70D se montó en el trípode, que permitió fijar la distancia de disparo en $1,00 \pm 0,01$ m. Los parámetros de ajuste empleados fueron: una distancia focal de 35 mm, que define el grado de acercamiento y el tamaño del área capturada en la imagen (encuadre); una apertura $f/8$, que ofrece un equilibrio adecuado entre profundidad de campo y nitidez; e ISO 100, que minimiza el ruido digital y garantiza una alta calidad de imagen bajo condiciones de iluminación controlada. Después de establecer los parámetros de la cámara se debe definir el contorno útil de la viga, lo que consiste en seleccionar el área con menor irregularidades en su superficie, esta se subdividió en ventanas de 21×21 píxeles, tamaño que balancea sensibilidad y robustez conforme a Schreier et al. [34].

Para minimizar los efectos del cortante en la viga, se utilizó un esquema de carga en cuatro puntos, logrando una región de momento constante de 300 mm. Los apoyos de las vigas

consistieron en rótulas esféricas engrasadas para eliminar excentricidades. Aunque no se aplicó una sincronización directa entre el sistema de adquisición de carga y el disparo de la cámara, se buscó realizar una sincronización temporal con intervalos de tiempo de 5 segundos. El control de las capturas se realizó a través del software EOS Utility, cómo se había mencionado, programando la toma automática de imágenes cada 5 segundos.

La ejecución de los ensayos inició aplicando una precarga de 5 Kgf para estabilizar la viga, seguida de una rampa de carga de 1 Kgf/s hasta la falla de la probeta. El ensayo se detuvo al detectar una caída de aproximadamente el 20 % en la carga máxima, lo que indicaba la falla de la viga. Posteriormente, con los datos adquiridos se realizó la obtención de los campos de desplazamientos mediante el procesamiento de imágenes.

El procesamiento de imágenes con el software **NCORR** permite obtener mapas o campos de desplazamiento que representan visualmente la magnitud y dirección de los movimientos ocurridos durante el ensayo (Figura 13). Estos mapas incluyen escalas de valores codificadas por colores, lo que facilita distinguir las zonas con mayores desplazamientos, además permite obtener mapas de deformaciones unitarias principales y en las direcciones x e y. Con colores cálidos, como el rojo, se indican las áreas donde se presentan grietas o se concentran mayores esfuerzos de tracción, mientras que los colores fríos, como el azul, corresponden a zonas con deformaciones de compresión (Figura 14). Esta visualización permite identificar con claridad la aparición y propagación de grietas en la superficie analizada. Además, es posible extraer imágenes individuales con los resultados obtenidos y construir secuencias animadas (GIF), que muestran de forma continua y detallada la evolución del daño del material a lo largo del ensayo.

FIGURA 13. Datos de desplazamientos obtenidos mediante el procesamiento.

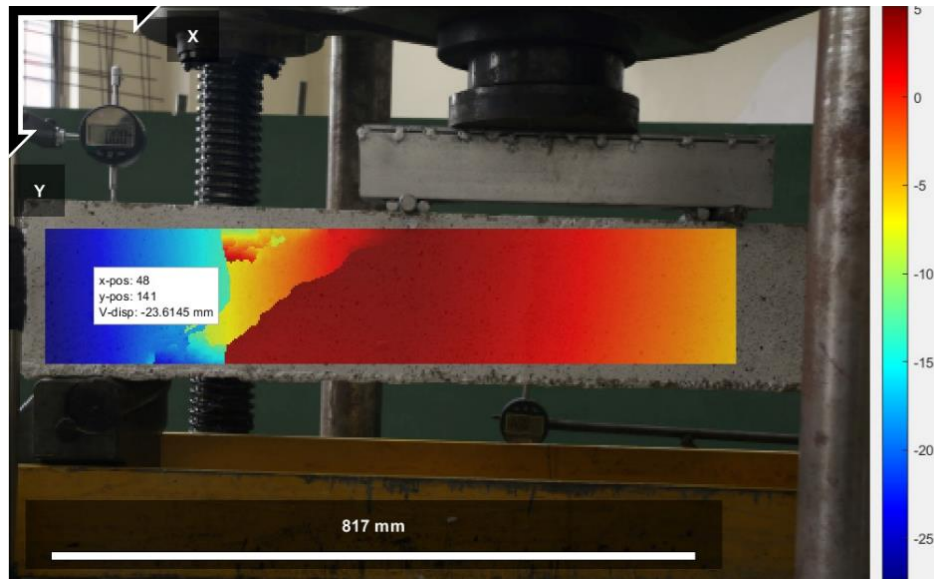
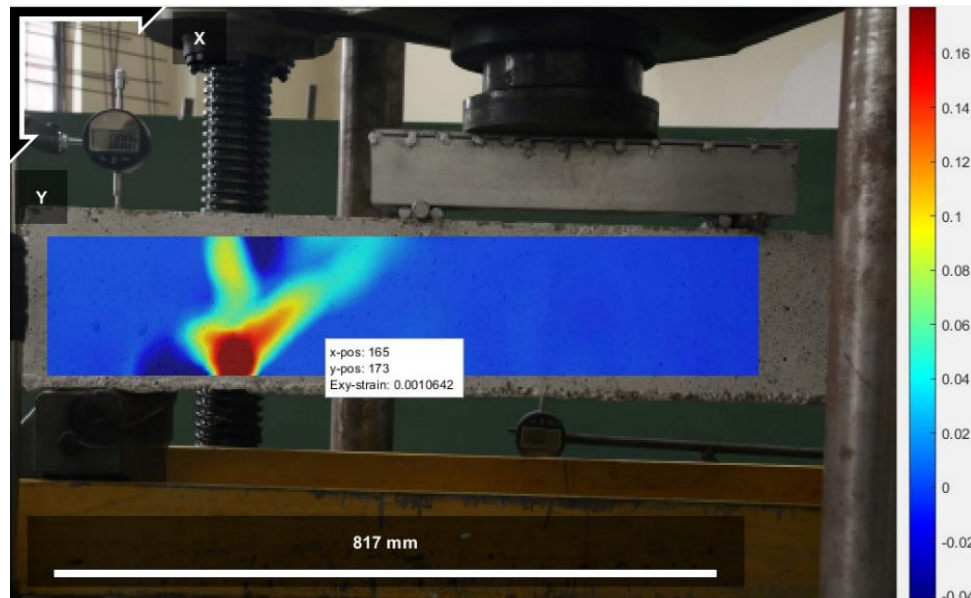


FIGURA 14. Concentración de esfuerzos y registro de deformaciones unitarias principales.



Debido a las limitaciones físicas impuestas por la estructura de la máquina universal, no fue posible capturar toda la longitud de la viga en una sola toma frontal. Por tal motivo, la cámara

fue orientada hacia la mitad izquierda del claro, tal como se observa en la Figura 15. Esta condición limita el análisis en la totalidad de la probeta. Teóricamente, se prevé que ambos extremos de la probeta presenten desplazamientos de magnitud muy similar, por lo cual basta con registrar uno de ellos para obtener una estimación representativa del desplazamiento máximo.

FIGURA 15. *Estructura de la maquina universal*



En todas las vigas se mantuvo el mismo protocolo experimental, el esquema de carga y las condiciones del montaje. Durante los ensayos se presentaron algunas incidencias menores tales como, parpadeos en la iluminación y ligeras vibraciones en el trípode de la cámara, factores que en algunos casos explicaron pequeñas variaciones en los resultados registrados.

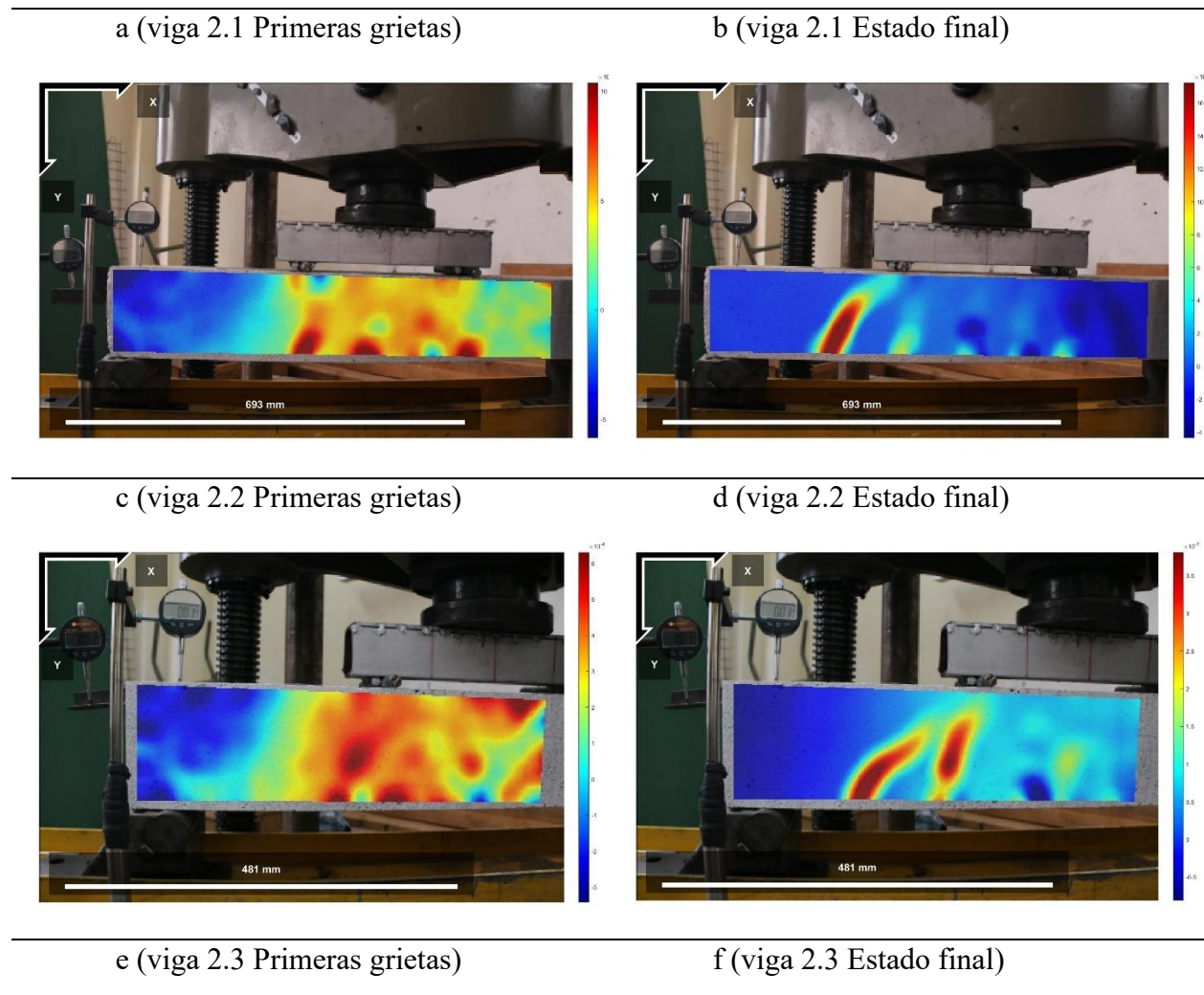
6.3.2. Comportamiento de las vigas

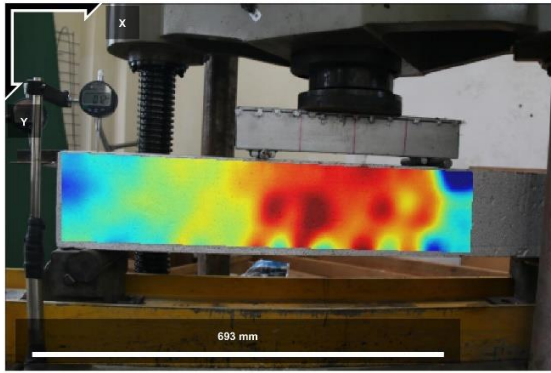
Una vez finalizadas las pruebas, se procedió al procesamiento de las imágenes. El procedimiento consistió en: i) cargar la imagen de referencia correspondiente al estado inicial de la probeta, ii) importar el conjunto total de fotografías, iii) definir la región de interés (ROI), iv) calibrar los parámetros del sistema de correlación digital de imágenes (DIC) y v) ejecutar el análisis DIC. Los detalles completos de este procedimiento se describen en el manual incluido en el Anexo 1.

En la Figura 16. Se presentan las deformaciones unitarias principales (ϵ_{xy}) para todas las vigas, para un estado cercano al primer agrietamiento y para el estado final. Estas imágenes obtenidas del procesamiento permiten observar la ubicación de las primeras grietas (figuras lado izquierdo) y aunque el propósito de este trabajo no fue analizar la magnitud de las deformaciones,

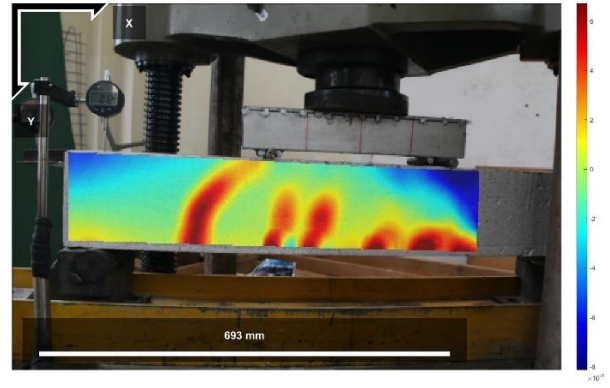
los valores registrados son coherentes con el comportamiento esperado del concreto, tanto en compresión como en tracción. En las figuras del lado derecho, que indican el estado final, se puede observar la grieta principal que desencadenó la falla del elemento. Cabe aclarar, que la escala de colores es variable para cada foto, es decir, no permanece constante desde el inicio, sin embargo, los valores de las deformaciones unitarias si son consistentes con la evolución de daño.

FIGURA 16. *Deformaciones unitarias ϵ_{xy} en las vigas.*

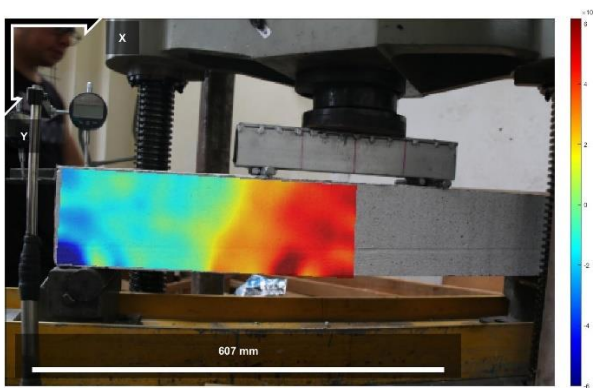




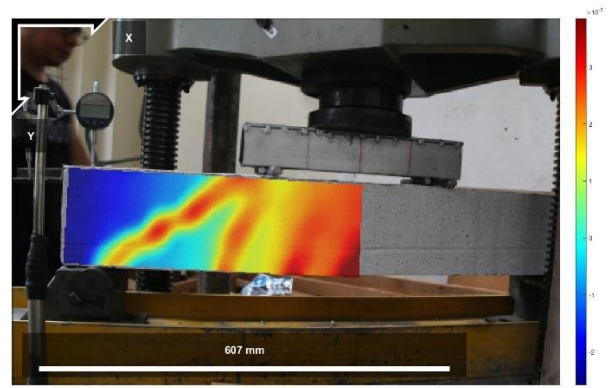
g (viga 2.4 Primeras grietas)



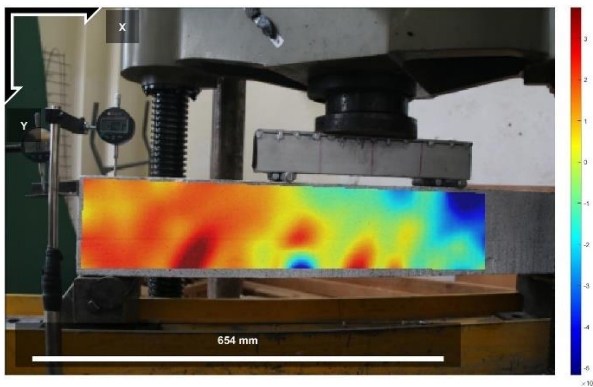
h (viga 2.4 Estado final)



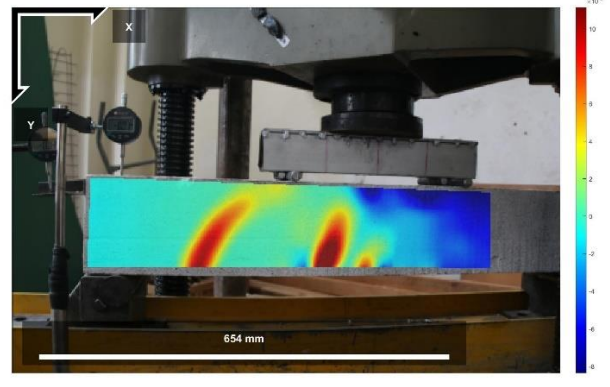
i (viga 2.5 Primeras grietas)



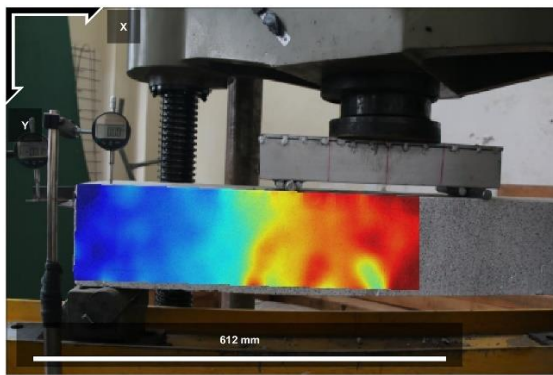
j (viga 2.5 Estado final)



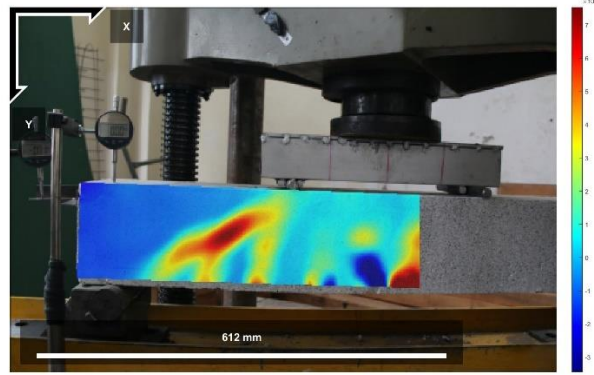
k (viga 2.6 Primeras grietas)



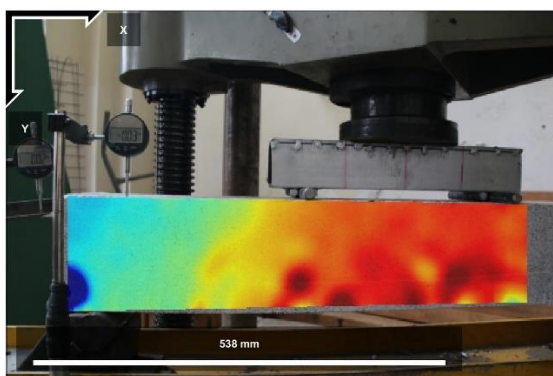
l (viga 2.6 Estado final)



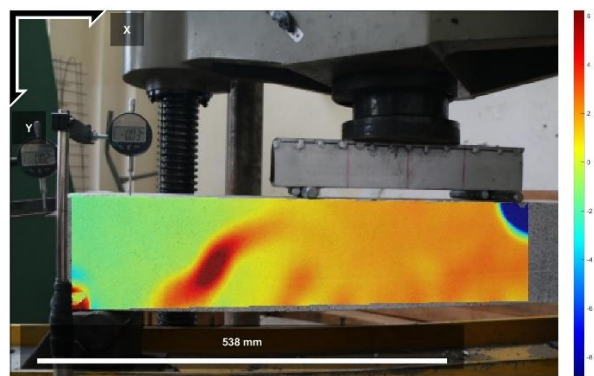
m (viga 2.7 Primeras grietas)



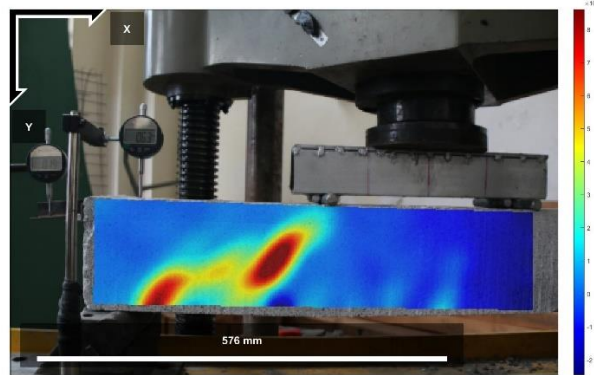
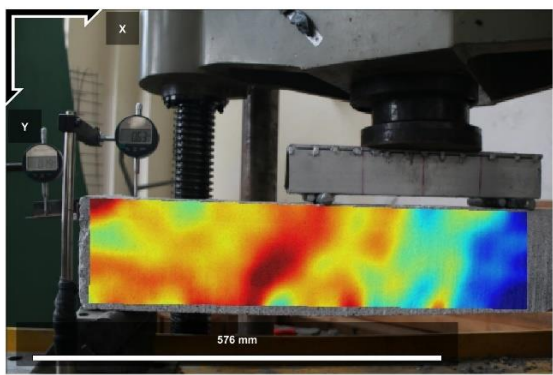
n (viga 2.7 Estado final)



o (viga 2.8 Primeras grietas)



p (viga 2.8 Estado final)



En la Tabla 3 se presenta una comparación de la resistencia nominal a flexión ($P_n \text{ flex}$) y cortante ($P_n \text{ cort}$) de las vigas, obtenidas del momento y cortante nominales, versus la carga de falla o resistencia experimental (P_{falla}). Esta comparación indica que, como era de esperarse, la falla en todas las vigas fue por flexión, puesto que la capacidad a cortante fue considerablemente

mayor. Esto de acuerdo con el criterio de diseño de las vigas, el cual era observar el efecto de la cuantía de refuerzo por flexión. La cuantía se varió desde la viga 2.1, que corresponde a la cuantía mínima, hasta la viga 2.8 que corresponde a la cuantía máxima (Tabla 2). Estas cuantías fueron calculadas para la resistencia nominal de los materiales ($f'_c = 28$ MPa y $f_y = 420$ MPa). Según lo esperado para estas cantidades de acero, y tal como se resume en la Tabla 3 y se muestra en la Figura 23, a medida que la cuantía de refuerzo aumentaba en las vigas su resistencia era mayor. Respecto de la ductilidad, esta debería disminuir a medida que la cuantía aumentaba, sin embargo, esta tendencia no fue tan clara, principalmente, por las fallas prematuras de las vigas 2.2 y 2.4. Otro aspecto notorio es la comparación entre la resistencia experimental y la nominal de falla (correspondiente a la de flexión), que a excepción de las vigas 2.1 y 2.3, no varía en más del 17%.

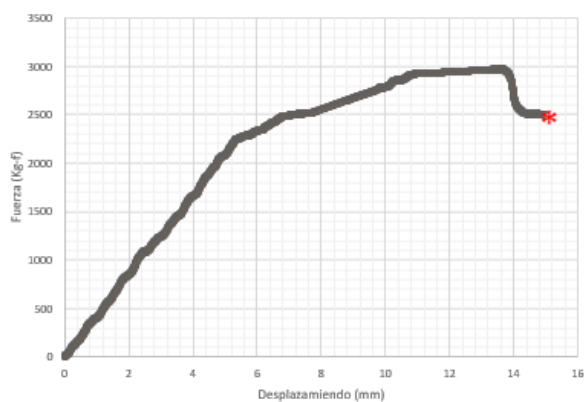
TABLA 3. *Comparación entre la resistencia nominal a flexión y cortante versus la carga de falla experimental en las vigas ensayadas.*

Viga	Cuantía- ρ	Pn – flex (kN)	Pn – cort (kN)	P – falla (kN)	Pfalla/Pn-flex	Desplazamiento Ultimo (mm)
v 2,1	0.0036	18.63	55.90	28.92	1.55	15.01
v 2,2	0.0054	26.48	55.90	31.69	1.17	7.07
v 2,3	0.0080	39.23	55.90	51.90	1.32	16.95
v 2,4	0.0097	47.07	78.45	46.70	0.95	6.52
v 2,5	0.0119	55.90	92.18	62.46	1.12	13.15
v 2,6	0.0142	65.70	99.05	80.69	1.03	15.55
v 2,7	0.0182	80.41	118.66	83.84	1.04	11.62
v 2,8	0.0213	91.20	152.98	84.18	0.92	7.75

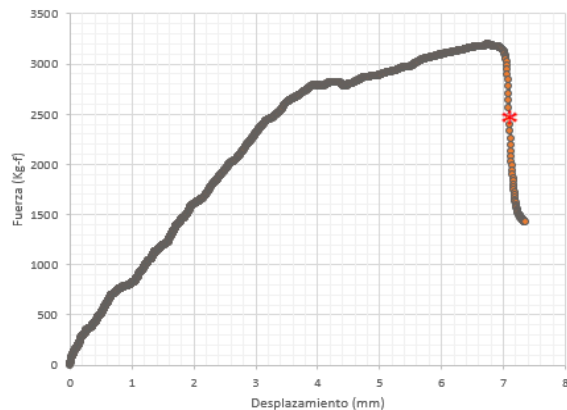
En la Figura 17, se muestra la relación fuerza versus desplazamiento de todas las vigas, en donde se puede observar el comportamiento descrito sobre la resistencia y ductilidad de cada probeta. El (*) indicado en las gráficas señala el punto donde se da el desplazamiento último, En el caso de las vigas 2.1, 2.3, 2.5, 2.6 y 2.8, el último valor registrado por la máquina durante el ensayo. Esta distinción es importante para evitar interpretaciones erróneas en los resultados obtenidos.

