

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ESTÉREO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE
IMÁGENES PARA MEDICIÓN DE CAMPOS DE DESPLAZAMIENTO EN 3D A BAJO
COSTO**

SEBASTIÁN SUÁREZ AGUDELO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2023**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ESTÉREO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE
IMÁGENES PARA MEDICIÓN DE CAMPOS DE DESPLAZAMIENTO EN 3D A BAJO
COSTO**

SEBASTIÁN SUÁREZ AGUDELO

**TRABAJO DE GRADO PARA OBTAR POR EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

Tutor:

PETER THOMSON Ph.D.

Asesor:

ROGER ORTEGA CARABALLO Ph.D.



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2023**

Nota de aceptación:

Carlos Alberto Madera Sierra, PhD.
Director Pregrado de Ingeniería Civil

Firma del jurado

Firma del jurado

Peter Thomson, Ph.D.
Director

Ciudad y fecha

AGRADECIMIENTOS.

Es un honor para mí dirigirme a ustedes con estas palabras de profundo agradecimiento. Quiero expresar mi gratitud más sincera por el apoyo invaluable que me han brindado a lo largo de mi trabajo de grado. Sin su compromiso, orientación y recursos, este logro no hubiera sido posible.

En primer lugar, quiero agradecer al profesor Peter Thomson por su liderazgo, inteligencia y mentoría durante este emocionante viaje académico. Su experiencia y dedicación en el campo de la investigación han sido una fuente constante de inspiración y motivación para mí. Siempre estuvo dispuesto a responder a mis preguntas, aportar ideas valiosas y ofrecer una dirección clara en mi trabajo de grado.

Jean Michel Franco, su compromiso y apoyo inquebrantables fueron fundamentales en mi proceso de investigación. Sus conocimientos avanzados y su disposición para colaborar y discutir ideas fueron esenciales en mi proceso de aprendizaje y para la calidad de mi trabajo. Me hizo convencer de que esos puntos con marcador Sharpie dibujados sobre la superficie de un muro, finalmente tenían mucho sentido, y terminarían definiendo mi trabajo de grado en un tema tan abstracto como lo es la Correlación Digital de Imágenes. Aprecio sinceramente su paciencia y orientación en cada paso del camino.

Roger Ortega, quiero agradecerle por su apoyo y contribuciones al proyecto. Su experiencia académica y habilidades prácticas fueron un recurso inestimable para superar los desafíos que surgieron en el laboratorio. Sin su experiencia, no habría sido posible llevar a cabo con éxito los experimentos necesarios para mi tesis.

Dana Solav y Justin Blaber, deseo agradecerles por su compromiso con la ciencia y por su generosidad al compartir habilidades y conocimientos a través del desarrollo de software de código abierto. Su contribución ayuda a promover la investigación y la educación en todo el mundo, y su trabajo es un testimonio de la importancia de la colaboración y la apertura en la comunidad científica. ¡Gracias por creer en el conocimiento!

Además, deseo expresar mi gratitud al Laboratorio Marco de Pruebas para Homologaciones (MAPH) por proporcionar el espacio y los equipos necesarios para llevar a cabo mi investigación. La infraestructura de vanguardia y el equipo de profesionales altamente calificados en MAPH fueron esenciales para la obtención de datos precisos y resultados significativos.

En conjunto, el Grupo de Investigación G7 y todas las personas mencionadas han formado un equipo excepcional que ha hecho posible que mi tesis sea un logro significativo en mi carrera académica. No puedo agradecerles lo suficiente por su apoyo, dedicación y amabilidad a lo largo de este proceso.

Espero que esta tesis contribuya al avance de nuestro campo de estudio y refleje el arduo trabajo y la colaboración que hemos compartido. Estoy emocionado por lo que depara el futuro y por las posibles oportunidades de colaboración que podamos tener.

Una vez más, gracias por haber sido una parte fundamental de mi viaje académico. Espero poder devolver algún día la generosidad que han demostrado hacia mí.