FIGURA 17. *Curvas desplazamiento vs. Fuerza para las vigas ensayadas.*

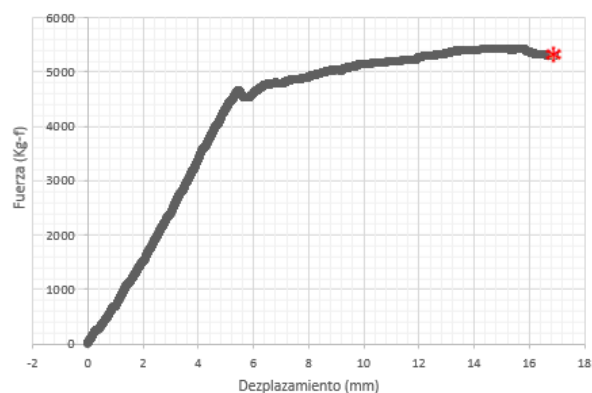
a (viga 2.1)



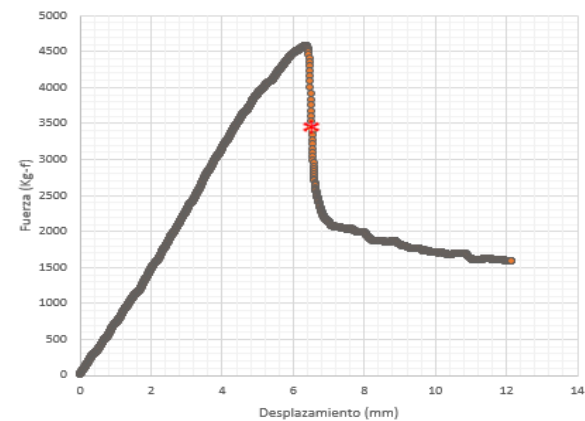
b (viga 2.2)



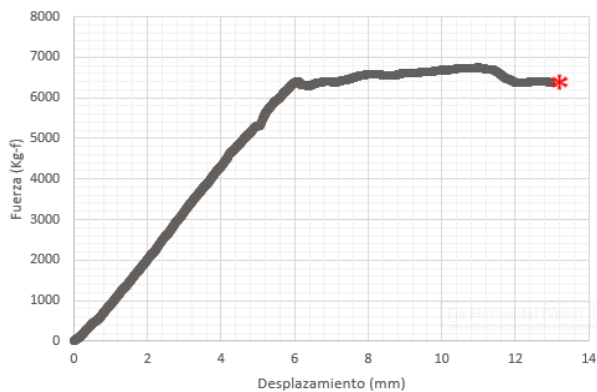
c (viga 2.3)



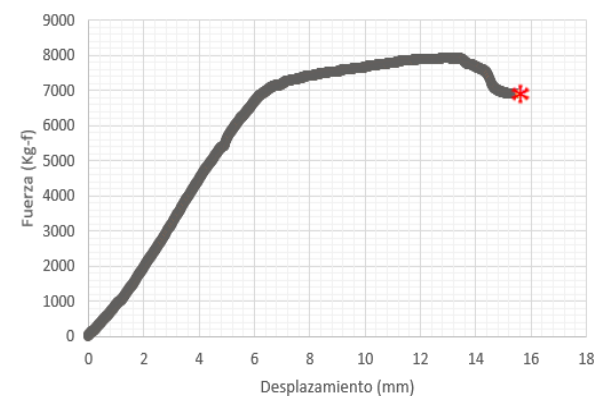
d (viga 2.4)



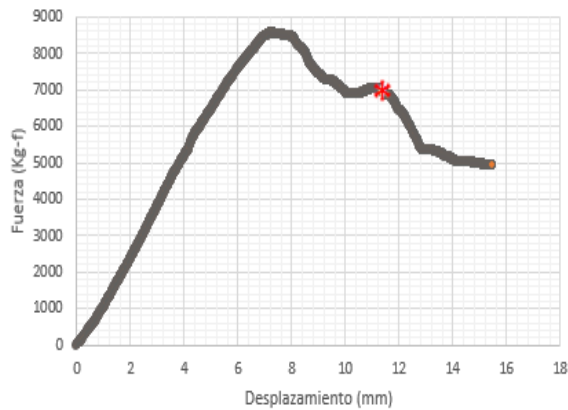
e (viga 2.5)



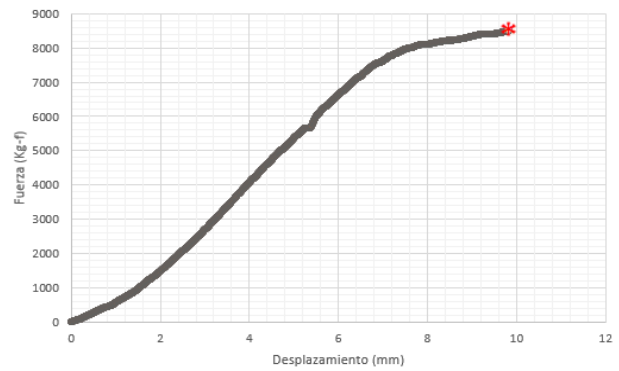
f (viga 2.6)



g (viga 2.7)



h (viga 2.8)



En la Figura 18. Se muestra el estado final de las vigas que corresponde a la falla por flexión observada.

FIGURA 18. *Imágenes sin procesar de los estados finales de las vigas ensayadas.*

a (viga 2.1 Estado final)



b (viga 2.2 Estado final)



c (viga 2.3 Estado final)

d (viga 2.4 Estado final)



e (viga 2.5 Estado final)



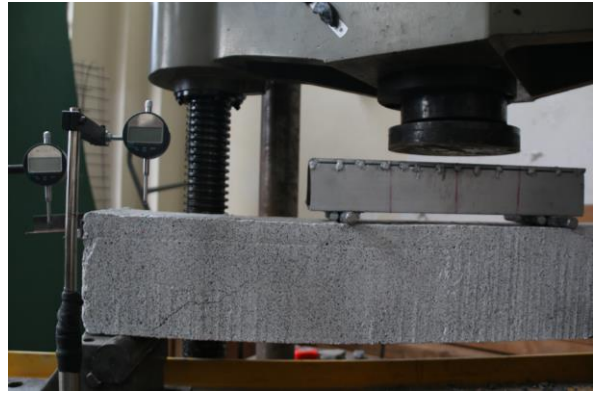
f (viga 2.6 Estado final)



g (viga 2.7 Estado final)



h (viga 2.8 Estado final)



6.3.3. Análisis de desplazamientos y validación del sistema DIC

El propósito central de este trabajo, además de implementar el montaje experimental propuesto, fue validar la aplicación de la técnica de Correlación Digital de Imágenes en el Laboratorio de Estructuras. Esta validación se realizó mediante la comparación de los desplazamientos registrados con instrumentación convencional y aquellos obtenidos a través del procesamiento de imágenes.

En esta sección se presenta dicha comparación, la cual fue realizada punto a punto, aplicando métricas estadísticas para determinar la concordancia entre ambos conjuntos de datos. Estos índices o métricas fueron: i) el MAE (error absoluto medio) indica, en promedio, cuánto difieren los desplazamientos del sistema DIC respecto a los valores medidos convencionalmente, ii) el MAPE (error porcentual absoluto medio) representa ese mismo error, pero expresado en porcentaje, lo que permite evaluar el nivel de precisión relativa, iii) el RMSE (raíz del error cuadrático medio), da mayor peso a las diferencias más grandes, resaltando errores significativos en la medición, y iv) el R^2 (coeficiente de determinación) mide qué tan bien se ajustan los datos obtenidos por DIC respecto a los métodos convencionales, siendo su valor máximo 1, lo que representa una correspondencia perfecta.

Estas métricas se calcularon mediante las siguientes expresiones:

Ecuación (1) – MAE:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Ecuación (2) – MAPE:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

Ecuación (3) – RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Ecuación (4) – R²:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}^i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$$

Donde y_i representa los valores obtenidos con instrumentación convencional, $\hat{y}^i$ los obtenidos con DIC, $\bar{y}$ el valor medio de los datos reales, y n el número de observaciones.

Las Tablas 4 y 5 muestran los resultados de la validación. En primer lugar, se compararon los desplazamientos registrados por el deformímetro No. 1 (Figura 11) con aquellos extraídos mediante el software NCORR, en un punto ubicado exactamente en la misma posición (identificado como NCORR DEF1). Esta comparación permitió evaluar de manera directa la correspondencia entre ambos métodos, ya que ambos miden la deformación en una misma ubicación física sobre la viga.

Por otro lado, aunque inicialmente se había contemplado comparar los registros del deformímetro No. 2 con los desplazamientos obtenidos mediante el sistema DIC, esta comparación no fue posible debido a que dicho deformímetro se encontraba fuera de la Región de Interés (ROI) definida para el análisis. Ante esta limitación, se optó por utilizar como referencia los desplazamientos registrados por el sensor interno de desplazamiento de la máquina universal, el cual se encuentra ubicado en los extremos de la viga, cerca de los apoyos, donde típicamente se presentan los mayores desplazamientos.

Para establecer una comparación representativa con el sistema DIC, se seleccionó un punto en el borde de la ROI, denominado NCORR DEF2, que corresponde a la misma zona en la que mide el sensor de la máquina. Esta elección permitió realizar una correlación válida entre ambos sistemas, al comparar desplazamientos obtenidos en regiones equivalentes, asegurando así la coherencia y fiabilidad del análisis.

TABLA 4. *Índices de error DIC vs sensor deformímetro 1*

Viga	MAE (mm)	RMSE (mm)	MAPE (%)	r^2
v 2,1	0.11	0.15	7.79	0.992
v 2,2	0.62	0.79	19.7	0.913
v 2,3	0.32	0.41	6.31	0.989
v 2,4	0.12	0.15	4.18	0.998
v 2,5	0.13	0.15	3.63	0.998
v 2,6	0.10	0.14	5.25	0.998
v 2,7	0.15	0.17	3.74	0.998
v 2,8	0.14	0.18	5.78	0.992

TABLA 5. *Índices de error DIC vs sensor maquina*

Viga	MAE (mm)	RMSE (mm)	MAPE (%)	r^2
v 2,1	0.39	0.43	13.92	0.972
v 2,2	0.16	0.30	11.37	0.984
v 2,3	1.62	1.99	22.30	0.813
v 2,4	0.43	0.55	11.32	0.979
v 2,5	0.28	0.32	7.55	0.992
v 2,6	0.42	0.51	7.65	0.988
v 2,7	0.99	1.09	15.92	0.939
v 2,8	0.32	0.38	11.16	0.977

La medición de desplazamientos mediante el DEF 1 y la DIC registrada en el punto en dónde se ubicaba este sensor, presentó una buena correlación, como lo indican los diferentes índices de error mostrados en la Tabla 4. A excepción de la viga 2.2, todos los parámetros indican que la medición con DIC es confiable. Para el caso del MAE, que indica el error absoluto medio, el mayor valor, sin tener la cuenta la viga 2.2, fue de 0.32 mm, dentro de un rango de medición de desplazamientos entre 0 y 15 mm. En cuanto al MAPE, en la mayoría de las vigas este índice no

supera, o se aproxima, al 5%, valor que se considera un umbral aceptable para este tipo de comparaciones. En promedio, para todas las vigas (excluyendo la viga 2.2), el error fue de 5.24 %.

El índice RMSE máximo, para todas las vigas, es de 0.79 mm, lo que corresponde a un valor adecuado, en referencia al orden de magnitud de los desplazamientos máximos alcanzados, que varían entre 7 y 15 mm. Finalmente, el coeficiente de determinación R^2 confirma lo anterior, ya que en todos los casos su valor se ubica entre el 95 % y el 100 %, indicando un excelente ajuste entre ambas mediciones. En las Figuras 19 y 20 se presentan gráficamente estos resultados, incluyendo los valores límite de referencia (con línea de color rojo) que permiten evidenciar la favorable correlación observada.

FIGURA 19. Comparación de errores: $DEF1-NCORR DEF1$

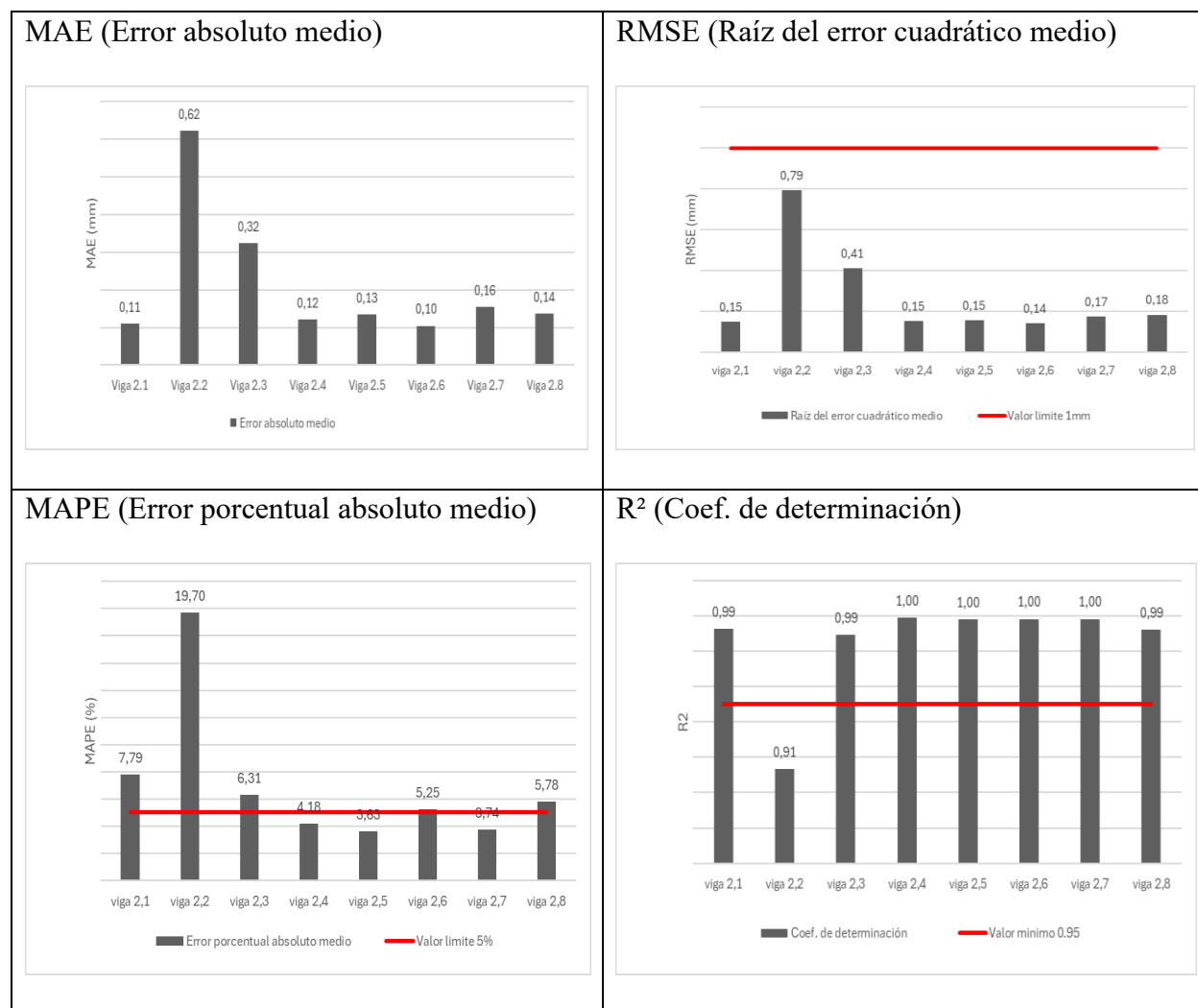
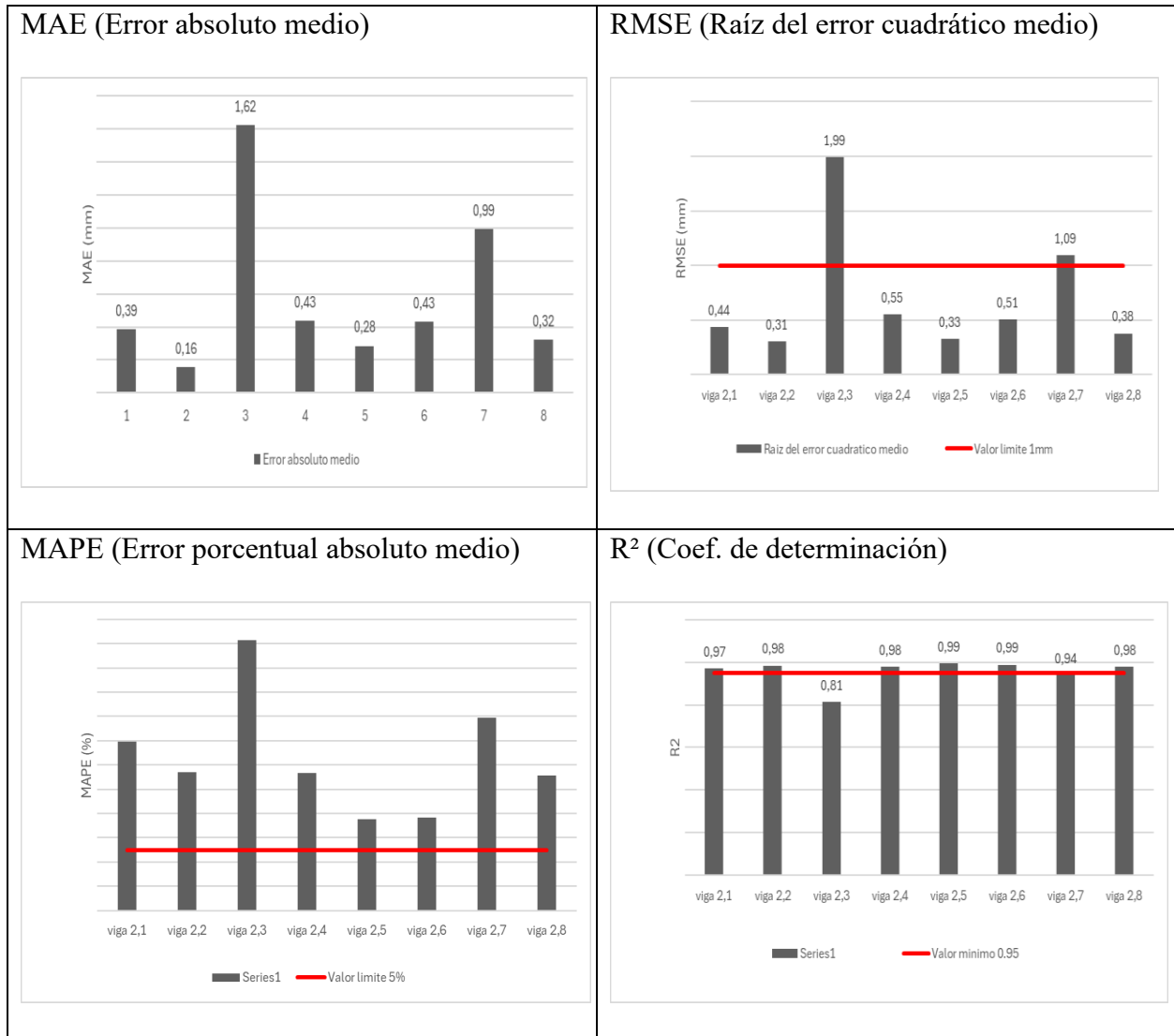


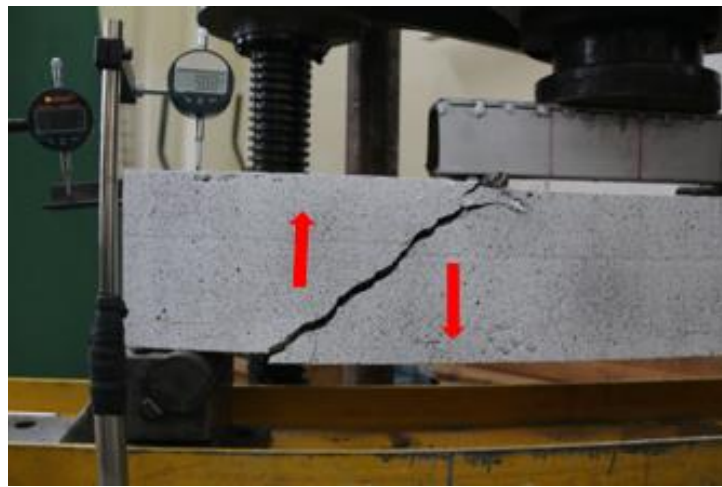
FIGURA 20.comparación de errores: m. Universal–NCORR DEF 2



Respecto de la viga 2.2, los índices de error, superiores a los valores de referencia establecidos, indican que la correlación no fue tan precisa como en las demás vigas. Sin embargo, la diferencia no es excesiva, se conserva una tendencia similar en los desplazamientos registrados y el comportamiento general se mantiene coherente. Este incremento en el error puede atribuirse a dos factores principales: i) se presentó una caída abrupta de la resistencia después de alcanzar su carga máxima, indicando una rotura repentina, probablemente asociada a una combinación de fallas por flexión y cortante, como ya se había evidenciado en su relación de carga vs desplazamientos; esto provocó el desprendimiento completo de la sección izquierda, justo donde

se encontraban ubicados los deformímetros, como se observa en la Figura 21; y ii) uno de los soportes de los sensores de los deformímetros no estaba perfectamente anclado a su base, lo cual pudo generar pequeños movimientos que alterarían el registro de desplazamiento. Este inconveniente fue corregido en los ensayos posteriores, asegurando una correcta instalación de los sensores. Cabe destacar, además, que las mediciones también pudieron verse influenciadas por vibraciones externas, ya que la estructura del edificio se ve afectada por el tránsito frecuente de vehículos pesados en las inmediaciones.

FIGURA 21. *Estado final de la viga 2.2*



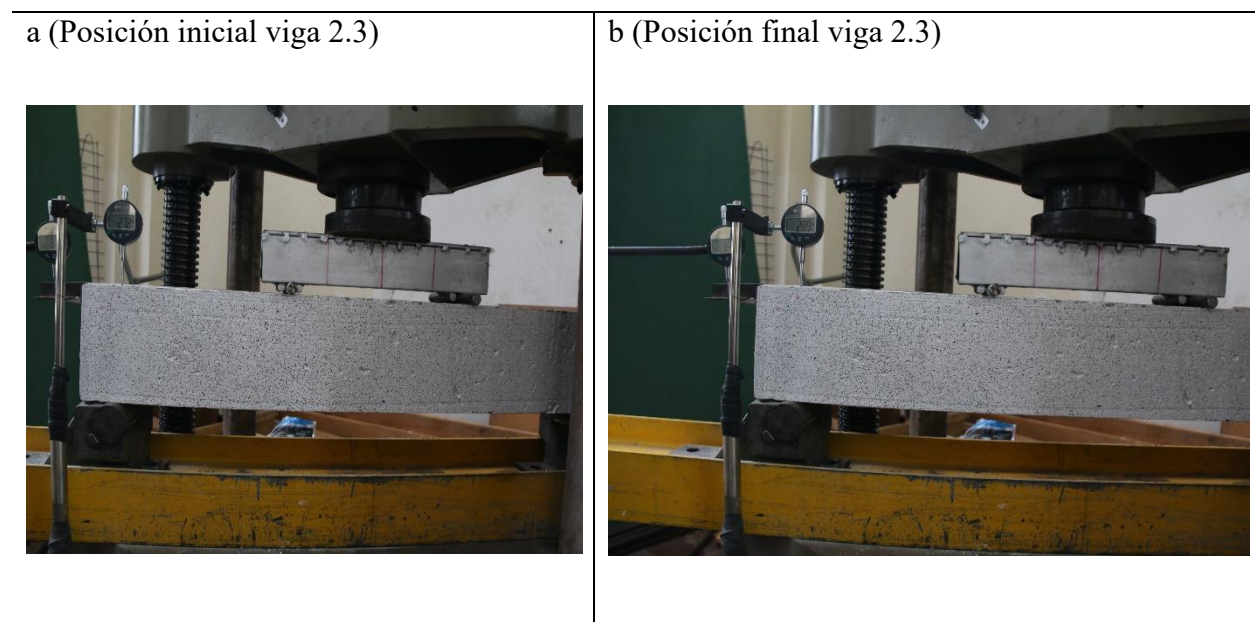
De forma similar, al comparar las mediciones obtenidas con el sensor interno de la máquina universal y aquellas determinadas por DIC en el punto más extremo de la ROI (denominado NCORR DEF2), como se indicó previamente, los índices de error promedio muestran resultados aceptables en general, con excepción del caso correspondiente a la viga 2.3. Para el conjunto de vigas, los valores promedio obtenidos fueron: $MAE = 0.43$ mm, $MAPE = 11.27$ %, $RMSE = 0.51$ mm y $R^2 = 0.98$.

Es importante señalar que el punto donde se registraron los desplazamientos mediante DIC no coincide exactamente con el punto donde la máquina mide con su sensor interno, ya que este último se encuentra en los extremos de la plataforma de carga y registra el desplazamiento global del sistema. Esta diferencia en la ubicación de los puntos de medición explica que los errores en esta comparación sean más altos que los obtenidos en la comparación anterior (DEF1 vs NCORR

DEF1), en la que la ubicación del punto medido coincidía casi exactamente con la posición del deformímetro (tanto en coordenada X como Y).

En particular, la viga 2.3 presentó los valores de error más altos. Esto se debió a un movimiento de la cámara durante el ensayo (Figura 22) lo cual afectó negativamente la calidad del registro y el posterior procesamiento de imágenes. Esta situación fue corregida en los ensayos subsiguientes, reforzando adecuadamente la estabilidad del soporte del trípode de la cámara.

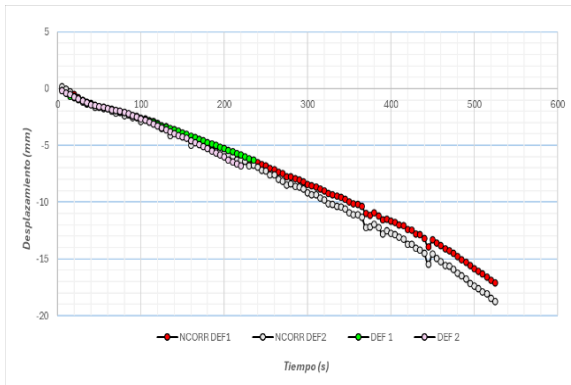
FIGURA 22. *Rotación de la cámara*



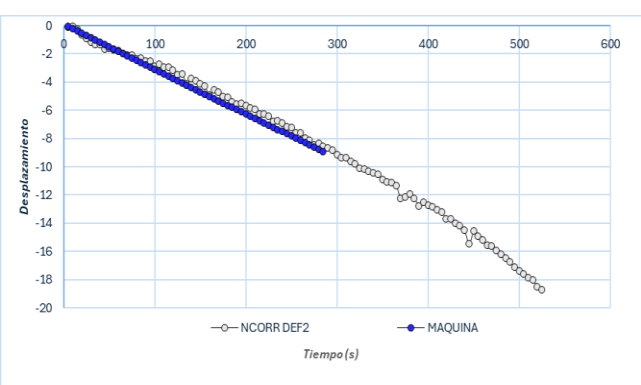
A continuación, en la Figura 23. Se describe viga por viga, los conjuntos de curvas que se elaboraron a partir de los resultados. Cada figura corresponde a las comparaciones NCORR DEF1 vs DEF1 y NCORR DEF2 vs desplazamiento interno de la máquina, lo cual puede verificarse en la siguiente grafica.

FIGURA 23. Comparación de los desplazamientos registrados con DIC y medidos con los sensores y la máquina universal.

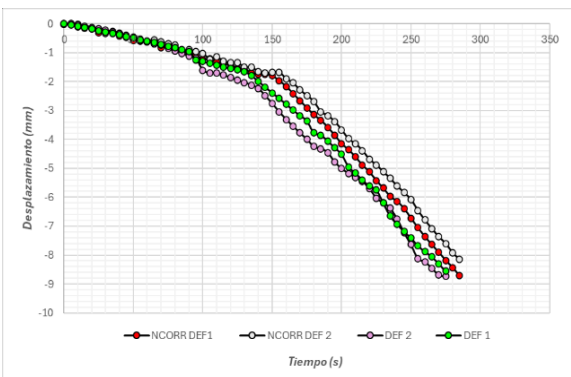
a (viga 2.1 NCORR DEF1 vs DEF1)



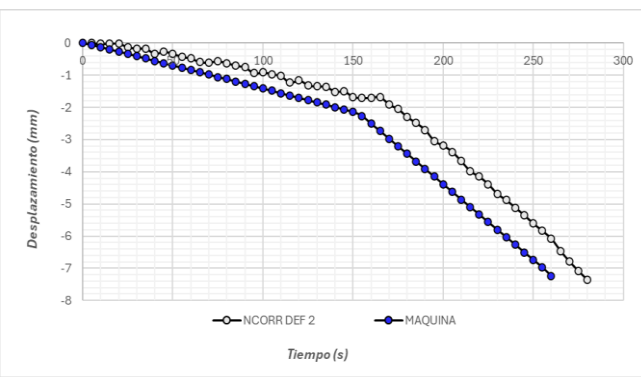
b (viga 2.1 NCORR DEF2 vs Máquina)



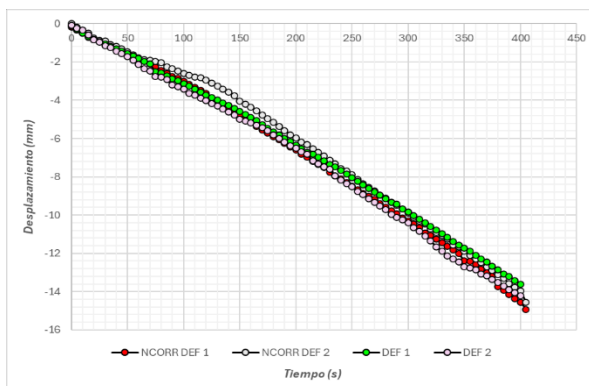
c (viga 2.2 NCORR DEF1 vs DEF1)



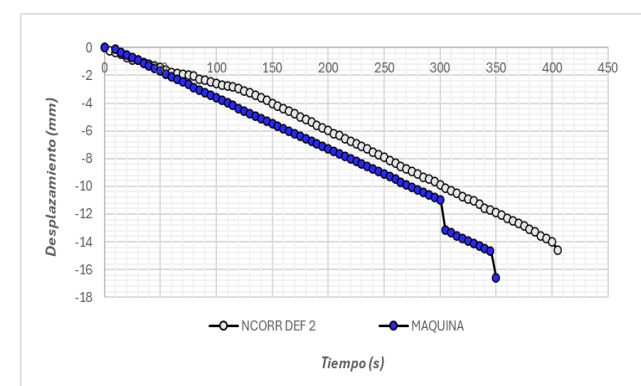
d (viga 2.2 NCORR DEF2 vs Máquina)



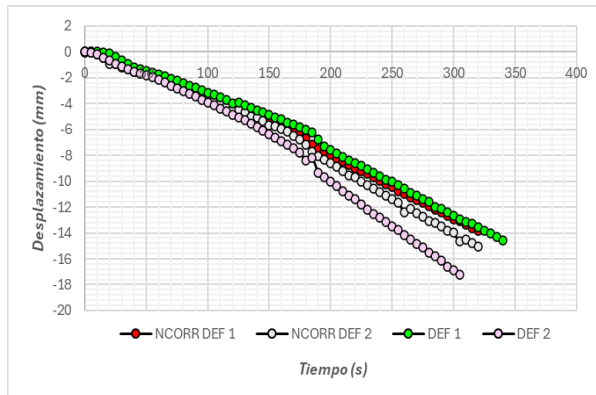
e (viga 2.3 NCORR DEF1 vs DEF1)



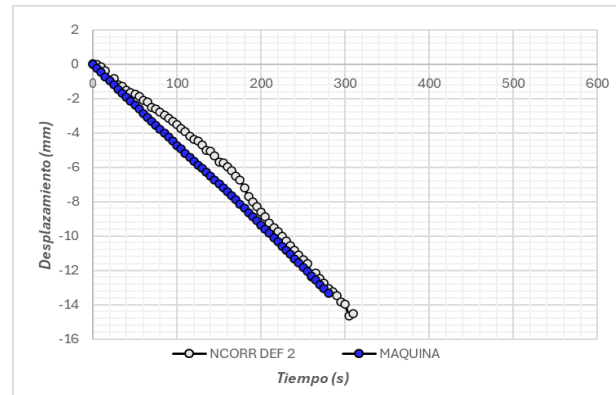
f (viga 2.3 NCORR DEF2 vs Máquina)



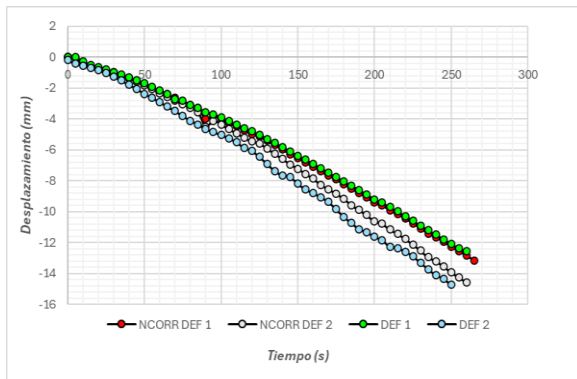
g (viga 2.4 NCORR DEF1 vs DEF1)



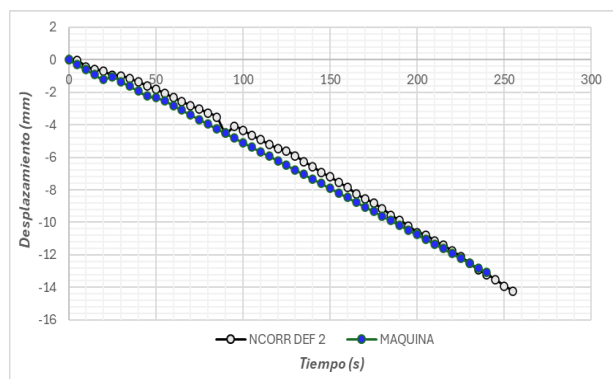
h (viga 2.4 NCORR DEF2 vs Máquina)



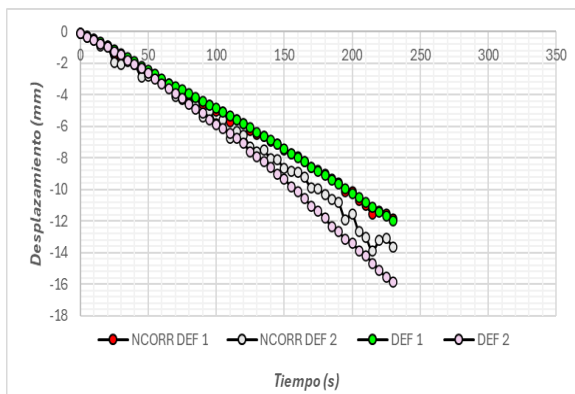
i(viga 2.5 NCORR DEF1 vs DEF1)



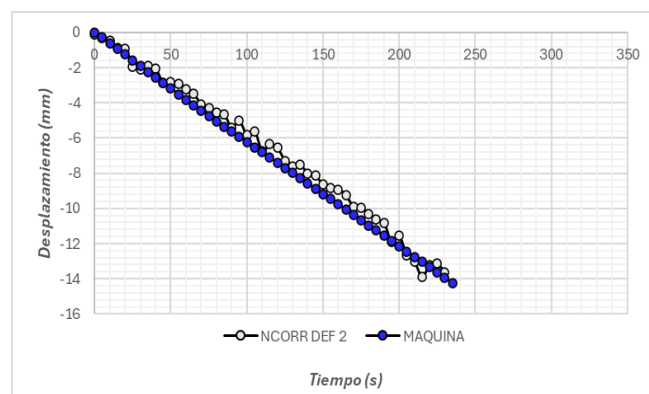
j (viga 2.5 NCORR DEF2 vs Máquina)



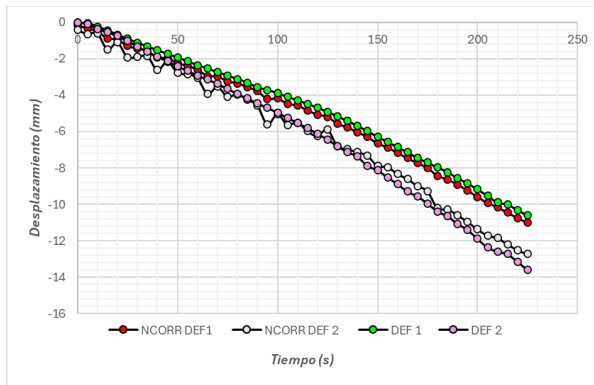
k (viga 2.6 NCORR DEF1 vs DEF1)



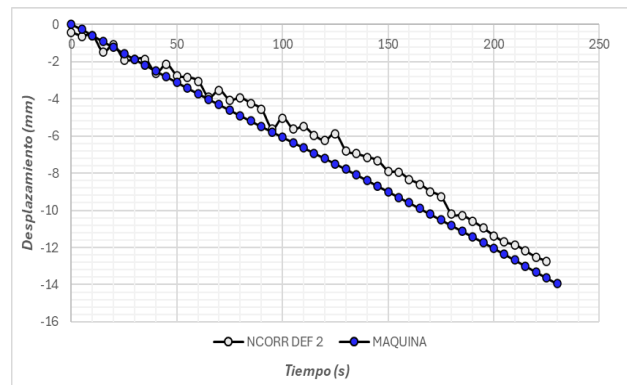
l (viga 2.6 NCORR DEF2 vs Máquina)



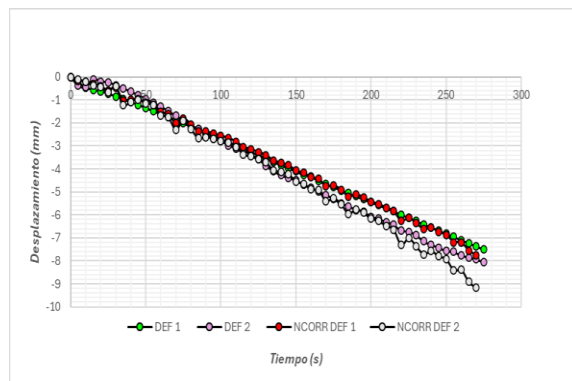
m (viga 2.7 NCORR DEF1 vs DEF1)



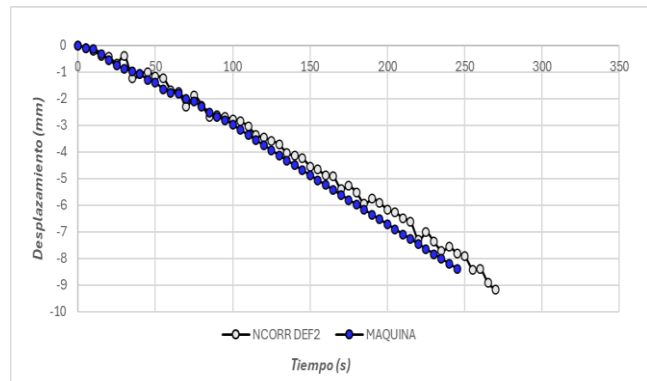
n (viga 2.7 NCORR DEF2 vs Máquina)



o (viga 2.8 NCORR DEF1 vs DEF1)



p (viga 2.8 NCORR DEF2 vs Máquina)



Los resultados obtenidos reflejan una buena concordancia entre ambos métodos de medición, lo que valida que el sistema de correlación digital de imágenes implementado es capaz de capturar de manera consistente y precisa los desplazamientos en probetas sometidas a este tipo de pruebas o en condiciones experimentales similares.

7. LIMITACIONES DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DIC.

Durante la ejecución de los ensayos experimentales se presentaron algunas limitaciones, principalmente asociadas a las condiciones actuales del Laboratorio de Estructuras, el cual aún no cuenta con todos los recursos técnicos necesarios para garantizar la total confiabilidad y continuidad de las mediciones. A continuación, se detallan las principales limitaciones identificadas:

1. **Interrupción en el registro de datos hasta la falla completa del elemento:** No fue posible capturar imágenes hasta la etapa final de los ensayos, es decir, durante la falla completa de la viga, debido a que, al ejecutar la toma continua de fotografías con la cámara, se producía un conflicto que provocaba el apagado repentino de los deformímetros, interrumpiendo su registro. Esta interferencia imposibilitó realizar una comparación completa entre los métodos de medición (DIC y deformímetros) durante todo el proceso de carga. Esta situación evidencia una limitación técnica en los equipos disponibles actualmente en el laboratorio, por lo que se recomienda la implementación de sistemas de medición digital o sensores independientes que permitan el registro simultáneo y confiable de imágenes y datos instrumentales.

2. **Limitación en el campo de visión de la cámara:** Debido a las condiciones del montaje y a la configuración de los ejes de carga de la máquina universal, sólo fue posible capturar imágenes de aproximadamente la mitad de la viga, lo que restringió la observación completa del comportamiento estructural. Adicionalmente, la viga debe ubicarse de forma diagonal entre los ejes de aplicación de carga, lo que dificulta mantener toda la (ROI) dentro del campo visual de la cámara. Esta situación representa una limitación inherente al espacio disponible y a la disposición del equipo de ensayo. Se recomienda, por tanto, explorar alternativas que permitan ampliar la cobertura visual y garantizar una mayor representatividad de las mediciones durante los ensayos.

8. CONCLUSIONES

El sistema de Correlación Digital de Imágenes, desarrollado con recursos limitados, fue implementado satisfactoriamente y demostró ser funcional, además que puede ser empleado en otros tipos de ensayos. Su versatilidad lo convierte en una alternativa viable para el estudio y análisis del comportamiento mecánico de otros elementos estructurales, e incluso en áreas como la mecánica de suelos, siempre que se garantice una correcta planificación del campo visual y condiciones de captura estables. La portabilidad y adaptabilidad del sistema lo hacen replicable en laboratorios con equipamiento limitado.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el sistema de DIC implementado presenta un desempeño confiable y adecuado para la medición de desplazamientos en ensayos estructurales. Las comparaciones con los datos obtenidos por deformímetros digitales y el sensor interno de la máquina universal muestran una alta correspondencia, especialmente en el punto coincidente con el deformímetro (NCORR DEF1), donde los errores fueron mínimos. Incluso en el punto más alejado de la región de interés (NCORR DEF2), los errores promedio se mantuvieron dentro de rangos aceptables. En todos los casos, excluyendo las vigas con condiciones atípicas, el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.98, lo que evidencia una excelente correlación lineal entre ambos métodos de medición.

Más allá de su precisión numérica, el sistema DIC ofrece la ventaja de generar campos continuos de desplazamiento y deformación en toda la superficie analizada, superando las limitaciones de los métodos tradicionales de medición puntual. Esta capacidad permite identificar trayectorias de daño, detectar la iniciación temprana de fisuras y visualizar parcialmente la distribución de fuerzas internas, convirtiéndolo en una herramienta valiosa para el análisis estructural avanzado y para una comprensión más profunda del comportamiento mecánico de los materiales.

9. RECOMENDACIONES

Se plantean unas recomendaciones puntuales sobre los parámetros por tener en cuenta para la aplicación de la técnica de DIC, con el montaje propuesto en este trabajo. Cabe reiterar que en el Anexo 1 se presenta el Manual de correlación digital de imágenes en 2D usando el software libre NCORR, en el cual se describen de manera detallada los pasos para la instalación, configuración y uso del software, así como las recomendaciones prácticas para el procesamiento de imágenes y análisis de desplazamientos.

1. Definir, mediante pruebas preliminares, la distancia óptima para la captura de imágenes, de acuerdo con el tipo de ensayo y las dimensiones de la probeta. Estas pruebas pueden incluir la comparación de la calidad de los mapas de desplazamiento obtenidos a diferentes distancias, evaluando la resolución espacial y la nitidez de las imágenes procesadas. Se recomienda mantener una distancia de captura cercana a 1 metro al utilizar lentes de distancia focal intermedia, ya que esta configuración ofrece un equilibrio adecuado entre resolución por píxel y profundidad de campo. En caso de reducir la distancia para mejorar la resolución espacial, será necesario compensar la disminución de la profundidad de campo con un aumento en la iluminación, a fin de garantizar imágenes claras y precisas para el procesamiento en DIC.
2. Establecer cuidadosamente los factores determinantes del montaje durante los ensayos como: i) establecer el tamaño adecuado de los puntos del patrón aleatorio lo cual depende de la resolución de la cámara. Puntos demasiado grandes pueden dificultar la identificación precisa de las regiones de interés en el análisis, mientras que puntos demasiado pequeños pueden perderse por la falta de definición, ii) garantizar la ortogonalidad de la cámara, respecto de la superficie de las probetas, iii) garantizar una iluminación adecuada y constante durante todo el ensayo.
3. Es recomendable mantener una frecuencia de disparo estable de 0.2 Hz a lo largo del ensayo, dado que el programa EOS Utility no soporta ritmos más lentos ni variación dinámica en tiempo real. Esto dependerá del tipo de cámara que se use y de la aplicación que permita su manejo automático, sin embargo, podría ser conveniente subir la tasa de captura justo en las etapas finales del ensayo. Es fundamental que el disparo fotográfico

continúe vinculado al pulso del controlador para asegurar la coherencia en tiempo de los datos registrados.

4. Se recomienda usar el siguiente procedimiento de ejecución del patrón aleatorio de puntos para este tipo de ensayos. Primero, aplicar una capa base de pintura blanca con alta reflectancia ($\geq 0,8$), mediante una pistola de baja presión para asegurar un espesor uniforme, y posteriormente, marcar los puntos con un aerosol negro, de partícula fina, aplicado sobre una plantilla calibrada que garantice una cobertura del $40\% \pm 3\%$. Estos parámetros ayudan a evitar efectos visuales no deseados, como patrones falsos en imágenes con poco contraste, y reducen errores en la correlación por exceso de saturación.

Para el Laboratorio de Estructuras de la FIC.

5. Se recomienda mejorar el sistema de medición de desplazamientos, si bien, la técnica de DIC logra medir con precisión campos de desplazamientos, esta es una herramienta complementaria a la instrumentación tradicional, que permite reducir costos, al disminuir el número de sensores y todas las conexiones que estos implican, pero siempre se deben tener sensores de control, los cuáles preferiblemente deben ser digitales, potenciómetros o similares, que permitan registrar los datos en forma automática y calibrada con la aplicación de la carga y la captura de las fotografías.

6. Para ensayos de probetas tipo vigas o de muros que tienen dimensiones considerables, así sea en escalas reducidas, la máquina universal, por su tamaño reducido, no permite capturar la totalidad de la superficie de las probetas, por lo tanto, es conveniente, adaptar un marco de pruebas auxiliar que facilite el registro fotográfico completo de todo el campo de desplazamientos del elemento.

7. Se recomienda mejorar los sistemas de apoyo para los diferentes sensores. Es indispensable garantizar un soporte estable, adaptable e independiente del sistema de cargas, en cada uno de los puntos en donde se requiera instalar un sensor convencional.

10. TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo con el trabajo realizado y los resultados obtenidos en este proyecto, se proponen los siguientes desarrollos a futuro en este campo, en la Facultad de Ingeniería Civil.

- Estudio de las deformaciones unitarias en probetas tipo vigas de concreto, cilindros de concreto, muros y barras de refuerzo.
- Explorar, mediante la instalación de una segunda cámara, la medición de campos de desplazamiento en tres dimensiones. Para esto, se requiere obtener o adecuar un código o software como el NCORR que permita el procesamiento de imágenes desde varios puntos.
- Determinar los parámetros adecuados para diversos tipos de ensayos, tales como ubicación de las cámaras, patrón de puntos aleatorios, frecuencia de captura de datos, parámetros del software.