Con gratitud y respeto,

Sebastián Suárez Agudelo

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	4
TABLA DE CONTENIDO.....	5
TABLA DE FIGURAS	8
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN.....	12
1. DESCRIPCIÓN.....	13
1.1.Planteamiento del problema.	13
¿Cómo implementar un sistema estéreo de correlación digital de imágenes de bajo costo para medir campos de desplazamientos en aplicaciones civiles?	14
1.2.Objetivos:	14
1.2.1. General:	14
1.1.1. Específicos:	14
1.3.Justificación.	15
2. MARCO DE REFERENCIA	17
2.1.Antecedentes	17
2.2.ESTADO DEL ARTE.....	18
3. RESULTADOS.....	20
4. CÓDIGO PARA PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN 3D.....	20
4.1.Adecuación de los códigos libres para realizar la calibración estéreo de las cámaras con patrones de calibración de ajedrez y de puntos.	20
4.2.Adecuación de los códigos libres para procesar múltiples imágenes de un objeto de prueba capturadas simultáneamente por el par de cámaras estéreo.	24
4.3.Adecuación de los códigos libres para incluir puntos de control en las regiones de interés durante el procesamiento de los pares de imágenes.	25
4.4.Adecuación de los códigos libres para exportar los datos generados a partir del procesamiento de las imágenes a Matlab y Excel.	26
4.5.Adecuación de los códigos libres para exportar las imágenes de los estados de daño del objeto de prueba en diversas escalas de colores.....	26
4.5.1. Evolución de los estados de daño en probetas de acero sometidas a tensión.....	26
4.5.2. Evolución de los estados de daño en cilindros de concreto sometidos a tracción indirecta.	28
4.5.3. Evolución de los estados de daño en vigas de concreto reforzado sometidas a flexión.	29
5. MONTAJE DE DIC MEJORADO.....	30
5.1.Mejoramiento del sistema de soporte de las cámaras para que sea más estable y fácil de montar.	30
5.2.Implementación un sistema de iluminación que permita variar la orientación de los reflectores y cambiar la intensidad de luz durante el desarrollo de los ensayos.	32

5.3.Implementación de un sistema de protección de cámaras contra posibles explosiones de probetas que puedan afectar la integridad de estas durante el desarrollo de ensayos de compresión.	34
5.4.Implementación de mejoras en el cableado, código de adquisición y circuito del sistema DIC.	34
5.4.1. Cableado.....	34
5.4.2. Código de adquisición y circuito.....	35
5.5.Prototipo para ensayos en muros de concreto reforzado (https://correounivalleeducomy.sharepoint.com/:f:/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/EjO-92bQxXZOqbZm5DsmAB8Bj2Cphl0UsKgjVQAiqq81Q?e=HjneK3).....	37
5.6.Prototipo para ensayos de compresión en cilindros de concreto (https://correounivalleeducomy.sharepoint.com/:f:/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/EscitZY7midKj4Lg-m6SDjEBxdRPWYdCFs5cbj7CE-dojg?e=GRB5a1)	38
5.7.Prototipo para ensayos de tracción en platinas de acero con correlación digital de imágenes en 2D (https://correounivalleeducomy.sharepoint.com/:f:/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/Ekoosu9k3htCgpEQTn9uBBIBw1kfsMAU278_m93lcVLgrA?e=1K9IIE).	38
5.8.Prototipo para ensayos de flexión en vigas de concreto reforzado con correlación digital de imágenes en 2D.	39
5.9.Presupuesto del sistema estéreo de correlación digital de imágenes.....	39
6. CÓDIGO DE CORRELACIÓN DE IMÁGENES VALIDADO	40
6.1.Procesamiento de imágenes de muros estructurales de concreto reforzado sometidos a ensayos cuasi estáticos de carga cíclica, validando los resultados obtenidos con los sistemas de instrumentación convencionales y software comercial.	40
6.1.1. Montaje experimental.....	41
6.1.2. Instrumentación.....	42
6.1.3. Desarrollo del ensayo en muros de concreto reforzado.	43
6.1.4. Validación del sistema de correlación digital de imágenes de bajo costo utilizando la licencia educativa del software comercial de Correlated Solutions (VIC 3D-9)	43
6.1.5. Validación del sistema de correlación digital de imágenes de bajo costo utilizando el software de código abierto de Dana Solav (DuoDIC).....	47
6.2.Procesamiento de imágenes de probetas de acero sometidas a ensayos de tensión, validando los resultados obtenidos con los sistemas de instrumentación utilizados y el software comercial.	52
6.2.1. Preparación para implementación de la técnica de correlación digital de imágenes en 2d sobre probetas de acero reforzado.....	52
6.2.2. Preparación de la probeta de acero para implementación del sistema de strain gauges.	53
6.2.3. Preparación e implementación del ensayo de tracción en platinas.	54
6.2.4. Implementación del sistema de DIC 2D.	55
6.2.5. Desarrollo del ensayo de tracción en platinas.	56
6.2.6. Procesamiento digital de imágenes en 2D usando el software NCORR.	57
6.2.7. Validación del sistema de correlación digital de imágenes en 2D de bajo costo utilizando el software de código abierto de Justin Blaber (NCORR).	58

6.3.Adecuación final del código según los resultados obtenidos con los ensayos.	61
7. MANUALES DE USUARIO.	61
7.1.Metodología de aplicación de puntos en muros de concreto reforzado.	61
7.2.Metodología de aplicación de puntos en probetas pequeñas.....	63
7.3.Ajuste de los parámetros intrínsecos de las cámaras para el desarrollo de un ensayo de correlación digital de imágenes en 3D.	66
7.3.1. Tiempo de exposición.	66
7.3.2. Grado de apertura.....	66
7.3.3. Sensibilidad ISO.	67
7.3.4. Enfoque.	67
7.3.5. Campo de visión.....	67
7.4.Calibración estéreo de cámaras.	68
7.5.Manuales de procesamiento digital de imágenes en 2D y 3D.....	70
7.6. <i>Manual de correlación digital de imágenes en 2D haciendo uso del software libre NCORR.</i>	70
7.7.Manual de correlación digital de imágenes en 3D haciendo uso del software libre DuoDIC.	70
7.8.Manual de correlación digital de imágenes en 3D haciendo uso del software de Correlated Solutions VIC 3D9.....	70
7.9.Manual audiovisual para el desarrollo de ensayos en muros de concreto reforzado y tracción en probetas de acero.	70
8. CONCLUSIONES.....	71
9. BIBLIOGRAFÍA.....	72
10. ANEXOS.....	75
10.1. ANEXO 1: MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D USANDO EL SOFTWARE LIBRE NCORR	75
10.2. ANEXO 2: MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D USANDO EL SOFTWARE LIBRE DuoDIC	97
10.3. ANEXO 3. MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D USANDO EL SOFTWARE DE CORRELATED SOLUTIONS VIC 3D-9.....	129
10.4. ANEXO 4: CERTIFICADO AL PRIMER LUGAR EN EL CONCURSO GREEN BEAM COMPETITION.	152
10.5. ANEXO 5: EQUIPO DE TRABAJO.....	152

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Instrumentación de un muro de concreto reforzado con sensores (LVDT's, deformímetros, strain gauges, entre otros.....	13
Figura 2. Tasa de publicación de artículos en revistas que utilizan la técnica del DIC.	16
Figura 3. Prueba de calibración con el patrón de ajedrez en muros de concreto.	21
Figura 4. Resultados de calibración para el patrón de ajedrez de 35mm de lado.	22
Figura 5. Prueba de calibración con el patrón de ajedrez de 10mm de lado.	22
Figura 6. Resultados de calibración para el patrón de ajedrez de 10mm de lado.	23
Figura 7. Prueba de calibración con el patrón de ajedrez de 7mm de lado.	23
Figura 8. Resultados de calibración para el patrón de ajedrez de 7mm de lado.	24
Figura 9. Prueba de calibración con el patrón de ajedrez de 5mm de lado.	24
Figura 10. Resultados de calibración con el patrón de ajedrez de 5mm de lado.	24
Figura 11. Puntos de control en procesamiento de un muro de concreto reforzado, en las miniaturas se chequea que el subset de referencia corresponda con los subsets deformados a lo largo del ensayo. ...	26
Figura 12. Deformación unitaria en ϵ_{xx} para diferentes instantes de un ensayo de tracción en platinas de acero. Se puede apreciar la generación de una rotula plástica en el punto de concentración de esfuerzos de la probeta.	27
Figura 13. Deformación unitaria en ϵ_{yy} para diferentes instantes de un ensayo de tracción en platinas de acero. Se puede apreciar la disminución de sección en el punto de concentración de esfuerzos de tensión.	28
Figura 14. Evolución de los estados de daño en cilindros de concreto sometidos a tracción indirecta [41].	29
Figura 15. Evolución de los estados de daño en una viga de concreto reforzado sometida a flexión, Green Concrete Beam Competition.	30
Figura 16. Deflexiones en el centro de la luz en una viga de concreto reforzado en el instante de máxima resistencia y al momento en que se presenta la falla por flexión.	30
Figura 17. Sistema de soporte inicial para la configuración estéreo de cámaras.	31
Figura 18. Sistema de soporte definitivo para la configuración estéreo de cámaras.	31
Figura 19. Desfase entre capturas para el ensayo del muro M2T, cámara 0 y cámara 1.	32
Figura 20. Sistema de iluminación compuesto por dos reflectores de 50W, configuración #1.	33
Figura 21. Sistema de iluminación definitivo, compuesto por los reflectores y luces led distribuidas en el marco de pruebas, configuración #2.	33
Figura 22. Sistema de iluminación para ensayos cercanos, configuración #3.	34
Figura 23. Configuración del sistema DIC contra explosiones de probetas.	34
Figura 24. Pruebas con osciloscopio sobre las señales digitales de captura de imágenes.	36
Figura 25. Protocolo de desplazamiento de un ensayo en muros de concreto reforzado sincronizado con los disparos de las cámaras.....	37
Figura 26. Sistema estéreo de bajo costo para correlación digital de imágenes en 3D, configuración para ensayos en muros de concreto reforzado.....	37
Figura 27. Sistema estéreo de bajo costo para correlación digital de imágenes en 3D; configuración para ensayos en cilindros de concreto.	38
Figura 28. Sistema DIC de bajo costo para correlación digital de imágenes en 2D; configuración para ensayos de tracción en platinas de acero.....	39
Figura 29. Sistema DIC de bajo costo para correlación digital de imágenes en 2D; configuración para ensayos de flexión en vigas de concreto reforzado.	39
Figura 30. Montaje experimental utilizado para ensayos de muros de concreto reforzado [38].	41
Figura 31. (a) Instrumentación de un muro de pruebas en la cara norte y caras laterales, y (b) localización de galgas internas del acero.	42
Figura 32. Implementación del sistema estéreo DIC en una prueba cíclica en muros de concreto reforzado.	43