11. BIBLIOGRAFÍA

1. John. L. Semmlow, and B. Griffel, Biosignal and medical image processing. 2014: CRC press.
2. J.Michel. Franco, B. M. Mayag, J. Marulanda, and P. Thomson. Static and dynamic displacement measurements of structural elements using low cost RGB-D cameras. Engineering Structures, vol. 153, pp. 97–105, Dec. 2017.
3. J. M. Franco, J. M. Caicedo, J. Marulanda, M. Sutton, and P. Thomson. RGB-DDIC technique for low-cost 3D displacement fields measurements. Engineering Structures, vol. 197, p. 109457, oct. 2019.
4. Atkinson, D., & Becker, T.H. (2020). A 117 Line 2D Digital Image Correlation Code Written in MATLAB. Remote Sensing, 12(2906), 1-22.
5. J Blaber, B Adair, A Antoniou, (2018). Ncorr: open source 2D digital image correlation matlab software, Experimental Mechanics 55 (6), 1105-1122.
6. Sutton, M; Orteu J-J; Schreier, H., Springer, 2009. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic concepts and applications.
7. Lowhikan, S.S. & Mallikarachchi, H.M.Y.C. (2021). 3D full field deformation measurement using digital image correlation [Abstract]. In P. Hettiarachchi (Ed.), Proceedings of Civil Engineering Research Symposium 2021 (p. 11). Department of Civil Engineering, University of Moratuwa.
8. M. Lopes, Conoce qué es una cámara DSLR y cuáles son sus ventajas. <https://es.digitaltrends.com/fotografia/que-es-una-camara-dslr/>
9. Reu,P. DIC: A Revolution in Experimental Mechanics. Experimental Techniques (2015), Society for Experimental Mechanics
10. E. Romeo. Two-dimensional digital image correlation for asphalt mixture characterisation: Interest and limitations. Road Mater. Pavement Des. 2013; 14:747–763. doi: 10.1080/14680629.2013.815128.
11. M. Vélez, V. Correa, “Medición de deformaciones en elementos estructurales mediante correlación digital de imágenes,” (tesis de pregrado), Antioquia, Universidad EIA, Envigado, 2021.
12. M. A. Mousa, M. M. Yussof, T. S. Hussein, L. N. Assi, and S. A. Ghahari, “A Digital Image Correlation Technique for Laboratory Structural Tests and Applications: A Systematic

- Literature Review,” Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s23239362.
13. Correlated Solution. (n.d.). Digital Image Correlation Software. Retrieved from [website].
 14. “Dantec Dynamics DIC (Optik Strain Ölçümü) | BİAS Mühendislik.” Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: <https://bias.com.tr/en/product/testmeasurement/measurement-systems/dantec-dynamics-dic-digital-imagecorrelation>
 15. T. J. Keating, P. R. Wolf, and F. L. Scarpace, “An Improved Method of Digital Image Correlation*,” 1975.
 16. Solav D, Moerman KM, Jaeger AM, Genovese K, Herr HM. (2022). DuoDIC: 3D Digital Image Correlation in MATLAB. *Journal of Open Source Software*, 7(74), 4279.
 17. M. Nowak and M. Maj, “Determination of coupled mechanical and thermal fields using 2D digital image correlation and infrared thermography: Numerical procedures and results,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 630–644, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.ACME.2017.10.005.
 18. W. Lu, Y. Cui, and J. Teng, “Structural displacement and strain monitoring based on the edge detection operator,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 191–201, Feb. 2017, doi: 10.1177/1369433216660220.
 19. O. Leibovich, D. Z. Yankelevsky, and A. N. Dancygier, “Direct Digital Image Analysis of Local Displacements and Strains in a Pull-out Test,” *Structures*, vol. 14, pp. 230–242, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2018.03.014.
 20. S. Musiał, M. Nowak, and M. Maj, “Stress field determination based on digital image correlation results,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 1183–1193, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.ACME.2019.06.007.
 21. Y. Niu, H. Huang, J. Zhang, W. Jin, J. Wei, and Q. Yu, “Development of the strain field along the crack in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under bending by digital image correlation technique,” *Cem Concr Res*, vol. 125, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2019.105821.
 22. S. Harenberg *et al.*, “Digital image correlation strain measurement of ultra-highperformance concrete-prisms under static and cyclic bending-tensile stress,” *Structural Concrete*, vol. 20, no. 4, pp. 1220–1230, Aug. 2019, doi: 10.1002/SUCO.201900033.

23. Y. Sieffert, F. Vieux-Champagne, S. Grange, P. Garnier, J. C. Duccini, and L. Daudeville, "Full-field measurement with a digital image correlation analysis of a shake table test on a timber-framed structure filled with stones and earth," *Eng Struct*, vol. 123, pp. 451–472, Sep. 2016, Doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.06.009.
24. Pereira, Ayrton y d'Almeida, Jose Roberto, Digital Image Correlation System to Evaluate the Behaviour of Thermoplastics at Large Deformation, Chemical and Materials Engineering, Rio de Janeiro: Chemical Engineering Transactions, 2019.
25. S. Suarez, "Implementación del sistema estero de correlación digital de imágenes para la medición de campos de desplazamiento en 3D a bajo costo, (tesis pregrado), Valle del Cauca, Univalle, Santiago de Cali, 2022.
26. H. A. Bruck, W. H. Peters III, S. R. McNeill y M. A. Sutton, "Digital image correlation using Newton–Raphson method of partial differential correction," *Experimental Mechanics*, vol. 29, pp. 261–267, 1989. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02321405>
27. M. A. Sutton, J. J. Orteu y H. W. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. New York: Springer, 2009. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ao-48-8-1535>
28. J. Blaber, B. Adair y A. Antoniou, "Ncorr: Open source 2D digital image correlation MATLAB software," *Experimental Mechanics*, vol. 55, pp. 1105–1122, 2015. SpringerLink
29. A. Gospodinov y S. Stoyanov, "Off axis 2D displacement fields evaluation by digital image correlation," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 54, pp. 172–185, 2024.
30. Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, pp. 1330–1334, 2000.
31. P. L. Reu, "Introduction to digital image correlation: best practices and applications," *Experimental Techniques*, vol. 39, pp. 3–4, 2015.
32. W. Wang, Y. Zhang y X. Li, "StrainNet LD: Large displacement digital image correlation based on deep learning," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 177, art. 107768, 2025.
33. B. Pan y H. Xie, "Digital image correlation in experimental mechanics and image registration," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 99, pp. 1–14, 2017.
34. H. Schreier and Y. Chu, "Field displacement measurement in composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, 2008.

35. M. A. Sutton, J. J. Orteu, and H. W. Schreier, *Digital Image Correlation: Measurement and Identification*. Springer, 2009.
36. B. Pan, Y. Wu, Z. Wang, and X. Tu, “Study on high accuracy DIC in concrete beam tests,” *Exp. Mech.*, vol. 49, no. 3, pp. 353–367, 2009.
37. H. Haddadi and S. Belhabib, “Use of rigid body motion for the investigation of subset-based digital image correlation,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 46, no. 2, pp. 185–196, 2008.
38. D. Lecompte et al., “Quality assessment of speckle patterns for DIC,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 44, no. 11, pp. 1132–1145, 2006.
39. B. Schmucker, S. Reichling, and T. Frühwald, “Digital image correlation on glulam beams under bending,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 229, 2020.
40. B. Pan and S. Furuya, “Speckle patterns for DIC in foamed concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 53, 2020.
41. M. R. Corrêa, L. A. G. da Silva, and M. de Souza, “Monitoring precast piles with DIC,” *J. Bridge Eng.*, vol. 24, 2019.
42. H. Wang and H. Vo, “DIC accuracy in thin aluminum plates,” *Meas.*, vol. 156, 2020.
43. W. Peters, W. Ranson, and M. Simons, “Determination of displacements in titanium specimens by correlation of digital images,” *Exp. Mech.*, vol. 21, 1981.
44. C. Barile and C. Casavola, “Digital image correlation in concrete: a review,” *Appl. Sci.*, vol. 11, 2021.
45. F. Torres Hernández, J. P. Garrido Rojas, and C. Núñez, “Applications of DIC in precast bridge beams,” *Eng. Struct.*, vol. 153, 2017.
46. N. Ghafoori and R. Motavalli, “Concrete slabs strengthened with CFRP monitored by DIC,” *Compos. Part B*, vol. 176, 2019.
47. J. Mascarenhas and M. Radon, “Challenges of DIC in marine piles,” *Ocean Eng.*, vol. 207, 2020.
48. J. J. Orteu, F. Bugarin, and P. Dumas, “Full field monitoring of façade panels using DIC,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, 2014.
49. J. Turon, E. Puigoriol, and L. Costa, “DIC detection of plastic zones in drywall assemblies,” *Build. Environ.*, vol. 189, 2021.
50. D. Lecompte, A. Smičiklas, and J. Vantomme, “3D DIC versus LVDT in masonry walls,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, 2011.

51. L. Boschetti and A. Pavese, "Error characteristics in DIC at increasing loads," *Mech. Mater.*, vol. 143, 2020.
52. R. Kromanis and D. Margaritis, "Optical monitoring of post tensioned bridges," *Struct. Control Health Monit.*, vol. 25, 2018.
53. Y. Wang and N. Xiao, "Stereo DIC in large scale precast members," *Sensors*, vol. 21, 2021.
54. W.E. Peters and W.F. Ranson, "Digital imaging in experimental solid mechanics," *Exp. Mech.*, vol. 24, 1984.
55. J. González Acevedo, "Aprendizaje significativo con DIC en ingeniería," *Educ. Quim.*, vol. 32, 2021.
56. Z. Shi, Z. Feng, and F. Lin, "UAV based DIC for crack monitoring in gravity dams," *Struct. Health Monit.*, vol. 20, 2021.
57. Canon Inc., EOS Utility Instruction Manual, Canon Inc., Japón, 2013. [Online]. Available: <https://www.canon-europe.com>

12. ANEXOS



12.1. ANEXO 1: MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D USANDO EL SOFTWARE LIBRE NCORR.

BRAYAN ALEXIS FERNÁNDEZ CÓRTEZ

YONATAN GUERRERO REALPE

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

POPAYÁN

2025

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. <u>Pre-procesamiento</u>	77
1.1. <u>Software libre ncoor</u>	77
1.2. <u>Requerimientos del software libre NCORR</u>	78
1.3. <u>Requerimiento de Matlab</u>	79
1.4. <u>Configuración de Mex</u>	79
1.5. <u>Instalación del software libre NCORR</u>	80
2. <u>Procesamiento</u>	82
2.1. <u>Paso 1, Configurar imagen de referencia:</u>	82
2.2. <u>Paso 2, Cargar imágenes del ensayo:</u>	83
2.3. <u>Paso 3, Definir la región de interés (ROI):</u>	84
2.4. <u>Paso 4, Configuración de parámetros de DIC para el procesamiento:</u>	85
2.4.1. <u>Consideraciones para la selección del tamaño subset</u>	86
2.4.2. <u>Criterios de correlación</u>	87
2.4.3. <u>Opciones multinúcleo</u>	88
2.4.4. <u>Análisis discontinuo</u>	88
2.5. <u>Análisis DIC</u>	89
2.5.1. <u>Establecer las Subregiones de Correlación</u>	89
2.5.2. <u>Revisión de subregiones de correlación</u>	90
2.6. <u>Paso 6, Formato de desplazamientos</u>	92
2.7. <u>Paso 7, Cálculo de desplazamientos</u>	94
2.8. <u>Paso 8, Generar Gráficas de Deformaciones y Extracción de Desplazamientos</u>	96
2.8.1. <u>Descripción del Procedimiento</u>	98
2.9. <u>Bibliografía</u>	99

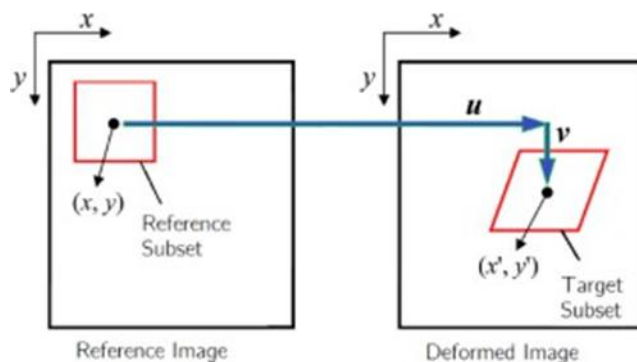
LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1. Ejemplo de un subconjunto de una imagen antes y después de la deformación [1].</i>	75
<i>FIGURA 2. Análisis del patrón de puntos.</i>	76
<i>FIGURA 3. Montaje preliminar del ensayo a flexión.</i>	76
<i>FIGURA 4. Carpetas de imágenes del ensayo.</i>	77
<i>FIGURA 5. rendimiento de la memoria RAM.</i>	78
<i>FIGURA 6. Toolbox necesarios para el procesamiento.</i>	79
<i>FIGURA 7. Interfaz visual Studio.</i>	80
<i>FIGURA 8. pasos para ejecutar el código de ncorr en matlab</i>	81
<i>FIGURA 9. Interfaz de usuario ncorr.</i>	82
<i>FIGURA 10. Cargar imagen de referencia.</i>	83
<i>FIGURA 11. Cargar las imágenes de la viga defromada.</i>	84
<i>FIGURA 12. selección de la ROI.</i>	85
<i>FIGURA 13. parámetros Dic.</i>	86
<i>FIGURA 14. Discontinuous displacements DIC analysis [5].</i>	89
<i>FIGURA 15. subregiones de interés.</i>	90
<i>FIGURA 16. correspondencia entre las Subregiones y Subsets de la ROI.</i>	91
<i>FIGURA 17. interfaz principal de NCORR durante el procesamiento.</i>	91
<i>FIGURA 18. Convertir las medidas de pixeles a mm.</i>	92
<i>FIGURA 19. Obtención de los campos de desplazamiento.</i>	94
<i>FIGURA 20. campo de desplazamientos en dirección V.</i>	95
<i>FIGURA 21. deformaciones unitarias ϵ_{xx} y ϵ_{yy}.</i>	96
<i>FIGURA 22. Extracción de coordenadas.</i>	99

MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D USANDO EL SOFTWARE LIBRE NCORR

Este manual es una adaptación del manual de NCORR desarrollado por Justin Blaber y Antonia Antoniou, del Georgia Institute of Technology, aplicado al procesamiento de imágenes de ensayos en vigas sometidas a flexión hasta la falla, (Figura 1). Se incluyen recomendaciones e instrucciones y experiencias para asegurar un procesamiento con resultados fiables, implementando de forma integral el sistema de correlación digital de imágenes en 2D de bajo costo que se ha desarrollado junto al grupo de investigación JUMOS de la Universidad del Cauca, aplicable a cualquier ensayo cuyo estudio solo se requiera en el plano bidimensional.

FIGURA 24. *Ejemplo de un subconjunto de una imagen antes y después de la deformación [1].*

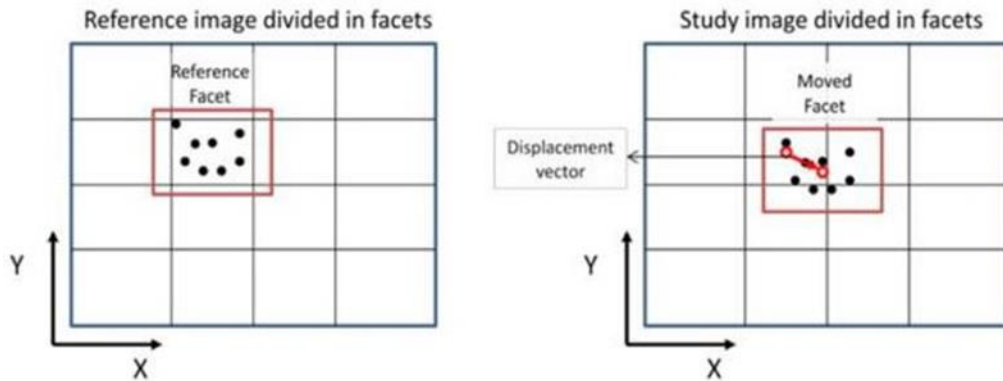


Para el ensayo de flexión en vigas de concreto reforzado, se utilizó la máquina universal de ensayos del laboratorio de estructuras de la Universidad del Cauca, configurada para aplicar la carga de manera controlada en dos puntos equidistantes del centro de la viga. La viga se fijó de forma estable en la máquina, asegurando que no se produjeran desplazamientos indeseados en el montaje durante la aplicación de la carga.

Se utilizó una cámara Canon EOS 70D, la cual se posicionó en un trípode frente a la viga, manteniendo una perpendicularidad entre el plano de la cámara y la superficie de la viga, crucial para obtener datos confiables. En la superficie o cara de estudio de la viga se aplicó un patrón de

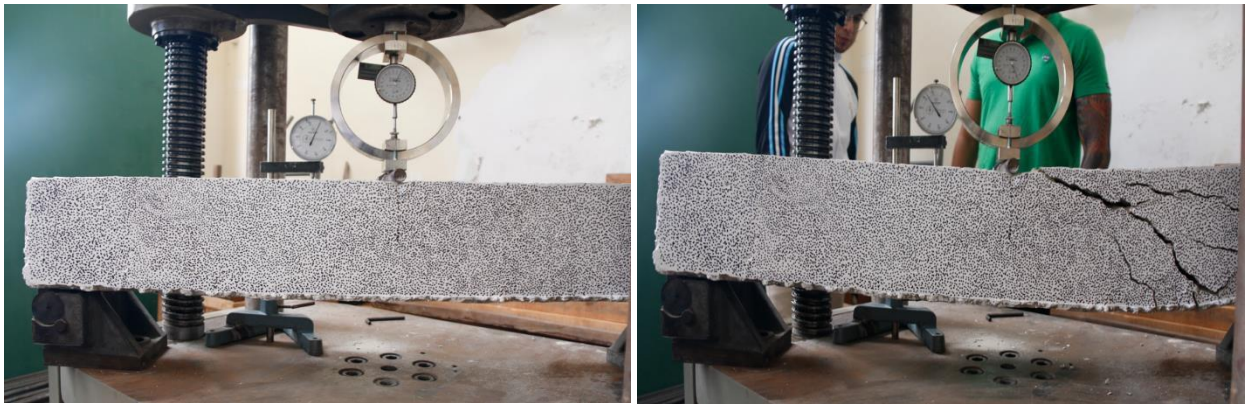
puntos aleatorios, lo cual facilita el seguimiento del desplazamiento y deformación de los puntos específicos durante el ensayo. Este patrón es indispensable para que el software NCORR identifique y analice los cambios en el área estudiada, (Figura 2).

FIGURA 25. *Análisis del patrón de puntos.*



Para optimizar el registro visual, se configuro el enfoque y los parámetros de exposición de la cámara, y se agregaron luces adicionales para lograr una iluminación uniforme. Esto minimiza sombras, reduce el ruido y mejora la claridad de los puntos en la superficie, permitiendo la captura secuencial de imágenes a intervalos específicos mediante el software EOS Utility, la frecuencia de captura de imágenes se ajustó para monitorear el desarrollo de las fisuras iniciales hasta la falla final del material, proporcionando un seguimiento detallado del comportamiento estructural. Para registrar los desplazamientos en la viga, se emplearon deformímetros de carátula digital como se muestra en la Figura 3.

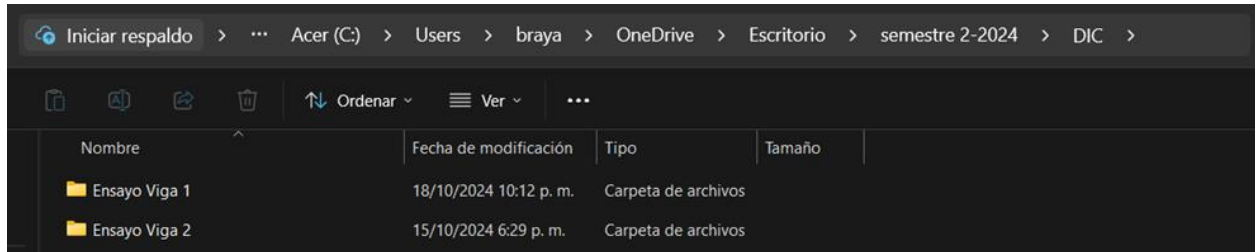
FIGURA 26. *Montaje preliminar del ensayo a flexión.*



1. PRE-PROCESAMIENTO

Una vez terminado el ensayo, guarde las imágenes tomadas durante el ensayo en una carpeta con un nombre relacionado al tipo o número de ensayo que haya realizado, como se muestra en la Figura 4.

FIGURA 27. *Carpetas de imágenes del ensayo.*



Con las imágenes obtenidas durante los ensayos, el siguiente paso es procesarlas en el software NCORR para analizar los desplazamientos y deformaciones en la viga. A continuación, se detallan los pasos para cargar, calibrar y analizar estas imágenes en NCORR.

1.1.SOFTWARE LIBRE NCOOR.

La correlación digital de imágenes en este ensayo se realiza en Matlab utilizando el software de código abierto NCORR, desarrollado por Justin Blaber y Antonia Antoniou del Georgia Institute of Technology. Este software permite implementar un sistema 2D DIC de bajo costo, el cual se ha venido desarrollando en la Universidad del Cauca junto al grupo de investigación JUMMOS. Una de las principales ventajas de NCORR es su interfaz fácil de usar, que simplifica el proceso de análisis DIC dentro del entorno Matlab. Además, emplea algoritmos avanzados optimizados con tecnología C++/MEX o MinGW-w64 C/C++/Fortran Compiler, lo que mejora la velocidad y eficiencia del procesamiento, convirtiéndolo en una herramienta potente y accesible para los usuarios.

Este manual integra el manual original propuesto por Blaber con experiencias en el análisis de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión.

1.2. REQUERIMIENTOS DEL SOFTWARE LIBRE NCORR.

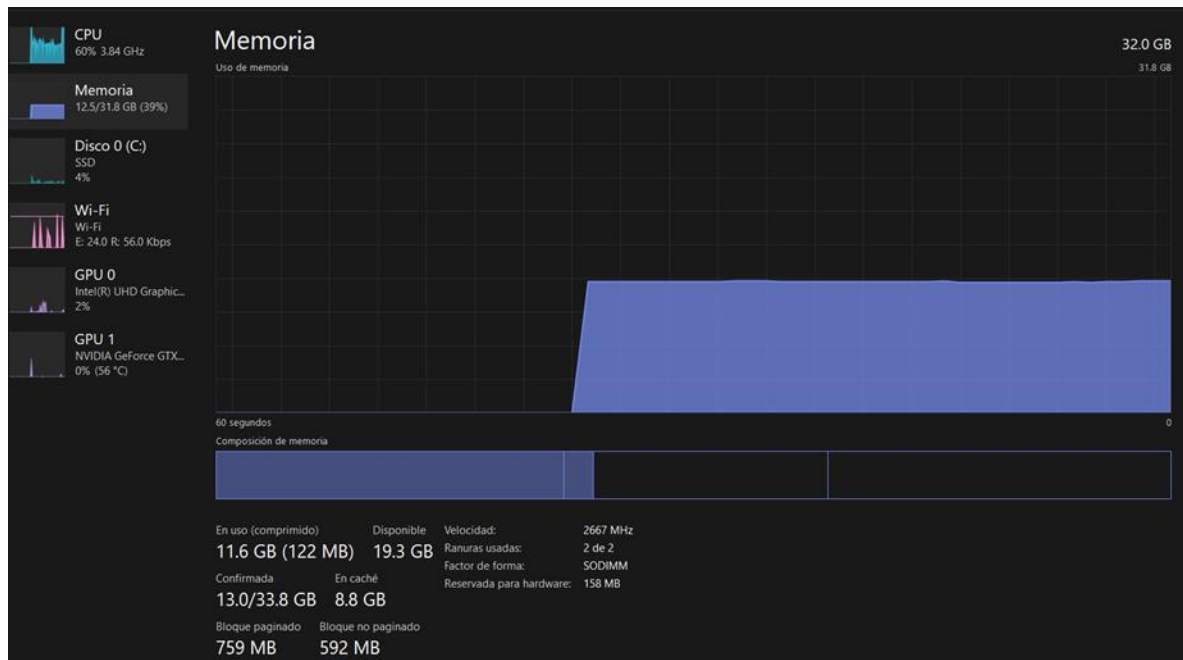
Los requerimientos de hardware dependen principalmente de la cantidad y la resolución de las imágenes que se van a procesar. Si se va a trabajar con imágenes de alta resolución, como las obtenidas con la cámara Canon EOS 70D, que tiene una resolución máxima de 20.2 megapíxeles y captura imágenes de 6000x4000 píxeles, se necesita un equipo con un buen rendimiento. Sin embargo, estos requisitos pueden disminuir si la resolución de las imágenes es más baja.

Para realizar el procesamiento del ensayo propuesto, se utilizó un equipo con las siguientes características:

- **Procesador:** Intel® Core™ i5-8300H (4 núcleos, 2.3GHz - 4GHz).
- **Memoria RAM:** 32GB DDR4.
- **Tarjeta gráfica:** NVIDIA® GeForce® GTX 1050 4GB.
- **Sistema operativo:** Windows 11 64 Bit.

La principal limitación en el procesamiento con NCORR se encuentra en la capacidad de la memoria RAM, que es fundamental para manejar grandes cantidades de datos e imágenes de alta resolución, como se muestra en la Figura 5.

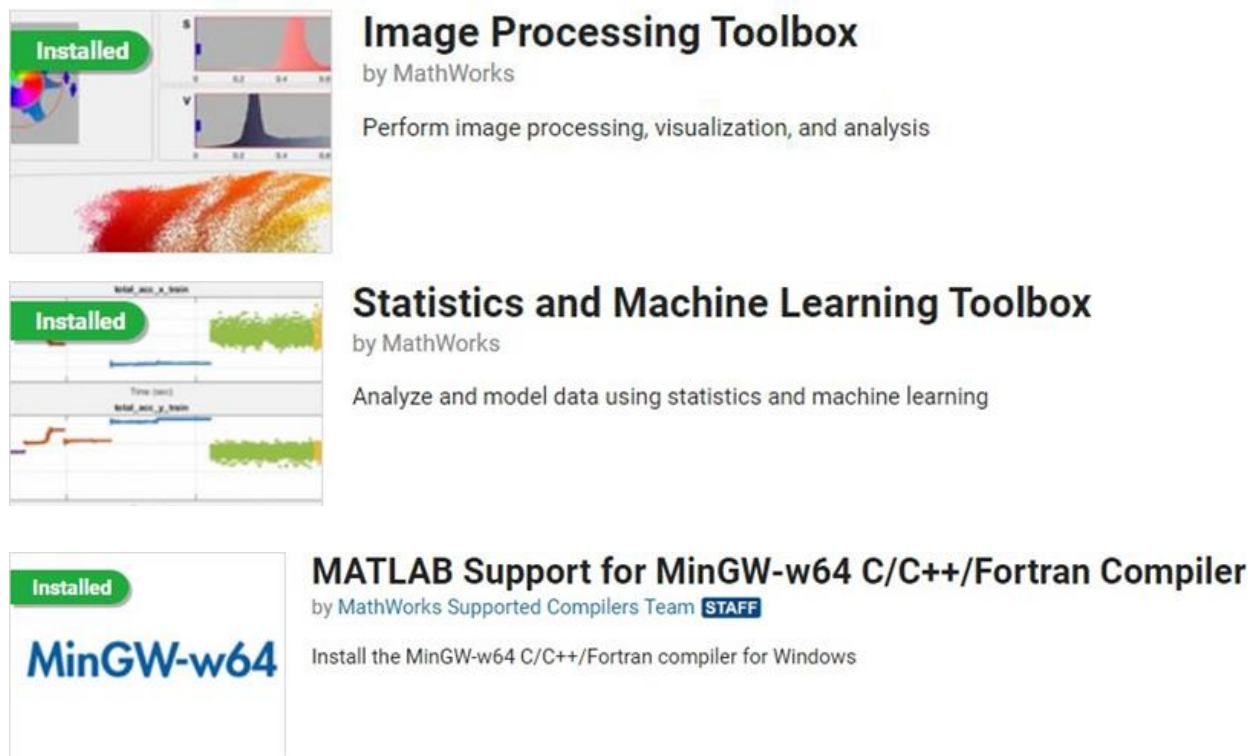
FIGURA 28. *Rendimiento de la memoria RAM.*



1.3.REQUERIMIENTO DE MATLAB.

NCORR fue desarrollado en Matlab, versión R2009a, y se ha testado en la versión R2024a y R2024ab. Para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes con NCORR, es necesario instalar los siguientes Toolbox de Matlab, los que son indicados en la Figura 6, ellos contienen diferentes funciones que serán utilizadas durante el flujo de trabajo.

FIGURA 29. *Toolbox necesarios para el procesamiento.*



1.4.CONFIGURACIÓN DE MEX

Debido a que NCORR utiliza algoritmos de alto nivel desarrollados en C++/MEX y librerías STL, es necesario instalar un compilador de C++ para integrar dichos algoritmos con Matlab. Mayores detalles pueden encontrarse en el manual de instrucciones de Ncorr, que está en los siguientes enlaces: <https://www.ncorr.com/> y https://github.com/justinblaber/ncorr_2D_matlab. Se recomienda instalar el software Microsoft Visual Studio C++, cuya interfaz se indica en la Figura 10, ya que permite activar el procesamiento de imágenes con todos los núcleos de forma simultánea al ser compatible con OpenMP, acelerando el procedimiento. La descarga puede ejecutarse desde el siguiente enlace: visualstudio.microsoft.com/es/.

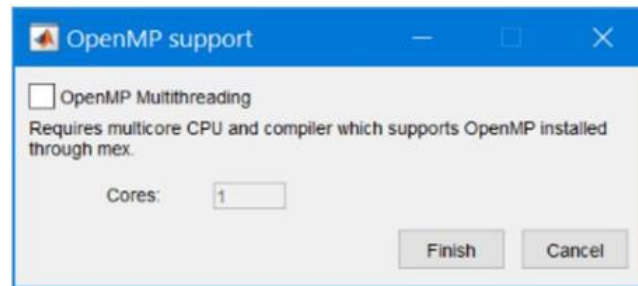
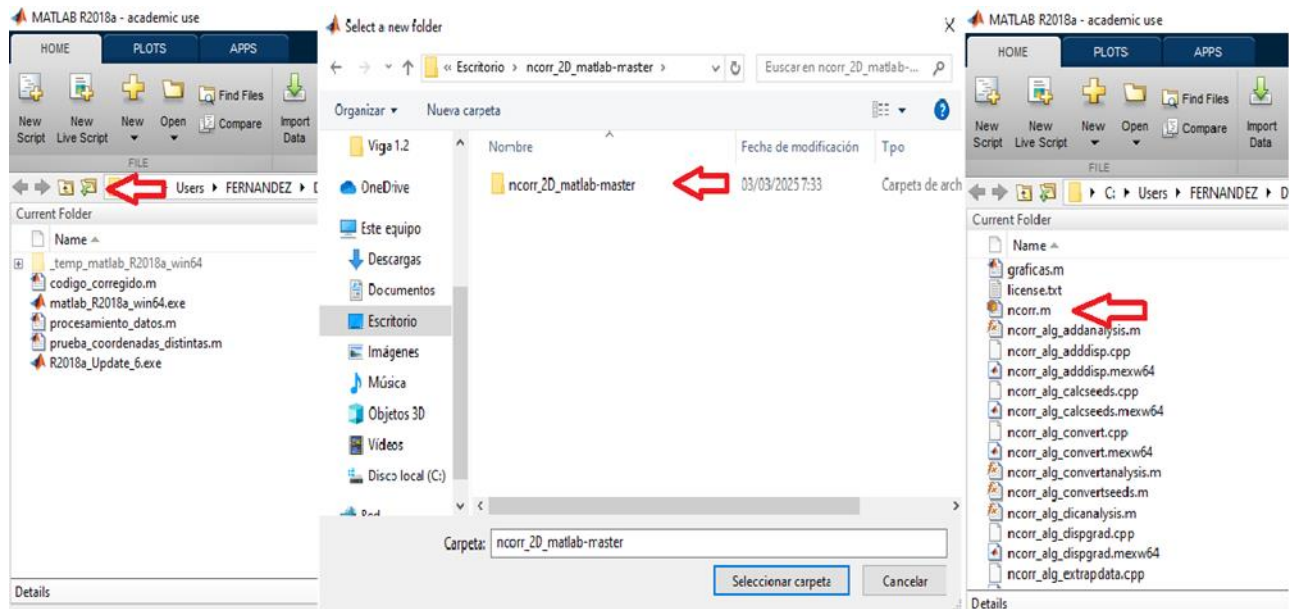
FIGURA 30. *Interfaz visual Studio.*



1.5.INSTALACIÓN DEL SOFTWARE LIBRE NCORR

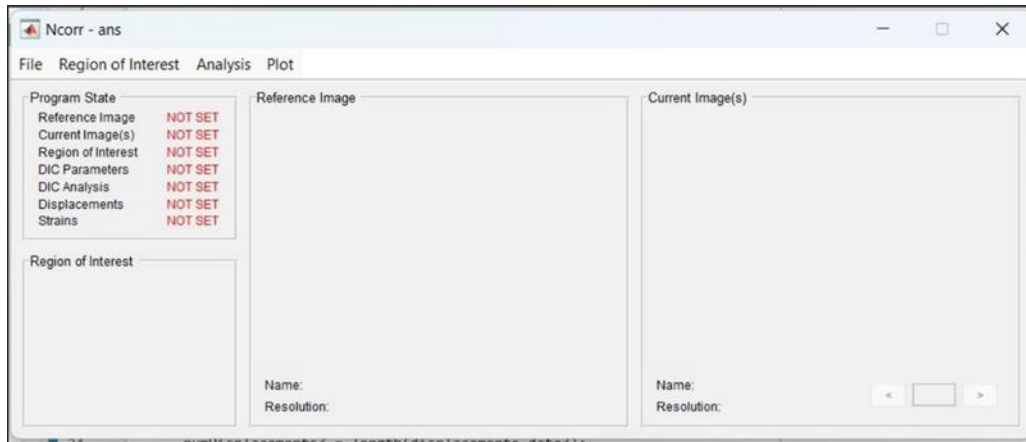
Después de instalar el compilador de C++, abra MATLAB y diríjase a la parte superior izquierda de la pantalla principal. Haga clic en el icono "Browse for Folder", lo que abrirá una ventana de búsqueda. Seleccione la carpeta donde tiene guardado NCORR, ábrala y, dentro de ella, localice el archivo con extensión ".m", como se indica en la Figura 8. Para ejecutar NCORR, arrastre este archivo a la ventana de comandos ("Command Window") o, escriba y ejecute la siguiente instrucción: "handles_ncmp = ncmp". Esto compilara todos los archivos necesarios de NCORR, y guardara los archivos MEX de Matlab en la carpeta de NCORR, esto proporciona una interfaz entre Matlab y las funciones escritas en C++, añadiendo los archivos necesarios a la ruta de búsqueda de Matlab. Este comando solo debe ejecutarse una única vez. Al terminar, aparecerá un cuadro de dialogo de OpenMP support, desde el cual se debe activar el procesamiento con múltiples núcleos de la CPU. Para ello, de clic en la casilla "OpenMP Multithreading" y seleccione la totalidad de los núcleos con los que cuenta su equipo, en este caso se utilizaron los 4 núcleos del procesador. De clic en "Finish" para terminar la instalación.

FIGURA 31. Pasos para ejecutar el código de NCORR en MATLAB



Si todos los archivos se han compilado de forma exitosa, se desplegará la interfaz de NCORR, como se muestra en la Figura 9. Esto confirma que la instalación de NCORR se ha completado correctamente y que se puede iniciar el procesamiento.

FIGURA 32. *Interfaz de usuario NCORR*



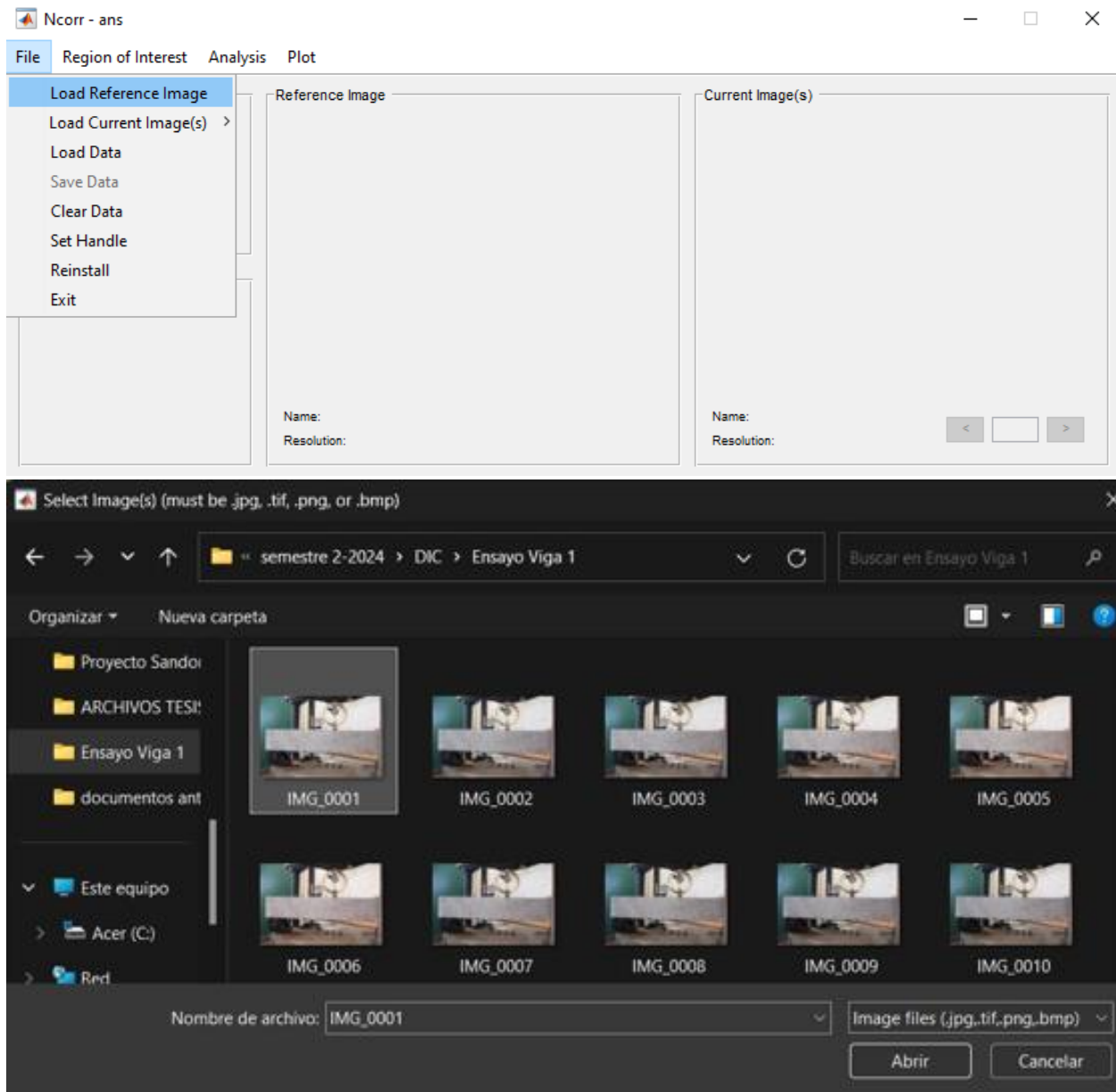
2. PROCESAMIENTO

Blaber desarrolló un enfoque para el procesamiento de imágenes que consta de siete pasos secuenciales, dividiendo el proceso en etapas definidas. Esta metodología no solo aligerar la carga computacional, sino que también simplifica el flujo de trabajo, haciéndolo más intuitivo. A continuación, se detallan los pasos necesarios para llevar a cabo el análisis de imágenes en 2D con el software NCORR.

2.1.PASO 1, CONFIGURAR IMAGEN DE REFERENCIA:

En el primer paso, se debe seleccionar una imagen de referencia para iniciar el procesamiento. Esta imagen representa el estado inicial de la viga sin carga aplicada y servirá como base para calcular y analizar las imágenes deformadas posteriormente. Para ello, dirígete a la interfaz principal de NCORR, como se muestra en la Figura 10 y da clic en abrir. Todas las imágenes deben estar en formato JPG, TIF, PNG o BMP.

FIGURA 33. *Cargar imagen de referencia.*

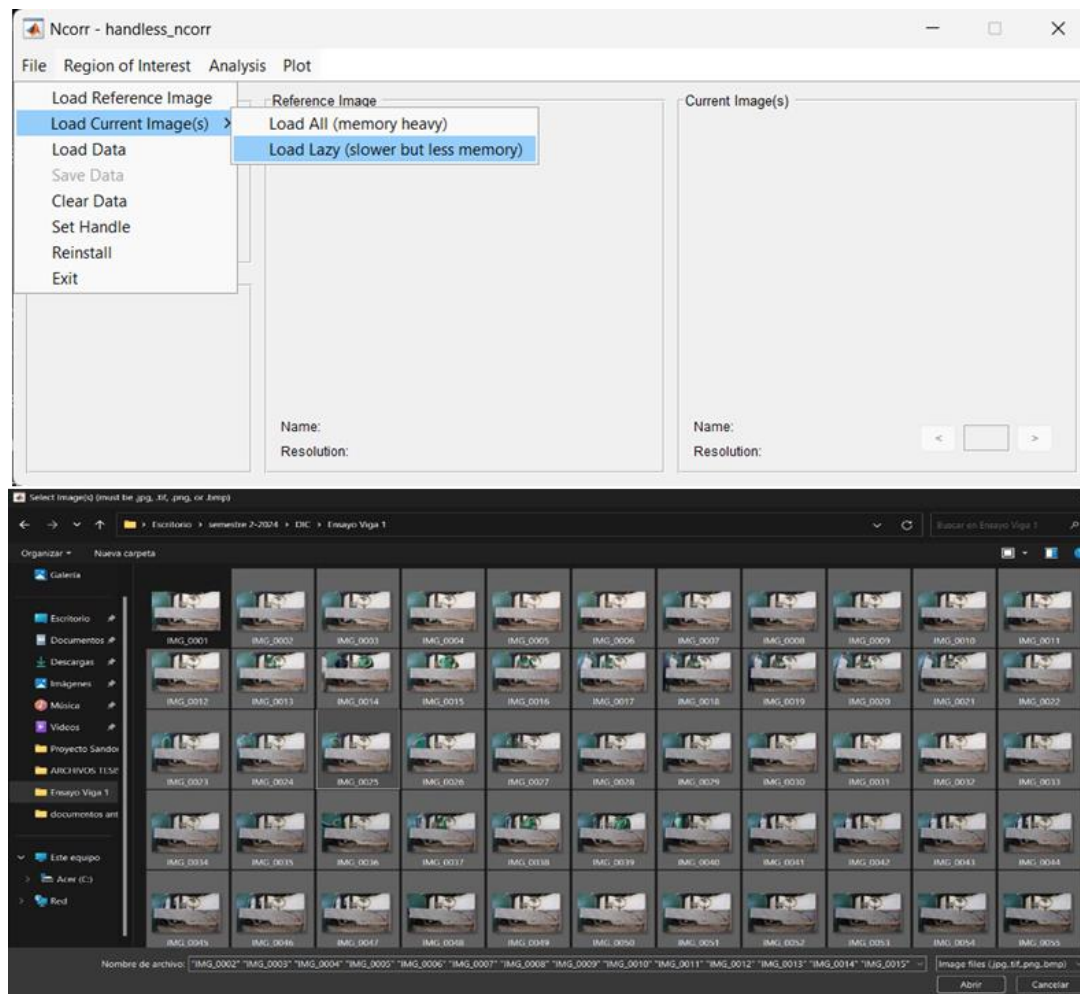


2.2.PASO 2, CARGAR IMÁGENES DEL ENSAYO:

En el segundo paso, es necesario cargar las imágenes que documentan el desarrollo del ensayo hasta la falla de la viga. Este conjunto incluye los fotogramas tomados de forma secuencial para registrar cada fase del ensayo. Para realizar este procedimiento, ingresa a la interfaz principal de NCORR, haz clic en “File” y selecciona la opción “Load Current Images”. Si cuentas con un procesador con buena capacidad de memoria RAM, puedes usar la opción “Load All”, que

consume más memoria, pero permite un acceso más rápido a las imágenes. De lo contrario, se recomienda la opción “Load Lazy”, que reduce el consumo de memoria. A continuación, elige todas las imágenes en las que la viga está siendo cargada y deformada, que desees procesar como se muestra en la Figura 11.

FIGURA 34. Cargar las imágenes de la viga deformada.

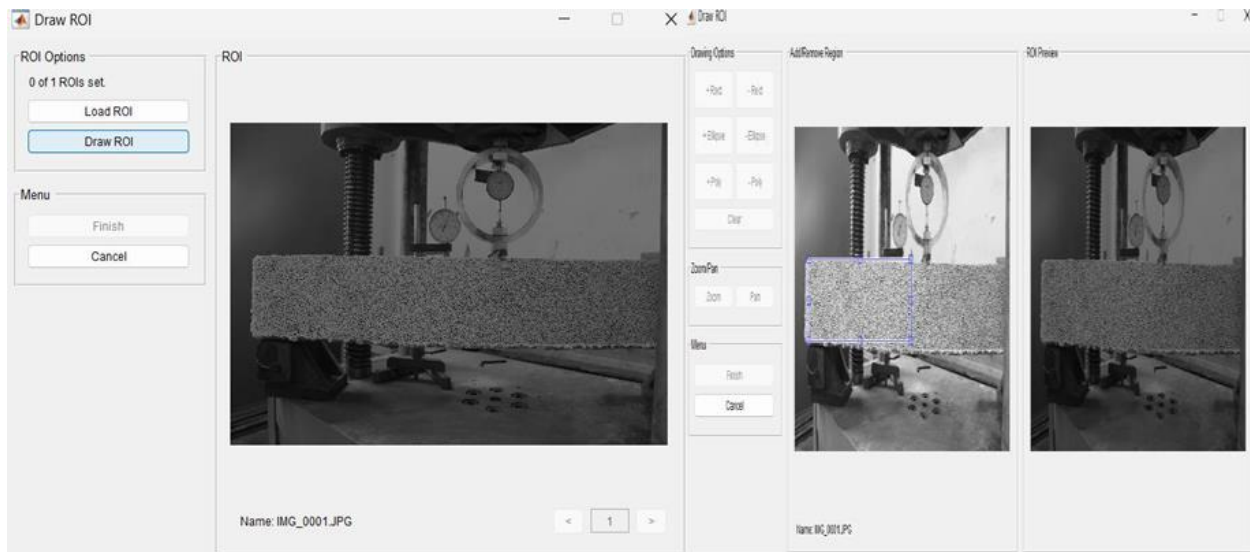


2.3.PASO 3, DEFINIR LA REGIÓN DE INTERÉS (ROI):

En este paso, debes seleccionar en la imagen de referencia la parte específica de la viga que se desea analizar mediante la correlación de imágenes. NCORR ofrece herramientas de dibujo que permiten delinear con precisión la geometría de la viga, excluyendo las áreas que no son relevantes para el análisis.

Para definir la ROI, ve a la pestaña “Region of Interest” en la interfaz principal de NCORR y elige “Draw ROI” en el menú desplegable. Esto abrirá una ventana de edición donde podrás usar la herramienta “+Rect” para dibujar un rectángulo que abarque completamente la región de análisis, como se muestra en la Figura 12. La ROI funciona como una máscara sobre la imagen, limitando el procesamiento a los píxeles de la zona de interés, optimizando así la resolución y facilitando el cálculo de la correlación.

FIGURA 35. Selección de la ROI.



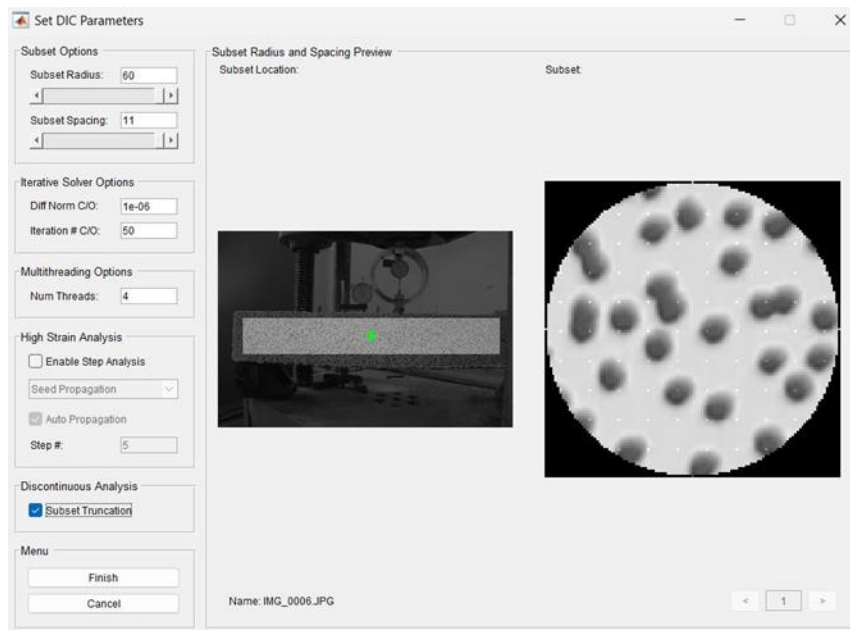
Nota: Evita dibujar la ROI muy cerca de los bordes físicos de la viga o en áreas sin datos, ya que esto podría generar advertencias de correlación en los contornos y afectar la representatividad de los datos.

2.4.PASO 4, CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DE DIC PARA EL PROCESAMIENTO:

El siguiente paso, es crucial, ya que la precisión y la confiabilidad de los resultados dependen en gran medida de una configuración adecuada de estos parámetros. En esta etapa, es necesario definir aspectos importantes del procesamiento de imágenes, como el tamaño de la subregión de estudio (Subset Radius), el tamaño del paso (Subset Spacing), los criterios de correlación para el ajuste iterativo y la habilitación de opciones como el procesamiento multinúcleo, análisis de alta deformación y análisis de discontinuidades.

Para configurar estos parámetros, accede a la pestaña “Set DIC Parameters” en la interfaz principal de NCORR. Se abrirá una ventana donde deberás ingresar los valores correspondientes a cada parámetro, según el tipo de ensayo y las características de la viga. Una vez completados los datos, haz clic en “Finish” y confirma con “Yes” para continuar. Se recomiendan valores pequeños dependiendo del patrón de puntos, donde se alcance a tener buena densidad de puntos para tener mejores resultados para cada parámetro, en la Figura 13 se muestran los valores escogidos para este ensayo, donde se puede observar la región de interés y una vista previa del subset en el lado derecho.

FIGURA 36. *Parámetros DIC.*



A continuación, se explican en detalle cada uno de los parámetros y como deben ser definidos.

2.4.1. Consideraciones para la selección del tamaño subset.

La elección del tamaño del subset en el análisis de correlación digital de imágenes es crucial y depende tanto de la resolución de las imágenes como de la calidad y disposición del patrón de puntos aplicado a la superficie de la viga. La densidad y el tamaño de cada punto del patrón, así como la distancia entre estos, influyen directamente en el valor óptimo del subset: a mayor distancia entre puntos, el subset deberá ser más grande para cubrir los espacios y permitir una correlación adecuada, y viceversa. Como sugiere el libro Digital Image Correlation for Shape and

Motion de Sutton, es importante seleccionar el subset más pequeño posible que minimice el ruido en las mediciones y asegure una correlación precisa entre la imagen de referencia y las imágenes deformadas, evitando errores en el proceso.

La elección del subset se realiza típicamente mediante un proceso iterativo de prueba y error, ajustando su tamaño en función de las condiciones específicas del ensayo y observando si los resultados son consistentes y libres de errores de correlación. En el caso de

las vigas de concreto reforzado, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para determinar el valor del subset que produjera resultados más fiables, considerando la distancia y calidad del patrón de puntos aplicado a las vigas bajo estas condiciones experimentales. Este enfoque permitió establecer un subset óptimo de píxeles, adecuado para la distribución específica del patrón de puntos en el ensayo (Figura 13).

Nota: Si el subset seleccionado es demasiado pequeño y durante el ensayo se producen grietas o daños significativos en la probeta que alteren las condiciones de la superficie del patrón de puntos, o si el desplazamiento entre una imagen y la siguiente es considerablemente grande en relación con el tamaño del subset, podrían aparecer errores de correlación. Esto resultaría en áreas sin datos, lo que haría necesario aumentar el tamaño del subset para corregir dichos errores. Otro aspecto que influye en el tamaño del subset son las condiciones superficiales de la probeta. Si la superficie presenta elementos que generan irregularidades fuera del plano.

2.4.2. Criterios de correlación.

NCORR emplea la técnica de "alineación inversa de imágenes compuestas" como método iterativo para la correlación de imágenes. Esta técnica ajusta la imagen de referencia con las imágenes deformadas, minimizando la diferencia entre ellas en términos de los valores de píxeles. El algoritmo realiza un análisis exhaustivo, iterando hasta encontrar la transformación que mejor alinee la imagen de referencia con cada imagen deformada, es decir, hasta lograr la alineación óptima de las imágenes mediante una transformación inversa acumulativa.

Para realizar un análisis más rápido y reducir la carga computacional, puede disminuir el número de iteraciones del algoritmo y ampliar el rango de tolerancia, permitiendo así que se acepten diferencias mínimas entre los valores de los píxeles en las imágenes correlacionadas. Esto

acelera el procesamiento, aunque puede afectar ligeramente la precisión en la alineación final de las imágenes.

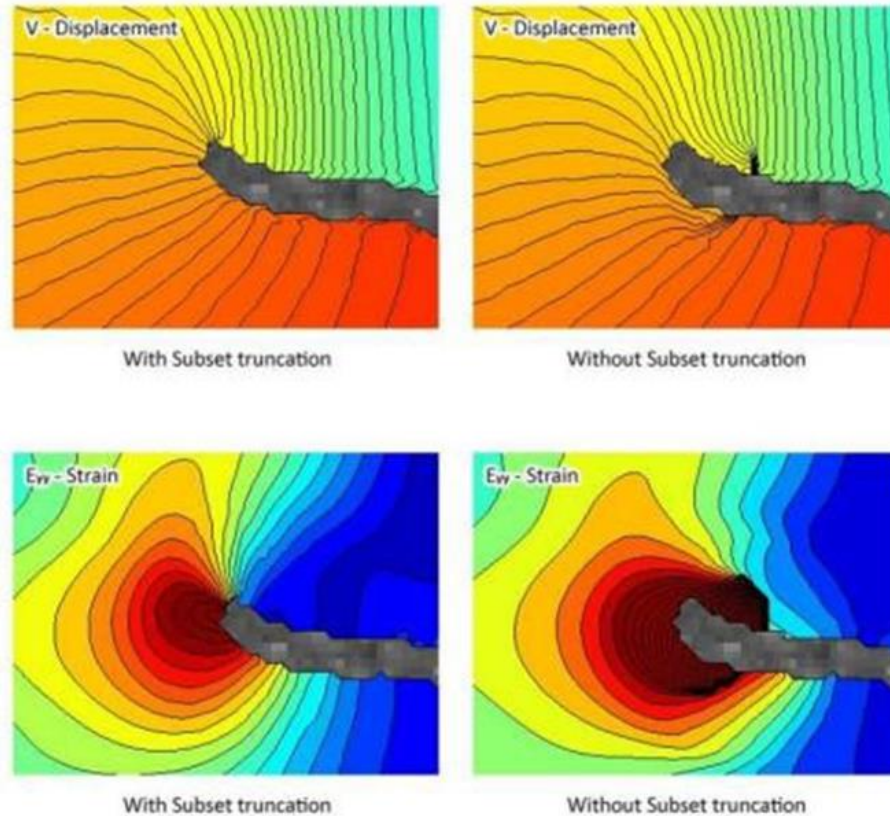
2.4.3. Opciones multinúcleo.

El número de núcleos utilizados para el procesamiento depende de la capacidad computacional disponible. En este análisis se emplearon 4 núcleos de forma simultánea para el procesamiento. Sin embargo, si se dispone de más núcleos, es recomendable utilizarlos, ya que esto permitiría que el proceso sea más rápido y eficiente.

2.4.4. Análisis discontinuo.

Para el ensayo de vigas de concreto sometidas a flexión, en las que se observan grandes deformaciones y formación progresiva de grietas, es crucial activar la opción de análisis discontinuo (Subset Truncation) durante el procesamiento. Esta configuración permite al software limitar el alcance de los subsets, evitando que se extiendan sobre las zonas con grietas, donde suelen ocurrir errores de correlación y distorsiones en los datos de desplazamiento. La activación de esta opción es clave para un análisis preciso, ya que facilita una mejor interpretación del comportamiento mecánico de las vigas al restringir la influencia de las discontinuidades provocadas por las grietas, como se muestra en la Figura 14. Por otro lado, si el ensayo no presenta grandes deformaciones ni grietas relevantes, la opción puede desactivarse sin afectar la precisión de los resultados.

FIGURA 37. *Discontinuous displacements DIC analysis* [5].



2.5. ANÁLISIS DIC

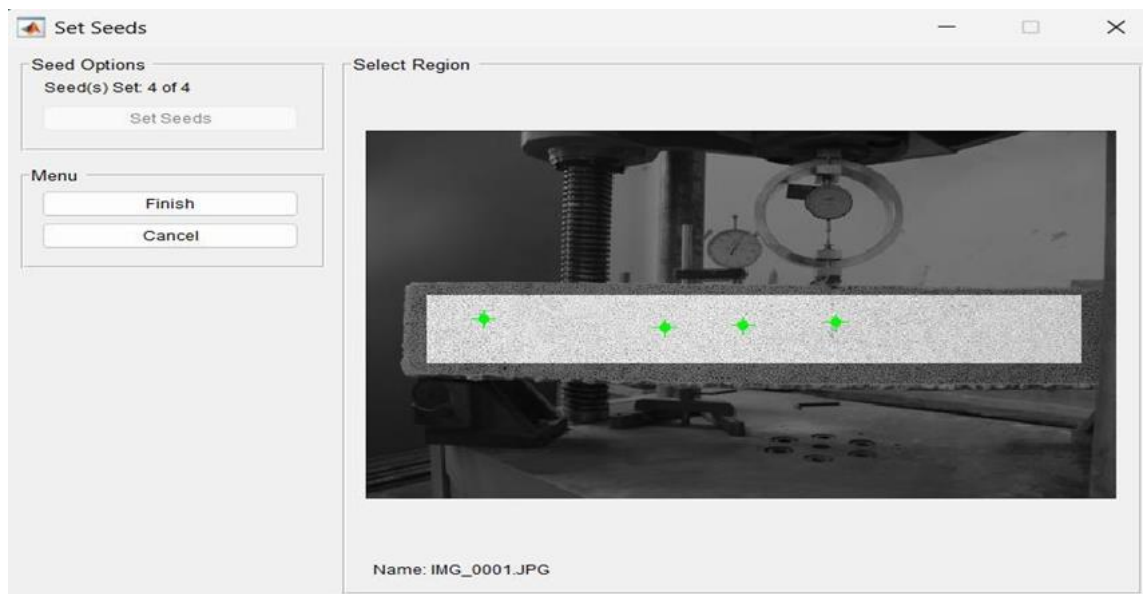
Para realizar el análisis DIC, acceda a la interfaz principal de NCORR y haga clic en la pestaña “Analysis”, luego seleccione la opción “Perform DIC Analysis”. Esto dará inicio al análisis de las imágenes. A continuación, debe seguir los pasos indicados para ejecutar el procesamiento de manera exitosa.

2.5.1. Establecer las Subregiones de Correlación.

Para definir las "Seeds" o subregiones de correlación, se abrirá una ventana en la que se debe especificar la ubicación de estas subregiones. Esto permite un procesamiento en paralelo, optimizando el uso del procesador y reduciendo el tiempo de análisis, siempre que se haya habilitado el procesamiento multinúcleo. Haz clic en “Set Seeds” y distribuye de manera uniforme los centros de las subregiones, asegurando que tengan un tamaño uniforme y una forma regular. Si se utiliza un único núcleo, solo necesitas colocar el centro en la ROI.

Es importante que las subregiones permanezcan dentro del campo de visión de las cámaras durante el ensayo, ya que una ubicación incorrecta podría provocar errores significativos de correlación y requerir un reajuste de las subregiones. En el ensayo a flexión de vigas, se utilizó la opción de procesamiento multinúcleo, ya que el procesador disponible contaba con 4 núcleos. Esto permitió dividir la ROI en cuatro subregiones para un procesamiento simultáneo ver Figura 15. Para finalizar, haz clic en “Finish” para que el software proceda a calcular la ubicación de las subregiones y los subsets para todas las imágenes del ensayo, un proceso que puede llevar cierto tiempo.

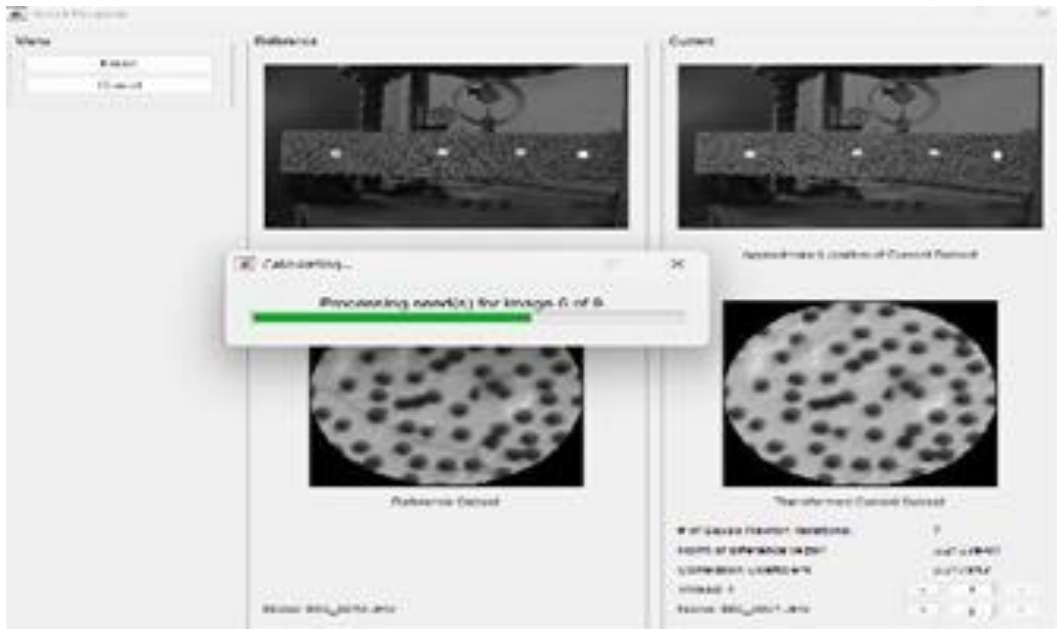
FIGURA 38. *Subregiones de interés.*



2.5.2. Revisión de subregiones de correlación.

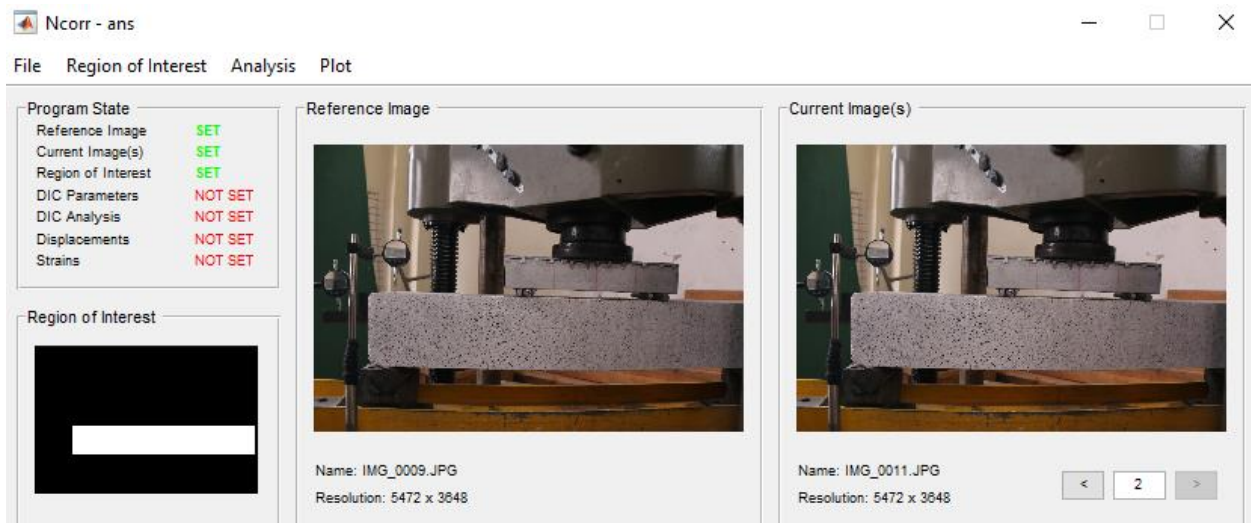
Al finalizar el procesamiento inicial, se presentará una vista previa de cada subregión y de los subsets de la ROI para todas las imágenes en relación con la imagen de referencia. Es esencial revisar visualmente que el subset de referencia de cada subregión coincida correctamente con el subset de la última imagen deformada (Figura 16). Una vez confirmada la correspondencia en todas las subregiones, haz clic en “Finish” para proceder con el procesamiento completo de las imágenes.

FIGURA 39. Correspondencia entre las Subregiones y Subsets de la ROI.



Hasta este punto, el procesamiento está casi completo. En la interfaz principal de NCORR, se muestra el estado de cada paso del flujo de trabajo mediante un sistema de colores. Los pasos que ya se han completado aparecen en verde con la palabra "SET", mientras que los pasos pendientes se muestran en rojo con la palabra "NO SET". Este sistema de interfaz con lista de verificación facilita al usuario el seguimiento del progreso del procesamiento de manera intuitiva como se observa en la Figura 17.

FIGURA 40. Interfaz principal de NCORR durante el procesamiento.



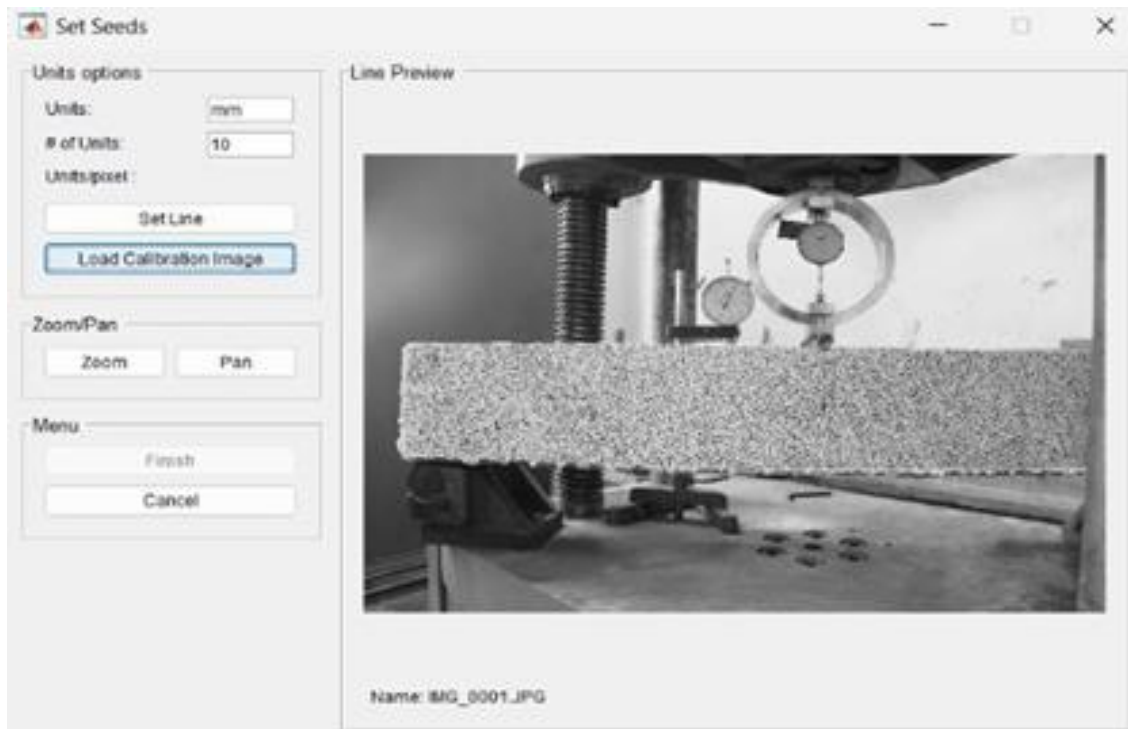
2.6.PASO 6, FORMATO DE DESPLAZAMIENTOS

En esta etapa, se realiza la conversión de los desplazamientos medidos en píxeles a unidades físicas reales, específicamente de píxeles a milímetros. Para llevar a cabo este proceso, en la interfaz principal de NCORR, haga clic en la pestaña “Analysis” y seleccione la opción “Format Displacements”. Se abrirá una ventana en la que debe hacer clic en “Get Unit Conversion”.

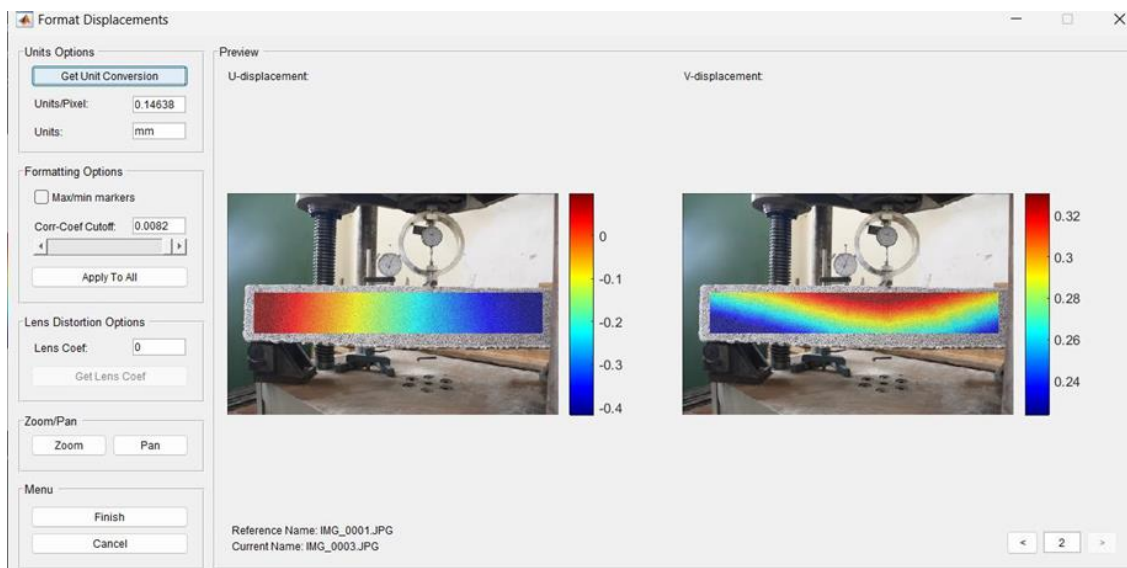
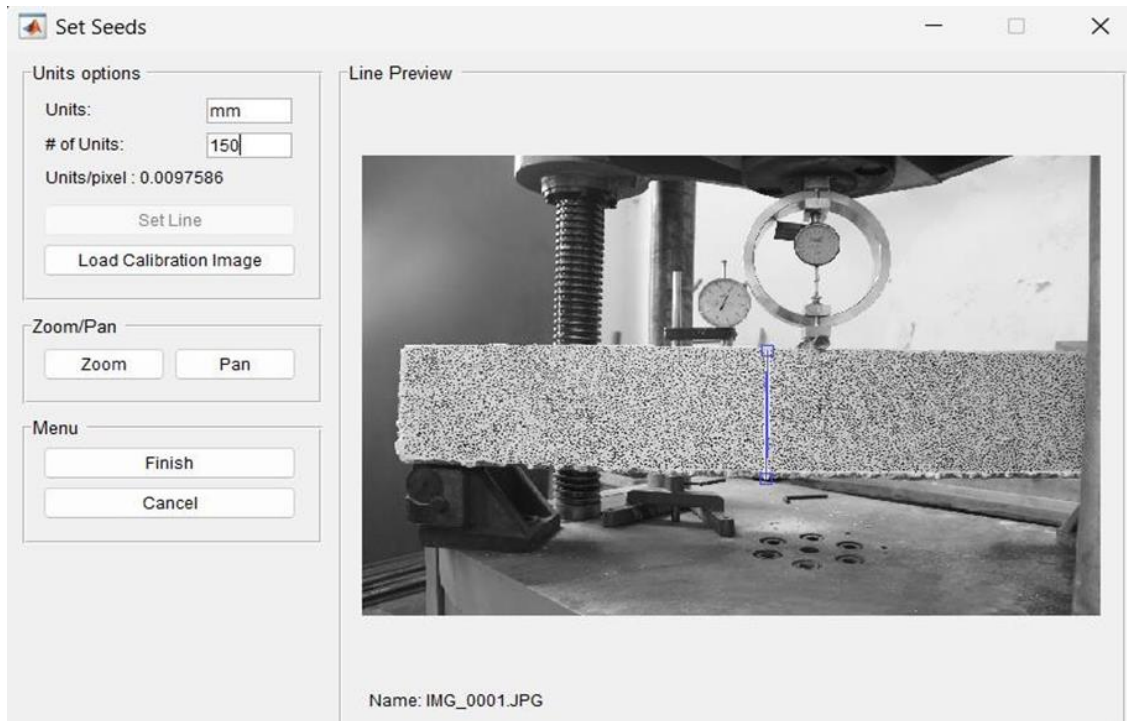
A continuación, se le pedirá que cargue una imagen de calibración (puede ser la imagen de referencia). Sobre esta imagen, debe dibujar una línea de longitud conocida para obtener un factor de conversión entre píxeles y milímetros. Una vez que haya realizado este paso, haga clic en “Finish” para que el software aplique la conversión y ajuste los desplazamientos de todas las imágenes del análisis.

Este procedimiento es fundamental para traducir las mediciones obtenidas en la correlación en unidades físicas que puedan ser interpretadas y usadas en los cálculos estructurales del ensayo para comprender este procedimiento en la Figura 18 se presentan imágenes del paso a paso.

FIGURA 41. *Convertir las medidas de pixeles a mm.*



continuación Figura 18.

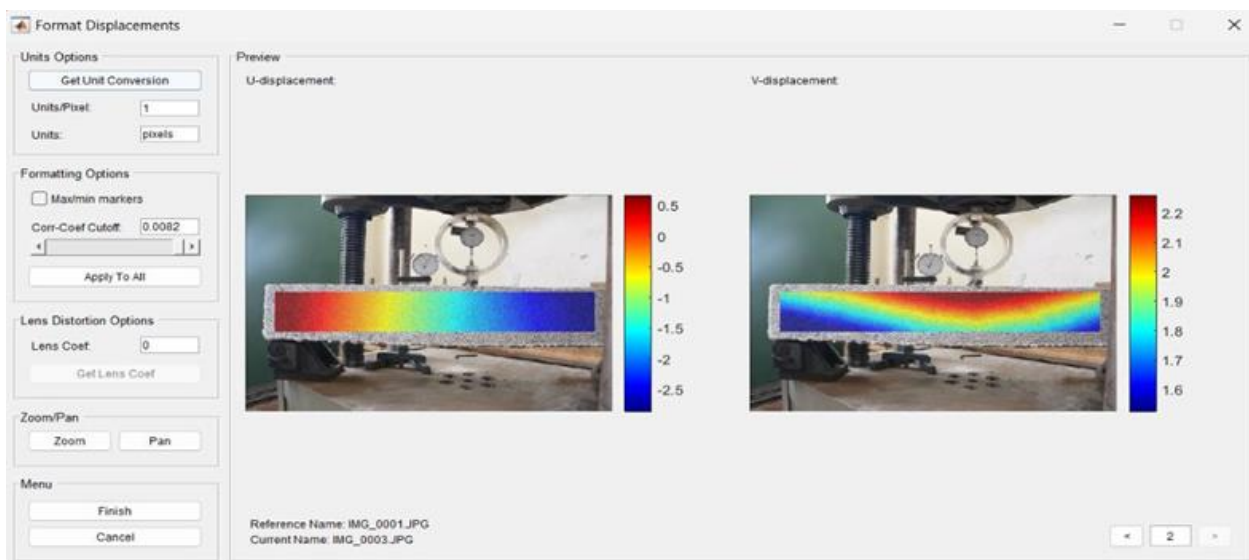


2.7.PASO 7, CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS.

En este paso, NCORR calcula los desplazamientos, empleando el ajuste de plano por mínimos cuadrados. Los campos de desplazamiento generados permiten visualizar con claridad la progresión de los daños en las vigas, los patrones de agrietamiento y las zonas de alta concentración de desplazamientos, todo representado en una escala de colores. Esta información es crucial para realizar un análisis más exhaustivo de las probetas, considerando variables adicionales.

Para realizar este paso, en la interfaz principal de NCORR, debe hacer clic en la pestaña “Analysis” y luego seleccionar la opción “Calculate Strains”. Después de debe hacer clic en “Finish” para iniciar el cálculo de los desplazamientos como se muestra en la Figura 19.

FIGURA 42. *Obtención de los campos de desplazamiento.*



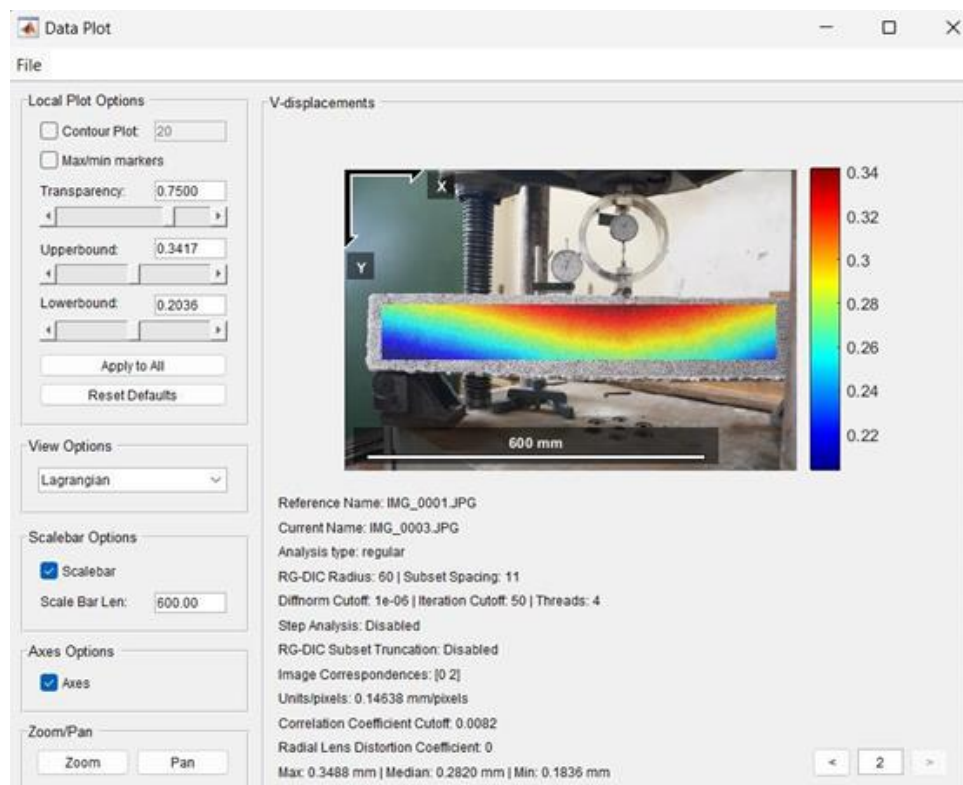
Una vez completado el cálculo de las deformaciones y desplazamientos, el procesamiento de las imágenes estará concluido. En la interfaz principal de NCORR, el estado de todos los pasos del flujo de trabajo del programa aparecerá resaltado en verde con la palabra "SET", indicando que cada etapa ha sido completada con éxito.

Para guardar los resultados del procesamiento, debe hacer clic en la pestaña "File" y seleccionar la opción "Save Data". Esto generará un archivo .mat que contiene los resultados de cada paso y de la correlación digital de imágenes. Este archivo debe ser post-procesado con Matlab

para extraer mediciones de desplazamiento y deformación en puntos específicos dentro de la región de interés (ROI) seleccionada.

Desde la interfaz principal de NCORR, se pueden visualizar los resultados haciendo clic en la opción "Plof". Esto desplegará un listado de los resultados disponibles, los cuales son representados gráficamente. Estos gráficos también pueden ser exportados en forma de fotogramas procesados individualmente o como un GIF acumulativo que ilustre las deformaciones a lo largo del tiempo. En la Figura 20, se presentan los desplazamientos en la dirección "V" o en el plano "Y", mostrando cómo varía la escala de colores y los datos arrojados en imagen de referencia después del procesamiento.

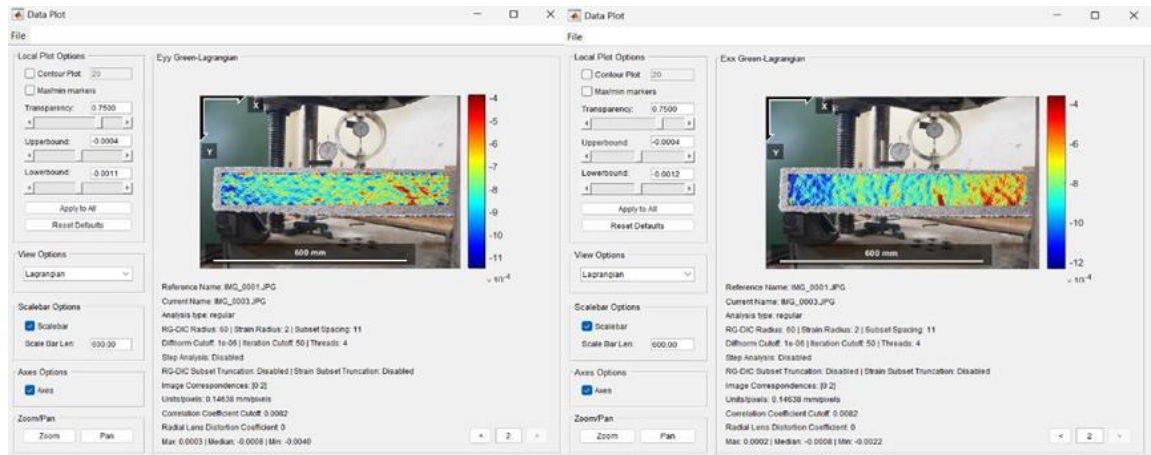
FIGURA 43. *Campo de desplazamientos en dirección V.*



También se puede verificar las deformaciones unitarias, como la deformación unitaria ϵ_{xx} en la dirección horizontal de la probeta, calculada utilizando el tensor de Green- Lagrangian. En la visualización, se resalta en color rojo la zona donde se concentran las deformaciones a medida

que se aplica la carga de tracción. Además, se puede observar la deformación unitaria ϵ_{yy} en la dirección vertical de la probeta, mostrando en azul la forma en que la sección de la probeta se reduce a medida que se desarrolla el ensayo. En la Figura 21, se ilustran ambas deformaciones, destacando las áreas de mayor concentración de tensiones y la evolución de la reducción de la sección bajo carga y además de estas también NCORR nos presenta resultados de las deformaciones unitarias principales ϵ_{xx} y ϵ_{yy} .

FIGURA 44. *Deformaciones unitarias ϵ_{xx} y ϵ_{yy} .*



2.8.PASO 8, GENERAR GRÁFICAS DE DEFORMACIONES Y EXTRACCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS.

En el proceso de correlación mediante NCORR, es posible extraer información detallada de los desplazamientos en coordenadas específicas seleccionadas por el usuario y representarlos en gráficas que permiten evaluar la respuesta mecánica de las probetas. Una vez procesadas las imágenes y calculados los desplazamientos, se pueden utilizar las herramientas de MATLAB para analizar de manera personalizada los resultados obtenidos.

Para extraer los desplazamientos en una coordenada particular y generar gráficas de comparación, se puede utilizar el siguiente código de MATLAB:

```
clc; clear; close all;
% Carga los archivos .mat
Data_Bean_1=load('C:\Users\FERNANDEZ\Desktop\ARCHIVOS TESIS\FOTOGRAFIAS\viga
1\Viga 1.2/resultado viga 1.2 subset 90 strain 11.mat');
```

```

Data_Bean_2=load('C:\Users\FERNANDEZ\Desktop\ARCHIVOS TESIS\FOTOGRAFIAS\viga
1\Viga 1.1/ESTA.mat');
% Verificar que el campo data_dic_save existe en cada archivo cargado
if~isfield(Data_Bean_1,'data_dic_save') && isfield(Data_Bean_1.data_dic_save, 'displacements')
    displacements_data1 = Data_Bean_1.data_dic_save.displacements;
else
    error('El campo "displacements" no se encuentra en data_dic_save de Data_Bean_1.');
```

```

end
if~isfield(Data_Bean_2,'data_dic_save') && isfield(Data_Bean_2.data_dic_save, 'displacements')
    displacements_data2 = Data_Bean_2.data_dic_save.displacements;
else
    error('El campo "displacements" no se encuentra en data_dic_save de Data_Bean_2.');
```

```

end
% Verificar que los datos no estén vacíos
if ~isempty(displacements_data1) && ~isempty(displacements_data2)
    numDisplacements1 = length(displacements_data1);
    numDisplacements2 = length(displacements_data2);
    % Inicializar matrices de desplazamientos
    Displacement_V1 = zeros(1, numDisplacements1);
    Displacement_V2 = zeros(1, numDisplacements2);
    % Parámetros de coordenadas para extracción de datos
    A1 = 119; B1 = 61; % Sub 80 y strain 15
    A2 = 118; B2 = 53; % Sub 110 y strain 10
    % Bucle para extraer los valores de desplazamiento
    for j = 1:numDisplacements1
        Displacement_V1(j) = displacements_data1(j).plot_v_ref_formatted(A1, B1);
    end
    for j = 1:numDisplacements2
        Displacement_V2(j) = displacements_data2(j).plot_v_ref_formatted(A2, B2);
    end
    % Graficar los resultados

```

```

figure;
plot(Displacement_V1, 'r', 'LineWidth', 1.5); hold on; % Rojo
plot(Displacement_V2, 'b', 'LineWidth', 1.5);      % Azul
% Títulos y etiquetas
title('Desplazamientos V1, V2');
xlabel('# Fotografías');
ylabel('Desplazamiento (mm)');
% Añadir leyenda para diferenciar las gráficas
legend({'Displacement V1', 'Displacement V2'});
% Mostrar la cuadrícula
grid on;
else
disp('No se encontraron datos de desplazamientos en alguna de las estructuras.');
```

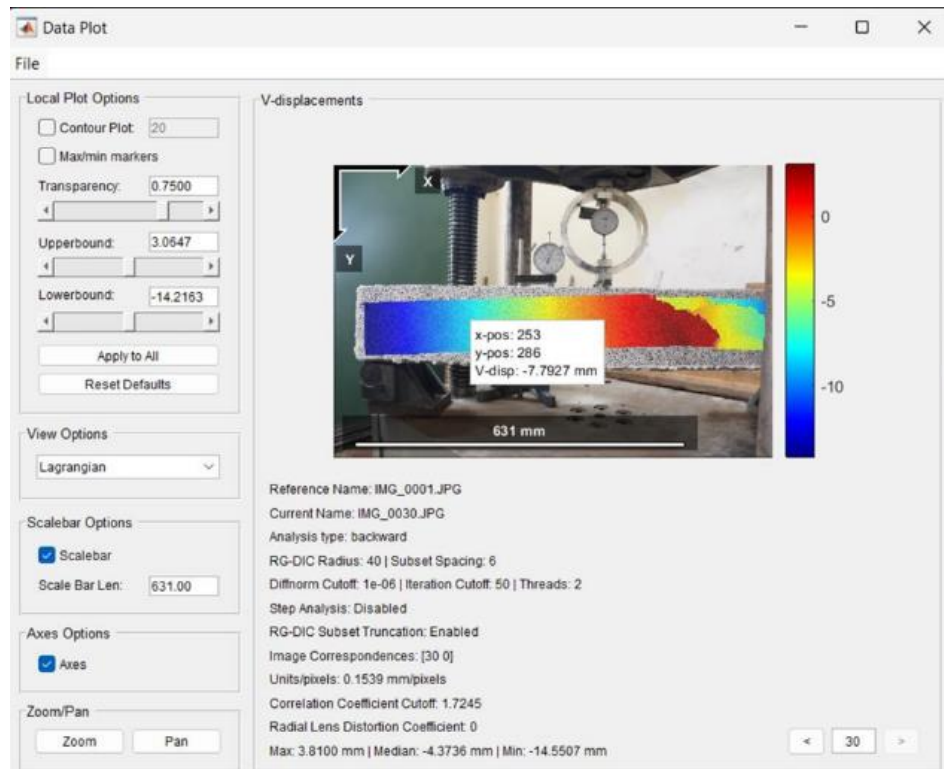
Nota: Asegúrese de cambiar la ruta de localización de los archivos “. Mat “en el código según el lugar donde se guarde el procesamiento de datos para cada ensayo. Además, para encontrar las coordenadas (A1, B1, etc.) de extracción de desplazamientos, debe ingresar a la opción “Plot” en NCORR, seleccionar “View Displacements Plots”, y luego, en la gráfica resultante, hacer clic en la parte que desea analizar. Las coordenadas en X e Y que aparecen al acercarse, como se muestra en la imagen adjunta, deben usarse y modificarse en el código entre las líneas 50 y 60.

2.8.1. Descripción del Procedimiento

El código anterior carga los archivos “. mat” con los resultados de las correlaciones realizadas en NCORR y accede al campo de desplazamientos. Luego, se seleccionan coordenadas específicas para extraer los datos de desplazamiento en dirección vertical (“Y”) y se almacenan en vectores independientes para cada conjunto de datos. Posteriormente, se generan gráficas comparativas que permiten observar la evolución del desplazamiento a lo largo de las imágenes procesadas, visualizando cómo varía el comportamiento mecánico de la probeta durante el ensayo.

En la Figura 22 se muestra cómo se visualizan las coordenadas en NCORR, solo es necesario colocar el cursor sobre la ROI.

FIGURA 45. *Extracción de coordenadas.*



Esta representación gráfica es útil para identificar patrones de deformación y desplazamientos, zonas de concentración de esfuerzos y evaluar la progresión del daño en puntos de interés definidos.

2.9.BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Blaber, B. Adair, and A. Antoniou, “Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software,” *Exp. Mech.*, vol. 55, no. 6, pp. 1105–1122, 2015, doi: 10.1007/s11340-015-0009-1.



**12.2. ANEXO 2: RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS
MEDIANTE LA DIC, EL SENSOR DE LA MÁQUINA UNIVERSAL Y LOS
DEFORMÍMETROS**

BRAYAN ALEXIS FERNÁNDEZ CÓRTEZ

YONATAN GUERRERO REALPE

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

POPAYÁN

2025

Viga 2,1				
NCORR			DEFORMIMETROS	
DEF 1	DEF2	MAQUINA	DEF1	DEF2
-0,07768985	-0,15416555	-0,0664	-0,2	-0,18
-0,05385103	-0,06968373	-0,224	-0,38	-0,39
-0,27171767	-0,29406266	-0,3816	-0,69	-0,54
-0,57664969	-0,67774523	-0,5474	-0,8	-0,74
-0,82533326	-0,93181319	-0,705	-0,98	-0,89
-1,07057355	-1,19916873	-0,8709	-1,1	-1,06
-1,2579792	-1,38857717	-1,0285	-1,29	-1,24
-1,31949653	-1,36447012	-1,1944	-1,38	-1,4
-1,56751957	-1,67268921	-1,3519	-1,48	-1,49
-1,60927922	-1,64327439	-1,5178	-1,57	-1,58
-1,70915069	-1,73974683	-1,6754	-1,65	-1,67
-1,75815563	-1,78450996	-1,8413	-1,74	-1,76
-1,91264607	-2,00077349	-1,9989	-1,83	-1,85
-2,02939189	-2,13561195	-2,1647	-1,92	-1,93
-2,05595935	-2,10739032	-2,3223	-2,03	-2
-2,2478856	-2,3741017	-2,4799	-2,13	-2,1
-2,25823226	-2,30808734	-2,6458	-2,24	-2,24
-2,44528339	-2,5643851	-2,8034	-2,36	-2,36
-2,48335322	-2,54160926	-2,9609	-2,48	-2,48
-2,73039547	-2,89427462	-3,1268	-2,6	-2,69
-2,69487587	-2,75117855	-3,2844	-2,72	-2,78
-2,86296522	-2,95548866	-3,442	-2,85	-2,94
-2,93172336	-2,99563731	-3,5996	-2,98	-3,11
-3,09335652	-3,16331096	-3,7654	-3,12	-3,28
-3,33747484	-3,49935627	-3,923	-3,29	-3,46
-3,36983149	-3,45498711	-4,0806	-3,38	-3,63
-3,8565903	-4,14971528	-4,2465	-3,51	-3,79
-3,647647	-3,74979634	-4,4041	-3,64	-3,99
-3,80442723	-3,94571437	-4,5616	-3,77	-4,12
-3,98443357	-4,15983023	-4,7192	-3,91	-4,23
-4,11727138	-4,31107573	-4,8768	-4,05	-4,39
-4,60719398	-4,97084635	-5,0427	-4,19	-4,57
-4,39015184	-4,58347757	-5,2003	-4,33	-4,76
-4,53451727	-4,73934468	-5,3579	-4,46	-4,96
-4,76864964	-5,03748524	-5,5154	-4,61	-5,13
-4,84298672	-5,08842856	-5,673	-4,75	-5,3
-5,09969788	-5,42582004	-5,8223	-4,88	-5,49
-5,23199631	-5,56769872	-5,9799	-5,02	-5,68
-5,2594385	-5,54610161	-6,1375	-5,15	-5,84
-5,39522124	-5,70038942	-6,2951	-5,3	-6
-5,5418654	-5,85693665	-6,4526	-5,43	-6,27
-5,65228359	-5,94442817	-6,6102	-5,58	-6,47
-5,90014237	-6,29186875	-6,7595	-5,72	-6,64
-5,95412202	-6,2907473	-6,9171	-5,86	-6,82
-6,08338697	-6,41899757	-7,0747	-6	
-6,36931746	-6,81981781	-7,2323	-6,19	
-6,39205285	-6,7570678	-7,3815	-6,27	
-6,55294833	-6,937772	-7,5391		
-6,74333326	-7,18555017	-7,6967		
-6,84964812	-7,27160434	-7,846		
-7,09694589	-7,61044173	-8,0036		
-7,16213445	-7,62278294	-8,1612		
-7,41430121	-7,98149103	-8,3187		
-7,56144687	-8,14064417	-8,468		
-7,83217832	-8,47868274	-8,6256		
-7,81479618	-8,37250018	-8,7832		
-7,9945127	-8,60838008	-8,9325		

Viga 2,2				
NCORR		MAQUINA	DEFORMIMETROS	
DEF 1	DEF 2		DEF 1	DEF 2
-0,01381189	-0,165726662	-0,0581	-0,01	-0,01
-0,03059986	-0,173693033	-0,1244	-0,04	-0,05
-0,11098768	-0,330660845	-0,1991	-0,08	-0,09
-0,15589128	-0,261876115	-0,2654	-0,13	-0,14
-0,18742614	-0,330889801	-0,3318	-0,18	-0,19
-0,30601853	-0,423253023	-0,4064	-0,23	-0,24
-0,28831192	-0,472642254	-0,481	-0,29	-0,29
-0,34293775	-0,588286288	-0,5557	-0,34	-0,34
-0,41924663	-0,599569004	-0,622	-0,41	-0,39
-0,47654086	-0,561926901	-0,6967	-0,47	-0,44
-0,57652758	-0,619749159	-0,763	-0,54	-0,5
-0,60945303	-0,698954994	-0,8377	-0,62	-0,55
-0,62064662	-0,750331581	-0,904	-0,69	-0,6
-0,68686115	-0,936765998	-0,9787	-0,73	-0,66
-0,82089761	-0,908246348	-1,0533	-0,86	-0,72
-0,81631693	-0,963837531	-1,1197	-0,95	-0,78
-0,95051977	-1,024760745	-1,1943	-1,04	-0,84
-0,95642367	-1,231557889	-1,269	-1,12	-0,9
-1,03640372	-1,152877418	-1,3436	-1,2	-0,96
-1,09127118	-1,304369428	-1,4099	-1,62	-1,25
-1,2422024	-1,345329009	-1,4846	-1,7	-1,31
-1,218819	-1,356080787	-1,5592	-1,7	-1,37
-1,3338984	-1,508034245	-1,6339	-1,78	-1,43
-1,38685941	-1,499214063	-1,7002	-1,87	-1,5
-1,4251805	-1,668730485	-1,7749	-1,96	-1,55
-1,54094629	-1,704297195	-1,8495	-2,04	-1,6
-1,56430773	-1,692098043	-1,9159	-2,13	-1,66
-1,69907324	-1,676800952	-1,9905	-2,24	-1,8
-1,7451214	-1,908129835	-2,0652	-2,5	-1,99
-1,75432989	-2,05230493	-2,1398	-2,76	-2,2
-1,8030198	-2,296119104	-2,2642	-3,05	-2,39
-1,97547553	-2,482461577	-2,5047	-3,31	-2,59
-2,1662855	-2,698151681	-2,737	-3,55	-2,78
-2,4135824	-3,04091115	-2,9692	-3,78	-2,99
-2,66527638	-3,184741253	-3,2097	-4	-3,18
-2,91049335	-3,378666416	-3,4419	-4,25	-3,36
-3,15129281	-3,672601249	-3,6742	-4,32	-3,78
-3,33838767	-3,981276302	-3,9147	-4,46	-3,85
-3,5796073	-4,150264356	-4,1469	-4,78	-4,06
-3,85186844	-4,387284792	-4,3874	-5,01	-4,29
-4,15008997	-4,684721763	-4,6197	-5,18	-4,52
-4,35898867	-4,881367364	-4,8602	-5,32	-4,95
-4,6074678	-5,116833434	-5,0924	-5,46	-5,17
-4,88756665	-5,351515948	-5,3246	-5,69	-5,4
-5,12059571	-5,609676235	-5,5652	-6,03	-5,62
-5,42054792	-5,836740867	-5,7974	-6,19	-5,74
-5,68587953	-6,081517103	-6,0296	-6,38	-6,2
-5,96835098	-6,456195917	-6,2618	-6,75	-6,65
-6,13930761	-6,787798407	-6,5024	-7,22	-6,93
-6,38816721	-7,081469484	-6,7346	-7,64	-7,19
-6,72362653	-7,363493745	-6,9668	-8,12	-7,41
-7,05502673	-7,597752807	-7,2322	-8,23	-7,68
-7,36090419	-7,914559715	-9,314	-8,45	-7,88
-7,64004347	-8,154950614	-9,5462	-8,68	-8,06
-8,17975256	-8,445942244		-8,74	-8,3

Viga 2,3				
NCORR		MAQUINA	DEFORMIMETROS	
DEF 1	NCORR DEF 2		DEF 1	DEF 2
-0,1927	-0,1946	-0,1245	-0,1200	-0,0910
-0,3258	-0,3266	-0,3235	-0,2900	-0,2400
-0,5004	-0,4901	-0,5226	-0,4800	-0,3500
-0,7196	-0,7323	-0,7216	-0,6800	-0,5800
-0,8453	-0,8587	-0,9124	-0,8000	-0,8300
-0,8919	-0,9000	-1,1114	-0,9200	-0,9800
-1,0720	-1,0836	-1,3022	-1,0500	-1,1600
-1,1664	-1,1755	-1,5012	-1,1800	-1,2600
-1,3043	-1,3165	-1,6920	-1,3000	-1,4300
-1,4414	-1,4562	-1,8910	-1,4300	-1,5700
-1,6136	-1,6344	-2,0818	-1,5600	-1,7200
-1,7616	-1,7910	-2,2726	-1,6900	-1,9200
-1,8587	-1,8828	-2,4716	-1,8200	-2,1300
-1,9512	-1,9192	-2,6624	-1,9600	-2,3400
-2,1101	-1,9746	-2,8531	-2,1000	-2,4800
-2,2598	-2,0465	-3,0439	-2,5000	-2,7500
-2,4513	-2,2641	-3,2429	-2,5600	-2,8000
-2,6020	-2,3548	-3,4254	-2,7200	-2,9200
-2,7473	-2,4765	-3,6162	-2,8900	-3,2100
-2,8642	-2,5964	-3,8069	-2,9800	-3,2900
-3,0182	-2,6998	-3,9977	-3,1400	-3,4200
-3,1684	-2,7897	-4,1801	-3,2700	-3,6300
-3,3275	-2,8099	-4,3709	-3,4200	-3,7400
-3,4829	-2,9367	-4,5616	-3,5900	-3,8900
-3,6524	-3,0949	-4,7441	-3,7200	-4,0100
-3,9302	-3,2555	-4,9349	-3,8500	-4,1700
-4,0726	-3,4218	-5,1173	-4,0000	-4,2900
-4,2247	-3,5847	-5,2998	-4,1400	-4,4700
-4,4083	-3,7639	-5,4823	-4,2800	-4,6200
-4,5879	-4,0586	-5,6647	-4,4300	-4,7800
-4,7831	-4,2080	-5,8472	-4,5800	-4,9800
-4,9591	-4,3633	-6,0297	-4,7400	-5,0900
-5,1558	-4,5664	-6,2121	-4,8900	-5,1800
-5,3567	-4,7582	-6,3946	-5,0600	-5,3100
-5,5642	-4,9660	-6,5688	-5,2800	-5,4200
-5,7280	-5,1572	-6,7512	-5,4600	-5,6000
-5,9206	-5,3661	-6,9337	-5,6400	-5,8100
-6,0551	-5,5794	-7,1161	-5,8200	-5,9900
-6,2525	-5,8014	-7,2986	-5,9900	-6,1800
-6,4308	-5,9767	-7,4811	-6,1700	-6,3700
-6,6112	-6,1833	-7,6635	-6,3600	-6,5000
-6,8086	-6,3228	-7,8460	-6,5300	-6,6800
-6,9837	-6,5393	-8,0285	-6,7200	-6,8200
-7,2059	-6,7290	-8,2109	-6,8100	-7,1500
-7,3426	-6,9239	-8,3934	-6,9900	-7,3200
-7,5244	-7,1371	-8,5759	-7,1700	-7,4900
-7,7555	-7,3208	-8,7583	-7,3500	-7,6100
-7,9391	-7,5601	-8,9408	-7,4900	-7,9600
-8,1205	-7,7045	-9,1315	-7,6700	-8,1600
-8,3105	-7,9007	-9,3140	-7,8700	-8,3500
-8,4938	-8,1528	-9,4965	-8,0500	-8,5100
-8,6648	-8,3483	-9,6789	-8,2300	-8,7600
-8,8595	-8,5418	-9,8614	-8,4100	-8,9300
-9,0128	-8,7448	-10,0522	-8,6000	-9,1500
-9,1780	-8,9418	-10,2346	-8,7900	-9,3200
-9,4044	-9,1268	-10,4171	-8,9700	-9,5300
-9,5862	-9,3327	-10,6078	-9,1600	-9,7200
-9,7809	-9,4964	-10,7903	-9,3300	-9,9800
-9,9435	-9,6670	-10,9728	-9,4400	-10,1200
-10,1555	-9,9157	-13,1706	-9,6700	-10,2600
-10,3241	-10,1127	-13,3614	-9,8500	-10,4200
-10,4811	-10,3208	-13,5522	-10,0300	-10,6500
-10,6608	-10,4757	-13,7429	-10,2300	-10,8300
-10,9458	-10,7176	-13,9254	-10,4200	-11,1000
-11,0630	-10,8945	-14,1161	-10,5900	-11,3500
-11,2473	-11,0544	-14,3069	-10,7700	-11,6500
-11,4428	-11,2558	-14,4976	-10,9600	-11,8900
-11,6295	-11,5640	-14,6884	-11,1700	-12,1300
-11,8077	-11,6740	-16,5711	-11,3900	-12,2800
-12,0009	-11,8842	-16,7619	-11,5700	-12,4500
-12,3987	-12,0926	-16,9526	-11,7200	-12,6900
-12,4218	-12,2952	-17,1517	-11,8900	-12,7600
-12,5718	-12,4792		-12,0900	-12,8700
-12,8172	-12,6942		-12,2900	-13,0900
-13,0057	-12,8766		-12,4600	-13,1800
-13,1908	-13,1184		-12,6600	-13,3600
-13,7543	-13,2987		-12,8500	-13,5100
-13,9422	-13,5685		-13,0900	-13,7200
-14,1431	-13,7702		-13,2200	-13,8900
-14,3730	-13,9700		-13,4100	-14,0400
-14,5662	-14,5716		-13,6100	-14,2100
-14,9274	-14,7732		-13,7900	-14,3700
	-14,9883		-13,9900	-14,5800

Viga 2,4				
NCORR		MAQUINA	DEFORMIMETROS	
DEF 1	DEF 2		DEF 1	DEF 2
-0,07954571	-0,36678872	-0,2323	-0,04	-0,04
-0,22017177	-0,9027206	-0,4811	-0,14	-0,18
-0,46922276	-0,8445283	-0,7216	-0,39	-0,46
-0,63491591	-1,19110527	-0,9621	-0,65	-0,66
-0,96218432	-1,27954072	-1,2026	-0,91	-0,91
-1,1595758	-1,5290182	-1,4432	-1,19	-1,13
-1,36652491	-1,66605844	-1,6754	-1,34	-1,35
-1,46147821	-1,72973046	-1,9159	-1,48	-1,52
-1,58280272	-1,88319142	-2,1481	-1,62	-1,65
-1,74033113	-2,09583099	-2,3804	-1,76	-1,81
-1,88854721	-2,21474272	-2,6209	-1,91	-1,98
-2,05258658	-2,52408624	-2,8531	-2,09	-2,19
-2,24770559	-2,59875776	-3,0853	-2,25	-2,38
-2,35082912	-2,77029635	-3,3259	-2,41	-2,6
-2,57074636	-2,95563208	-3,5581	-2,61	-2,84
-2,73163381	-3,1449842	-3,7903	-2,78	-3,04
-2,90135782	-3,33652204	-4,0225	-2,97	-3,25
-3,06557265	-3,53039457	-4,2548	-3,16	-3,48
-3,24252868	-3,72265549	-4,487	-3,33	-3,69
-3,41174103	-3,91519362	-4,7192	-3,53	-3,93
-3,58367468	-4,2081886	-4,9432	-3,72	-4,15
-3,75420624	-4,39373516	-5,1754	-3,98	-4,37
-3,90517971	-4,47645414	-5,4076	-3,94	-4,61
-4,07083493	-4,67673243	-5,6315	-4,13	-4,84
-4,28284504	-5,01811963	-5,8555	-4,32	-5,06
-4,45682386	-5,05959614	-6,0794	-4,51	-5,3
-4,57825997	-5,34296422	-6,3033	-4,67	-5,57
-4,83521095	-5,67468469	-6,5273	-4,88	-5,82
-4,97318708	-5,73898322	-6,7595	-5,08	-6,08
-5,15700221	-5,94922273	-6,9834	-5,21	-6,37
-5,40930798	-6,17548652	-7,1991	-5,48	-6,65
-5,5986399	-6,50839151	-7,4313	-5,64	-6,91
-5,80089531	-6,74109725	-7,6552	-5,85	-7,18
-5,97090399	-7,19023165	-7,8792	-6,01	-7,48
-6,17872015	-7,70831782	-8,1529	-6,24	-7,76
-6,73749346	-8,03581438	-8,4017	-6,79	-8,38
-7,20664996	-8,30317579	-8,6422	-7,29	-8,19
-7,50946548	-8,5936524	-8,8827	-7,57	-9,32
-7,75210583	-8,85942559	-9,1232	-7,83	-9,68
-8,0114564	-9,23726743	-9,3638	-8,1	-10,01
-8,25392786	-9,52771781	-9,6126	-8,39	-10,4
-8,45096585	-9,72379323	-9,8531	-8,58	-10,78
-8,71060246	-10,0343903	-10,1019	-8,83	-11,14
-9,00010782	-10,3095398	-10,3424	-9,11	-11,42
-9,198172	-10,5856905	-10,5913	-9,38	-11,82
-9,44432982	-10,8561094	-10,8401	-9,62	-12,19
-9,6970836	-11,1279884	-11,0806	-9,88	-12,53
-9,94502677	-11,3932944	-11,3294	-10,06	-12,83
-10,2001835	-11,6278439	-11,5782	-10,32	-13,18
-10,4458765	-12,3832248	-11,827	-10,58	-13,52
-10,763086	-12,1519098	-12,0758	-10,88	-13,78
-10,9582226	-12,4676822	-12,3164	-11,1	-14,14
-11,2544475	-12,7321781	-12,5735	-11,36	-14,5
-11,4313238	-13,0704096	-12,8223	-11,62	-14,84
-11,6750949	-13,228015	-13,0711	-11,98	-15,15
-11,918312	-13,4933378	-13,3199	-12,16	-15,53
-12,1913333	-13,8393002		-12,42	-15,79
-12,4365307	-13,9959225		-12,68	-16,15
-12,6442744	-14,6654732		-12,94	-16,59
-12,9465104	-14,5403113		-13,18	-16,85
-13,1054018	-14,7709879		-13,3	-17,19
-13,3785192	-15,0308397		-13,58	-17,51
-13,5954554	-15,2846847		-13,81	-17,85
-13,8352743	-15,5296755		-14,05	-18,24
-14,0687872	-15,7823191		-14,31	-18,6
-14,2944843	-16,0359188		-14,55	-18,96
-14,5307287	-16,2956145		-14,89	-19,32
-14,7640969	-16,5473271		-15,05	-19,68
-14,9993424			-15,26	-19,98
-15,233113			-15,58	-20,05

Viga 2,5				
NCORR		MAQUINA	DEFORMIMETROS	
DEF 1	DEF 2		DEF 1	DEF 2
-0,37920948	-0,42209886	-0,3068	-0,27	-0,18
-0,58599879	-0,57808841	-0,6137	-0,52	-0,42
-0,72236776	-0,71304909	-0,9206	-0,66	-0,55
-0,88626424	-0,93931481	-1,2192	-0,8	-0,71
-0,98217728	-0,98289921	-1,026	-0,95	-0,85
-1,14135692	-1,15662464	-1,3329	-1,11	-1,03
-1,32893281	-1,36020602	-1,6315	-1,3	-1,25
-1,54164327	-1,60027494	-1,9218	-1,5	-1,51
-1,74501832	-1,82609644	-2,2286	-1,7	-1,77
-1,95197947	-2,05496572	-2,3289	-1,92	-2,05
-2,18962406	-2,34245131	-2,5175	-2,16	-2,36
-2,39331353	-2,56877072	-2,8078	-2,36	-2,63
-2,63261826	-2,82808671	-3,0981	-2,69	-2,89
-2,84206174	-3,03233077	-3,3884	-2,82	-3,2
-3,07242112	-3,29002945	-3,6703	-3,1	-3,48
-3,29489215	-3,54029178	-3,9606	-3,27	-3,79
-3,98293877	-4,48396497	-4,2426	-3,57	-4,11
-3,76856358	-4,1174784	-4,5246	-3,68	-4,35
-4,05233469	-4,33999175	-4,8066	-3,9	-4,65
-4,26137122	-4,66626153	-5,0886	-4,13	-4,84
-4,46806729	-4,90828498	-5,3706	-4,35	-5,02
-4,73073564	-5,21482649	-5,6443	-4,59	-5,25
-4,95069566	-5,45222681	-5,918	-4,8	-5,49
-5,13616505	-5,59868453	-6,2	-5	-5,86
-5,40740983	-5,90857899	-6,4902	-5,28	-6,05
-5,69058657	-6,26748619	-6,7722	-5,56	-6,45
-5,95752264	-6,57837763	-7,0542	-5,8	-6,9
-6,27218596	-6,93373398	-7,3362	-6,1	-7,36
-6,52516378	-7,21115349	-7,6182	-6,38	-7,65
-6,79863957	-7,55309039	-7,9002	-6,64	-7,75
-7,07167798	-7,86319084	-8,1905	-6,91	-8,18
-7,38700221	-8,25682006	-8,4725	-7,17	-8,55
-7,6471462	-8,54999724	-8,7628	-7,47	-8,79
-7,91491596	-8,82386001	-9,0447	-7,75	-9,06
-8,20328049	-9,16198526	-9,3267	-8,05	-9,37
-8,5124022	-9,57171216	-9,617	-8,31	-9,83
-8,79112918	-9,89296241	-9,899	-8,6	-10,33
-9,08053365	-10,2233638	-10,1893	-8,89	-10,72
-9,40944683	-10,6171221	-10,4713	-9,2	-11,13
-9,58895368	-10,7694495	-10,7616	-9,42	-11,31
-9,90474879	-11,1603282	-11,0436	-9,7	-11,63
-10,1517405	-11,4170427	-11,3338	-9,98	-11,83
-10,4289707	-11,7643404	-11,6241	-10,28	-12,26
-10,7519322	-12,1121172	-11,9227	-10,58	-12,35
-11,0716408	-12,5117823	-12,213	-10,9	-12,58
-11,4083509	-12,934995	-12,5033	-11,2	-12,87
-11,6526103	-13,202767	-12,7936	-11,48	-13,3
-11,9496119	-13,5293331	-13,0838	-11,78	-13,71
-12,2631214	-13,9223103		-12,07	-14,1
-12,5551029	-14,2271249		-12,37	-14,34
-12,8373827	-14,5818363		-12,56	-14,73

Viga 2,6

NCORR		MAQUINA	DEFORMIMETROS	
DEF 1	DEF 2		DEF 1	DEF 2
-0,11425431	-0,2978009	-0,2737	-0,07	-0,08
-0,32672417	-0,47744908	-0,5971	-0,28	-0,34
-0,54446369	-0,88413439	-0,9289	-0,48	-0,55
-0,77246312	-0,91074067	-1,2524	-0,67	-0,75
-0,95497532	-1,9550215	-1,5841	-0,88	-0,99
-1,47481172	-2,07944255	-1,9076	-1,12	-1,26
-1,66677206	-1,91007692	-2,231	-1,38	-1,48
-1,77061496	-2,05878053	-2,5545	-1,66	-1,8
-1,97799624	-2,87573182	-2,8697	-1,9	-2,04
-2,41077779	-2,8198357	-3,1931	-2,18	-2,34
-2,53101889	-2,8893217	-3,5083	-2,44	-2,61
-2,74730062	-3,23538058	-3,8234	-2,7	-2,98
-3,02736947	-3,48318052	-4,1303	-2,98	-3,31
-3,27229173	-4,10174064	-4,4372	-3,29	-3,59
-3,5768971	-4,29327928	-4,7358	-3,49	-3,92
-3,77695742	-4,55244303	-5,0426	-3,67	-4,23
-4,02581012	-4,65378501	-5,3412	-3,93	-4,59
-4,20834376	-5,39730292	-5,6398	-4,15	-4,92
-4,60536464	-5,02729101	-5,9384	-4,39	-5,15
-4,64315511	-5,83853089	-6,2286	-4,63	-5,58
-5,01950051	-5,60208637	-6,5189	-4,86	-5,88
-5,09311774	-6,75386405	-6,8092	-5,09	-6,16
-5,67530519	-6,32913754	-7,1078	-5,34	-6,43
-5,59986058	-6,55815285	-7,3981	-5,58	-6,76
-5,83625226	-7,28805853	-7,6884	-5,84	-7,09
-6,26417613	-7,61135512	-7,9869	-6,1	-7,59
-6,5245141	-7,51903888	-8,2855	-6,38	-7,91
-6,64369385	-8,02056178	-8,5758	-6,64	-8,22
-6,96828557	-8,12050026	-8,8744	-6,9	-8,62
-7,1464549	-8,65524729	-9,173	-7,15	-9,06
-7,49607806	-8,82527302	-9,4632	-7,43	-9,34
-7,72905889	-8,92618391	-9,7618	-7,71	-9,82
-7,94732663	-9,23332439	-10,0604	-7,98	-10,12
-8,20453905	-9,92045276	-10,359	-8,26	-10,57
-8,59290261	-9,98084617	-10,6576	-8,59	-11,08
-8,77278551	-10,3044006	-10,9561	-8,85	-11,38
-9,04971206	-10,6480674	-11,2547	-9,11	-11,82
-9,33703284	-10,8051601	-11,5533	-9,39	-12,38
-9,58747476	-11,8986888	-11,8519	-9,67	-12,69
-10,1132137	-11,554694	-12,1504	-9,96	-13,19
-10,1409915	-12,649068	-12,449	-10,26	-13,43
-10,7168448	-13,0082391	-12,7476	-10,54	-13,89
-11,0067209	-13,8786509	-13,0462	-10,84	-14,22
-11,5290881	-13,2256454	-13,3447	-11,12	-14,68
-11,3531386	-13,12368	-13,6433	-11,42	-15,14
-11,5436711	-13,6350085	-13,9419	-11,7	-15,59
-11,8481638	-13,7891343	-14,2405	-11,98	-15,87
-12,1149815	-14,8493639	-14,5474		-16,32
-12,6349831	-14,7223106	-14,8542		-16,8
-12,7454413	-14,9855522	-15,1611		-17,29
-13,0634135	-15,5647631	-15,4763		-17,85
-13,4400866	-15,8045234	-15,7831		-18,39
-13,709596	-15,9803714	-16,09		-18,55
-14,0097343	-16,4570638	-16,4052		-19,01

Viga 2,7				
NCORR		MAQUINA	DEFORMIMETROS	
DEF 1	DEF 2		DEF 1	DEF 2
-0,34599659	-0,4259691	-0,2654	-0,45	-0,02
-0,49933101	-0,6310795	-0,5888	-0,69	-0,08
-0,8945786	-0,60675752	-0,9206	-0,91	-0,38
-0,94186602	-1,49418243	-1,2358	-1,13	-0,53
-1,30854518	-1,10986162	-1,5592	-1,33	-0,75
-1,430607	-1,90933595	-1,8827	-1,54	-1,02
-1,5845807	-1,88386229	-2,1895	-1,74	-1,32
-1,93100033	-1,86762412	-2,5047	-1,93	-1,61
-1,97683096	-2,62237788	-2,8116	-2,14	-1,9
-2,23283105	-2,15185509	-3,1185	-2,35	-2,12
-2,39468291	-2,7665908	-3,4253	-2,54	-2,42
-2,58848115	-2,85087642	-3,7239	-2,74	-2,65
-2,95318239	-3,05604927	-4,0225	-2,92	-2,91
-2,96753301	-3,92573536	-4,3128	-3,12	-3,14
-3,24295777	-3,54545587	-4,6113	-3,31	-3,37
-3,34790598	-4,07502533	-4,9016	-3,58	-3,64
-3,55985783	-3,95167431	-5,2002	-3,71	-3,93
-3,77627975	-4,25397189	-5,4905	-3,89	-4,18
-4,21557652	-4,57555358	-5,7808	-4,09	-4,44
-4,1772427	-5,60983064	-6,0628	-4,28	-4,7
-4,47454417	-5,03336099	-6,353	-4,48	-4,95
-4,56176382	-5,62880143	-6,635	-4,68	-5,24
-4,8408378	-5,50456624	-6,9253	-4,91	-5,51
-5,06822338	-5,98068912	-7,2073	-5,16	-5,81
-5,18589138	-6,24346149	-7,4976	-5,42	-6,11
-5,56071275	-5,89419729	-7,7879	-5,68	-6,43
-5,77320395	-6,79739816	-8,0865	-5,98	-6,79
-6,03016485	-6,96224323	-8,385	-6,28	-7,13
-6,29912806	-7,13952023	-8,6919	-6,56	-7,36
-6,64553219	-7,32558828	-8,9905	-6,84	-7,88
-6,86914938	-7,89339961	-9,2974	-7,14	-8,11
-7,17629388	-7,94272818	-9,5959	-7,44	-8,51
-7,45759376	-8,33656078	-9,9028	-7,7	-8,87
-7,73703235	-8,60158246	-10,2097	-7,96	-9,29
-7,99161282	-8,99024051	-10,5165	-8,22	-9,55
-8,43171404	-9,27802984	-10,8151	-8,55	-9,94
-8,62806196	-10,2030383	-11,122	-8,83	-10,38
-8,90606815	-10,2778618	-11,4206	-9,17	-10,64
-9,23007698	-10,5879761	-11,7274	-9,51	-11,06
-9,58670544	-10,957759	-12,0426	-9,88	-11,39
-9,91127381	-11,3686786	-12,3578	-10	-11,88
-10,159172	-11,7138389	-12,6812	-10,3	-12,35
-10,4523328	-11,8540374	-12,9964	-10,6	-12,59
-10,7416986	-12,1887024	-13,3199	-10,9	-12,73
-11,0127874	-12,5215683	-13,635	-11,22	-13,14
-11,4074884	-12,7310015	-13,9502	-11,52	-13,6
-11,6401721	-13,406099	-14,2736	-11,82	-14,07
-11,9800807	-13,5663113	-14,5888	-12,18	-14,57
-12,3873528	-14,0815198	-14,9123	-12,4	-14,9
-12,5256483	-14,7781259	-15,2274	-12,68	-15,33
-12,8007247	-14,572446	-15,5509	-12,96	-15,78
-13,2013506	-14,8879735		-13,24	-16,23
-13,437518	-15,6089724		-13,54	-16,02
-13,7127718	-15,77639		-13,84	-16,39
-13,8995183	-16,0899598		-14,12	-16,81
-14,2199117	-16,0043414		-14,42	-17,17
-14,5538776	-16,5058555		-14,88	-17,62

Viga 2,8				
NCORR		MAQUINA	DEFORMIMETROS	
DEF 1	DEF 2		DEF 1	DEF 2
-0,19114469	-0,09545219	-0,098145	-0,23	-0,38
-0,30582382	-0,21587879	-0,1219	-0,46	-0,45
-0,39288678	-0,37802224	-0,3375	-0,56	-0,1
-0,58886864	-0,44013839	-0,5449	-0,63	-0,19
-0,45750589	-0,67405994	-0,7605	-0,72	-0,24
-1,01248376	-0,39884942	-0,8752	-0,85	-0,36
-0,97708643	-1,22104153	-0,9853	-0,96	-0,5
-0,97146537	-1,07488418	-1,0826	-1,08	-0,64
-1,1157014	-0,99206401	-1,2899	-1,22	-0,8
-1,20468259	-1,15529701	-1,3972	-1,34	-0,95
-1,52955597	-1,22064161	-1,65046	-1,49	-1,12
-1,61369236	-1,66891919	-1,7736	-1,61	-1,29
-2,01047813	-1,74169022	-1,811	-1,75	-1,49
-1,79244905	-2,29850636	-2,01	-1,88	-1,69
-2,05916827	-1,89006466	-2,1091	-2,02	-1,89
-2,36459844	-2,25500786	-2,3081	-2,15	-2,09
-2,37516701	-2,67041901	-2,5072	-2,28	-2,28
-2,4550826	-2,61638901	-2,698	-2,42	-2,48
-2,55378935	-2,68443903	-2,797	-2,56	-2,69
-2,65715016	-2,77816501	-2,9878	-2,7	-2,78
-2,80904576	-2,85830226	-3,1785	-2,83	-2,97
-3,03842763	-3,04841381	-3,3693	-2,97	-3,1
-3,1411488	-3,36161988	-3,56	-3,11	-3,18
-3,26704211	-3,4552489	-3,7508	-3,26	-3,39
-3,3955911	-3,57248499	-3,9416	-3,4	-3,57
-3,63365617	-3,71984503	-4,1323	-3,55	-3,86
-3,72316061	-4,04957682	-4,3148	-3,7	-4,1
-3,84382784	-4,12345475	-4,5055	-3,83	-4,27
-4,0676598	-4,2265709	-4,688	-3,97	-4,39
-4,1756191	-4,54197699	-4,8788	-4,11	-4,5
-4,36133552	-4,64656741	-5,0612	-4,25	-4,67
-4,43444705	-4,89251044	-5,2437	-4,33	-4,83
-4,75661455	-4,92405837	-5,4344	-4,52	-4,98
-4,71388078	-5,39661118	-5,6169	-4,66	-5,14
-4,90903995	-5,26982151	-5,7994	-4,79	-5,29
-5,20584895	-5,52480974	-5,9818	-4,93	-5,51
-5,1115195	-5,94973615	-6,1726	-5,06	-5,62
-5,24233005	-5,74707399	-6,3551	-5,19	-5,78
-5,42791884	-5,90598922	-6,5375	-5,32	-5,86
-5,52767553	-6,1627081	-6,72	-5,44	-6,08
-5,68936451	-6,2578837	-6,9024	-5,58	-6,17
-5,84465987	-6,48351255	-7,0932	-5,7	-6,31
-6,2654206	-6,63410832	-7,2757	-5,84	-6,43
-6,13406469	-7,30050261	-7,4581	-5,98	-6,68
-6,3608036	-7,01390265	-7,6489	-6,13	-6,73
-6,6239293	-7,35564149	-7,8314	-6,26	-6,87
-6,56383887	-7,71425642	-8,0138	-6,41	-7,15
-6,74013362	-7,5598056	-8,1963	-6,54	-7,3
-6,87267037	-7,80199488	-8,387	-6,68	-7,42
-7,18650836	-7,913167		-6,82	-7,57
-7,1929209	-8,41250531		-6,95	-7,61
-7,55943016	-8,37728897		-7,09	-7,76
-7,75336656	-8,90915932		-7,23	-7,85