Figura 33. Sistema estéreo de correlación digital de imágenes propuesto.	44
Figura 34. Comparación de resultados del sensor T25-03 VS DIC, muro M4I10, M5T10, M6T10, M5T10R.	44
Figura 35. Comparación de resultados, sensor T12-02 y T12-03 VS DIC, muro M2T10.	45
Figura 36. Comparación de resultados sensor T12-04 y T25-03 VS DIC, muro M2T10.	45
Figura 37. Estados de daño de los muros ensayados en laboratorio aplicando la técnica de 3D-DIC, muro M2T10, M2T10RR, M3R10, M4I10, M5T10, M6T10, M5T10R.	46
Figura 38. Evolución del daño vs deriva y ciclo de histéresis en los muros estructurales evaluados en laboratorio, muro M4I10, M5T10, M6T10, M5T10R.	47
Figura 39. Comparación de mediciones obtenidos con el sensor T25-03 vs DIC.	48
Figura 40. Campo de desplazamientos en X para diferentes estados del muro M7RR.	50
Figura 41. Estados de daño del muro M7RR.	51
Figura 42. Sistema de correlación de imágenes en 2D en ensayos de tracción.	52
Figura 43. Platinas de acero con el patrón aleatorio de puntos en su superficie.	53
Figura 44. Strain gauge instalada y cableada en la probeta de acero.	54
Figura 45. Ensayo de tracción en platinas hasta la falla.	54
Figura 46. Configuración del ensayo de tracción en probetas de acero.	55
Figura 47. Configuración del ensayo de tracción en probetas de acero; posición de la cámara con respecto a la probeta.	56
Figura 48. Caja de adquisición de strain gauges.	57
Figura 49. Principio de correlación digital de imágenes en ensayos de tracción en 2d.	58
Figura 50. Comparación de resultados obtenidos del deformímetro vs DIC, probeta 1, 2 y 3.	59
Figura 51. Curvas esfuerzo deformación obtenidas con DIC, probeta 1, 2 y 3.	60
Figura 52. Aplicación del patrón aleatorio de puntos de forma manual con marcadores sharpie en un muro de concreto reforzado. Se observa el resultado del patrón aleatorio, de muy buena calidad y homogéneo.	62
Figura 53. Aplicación del patrón de puntos con la plantilla tipo stencil. Se observa cómo queda un patrón poco homogéneo, con mal aspecto, mala distribución y con diferencia de tonalidad en las tintas de la pintura con respecto a los marcadores.	63
Figura 54. Probetas de acero con el patrón aleatorio de puntos aplicado en su superficie.	64
Figura 55. Análisis de la distribución y calidad del patrón de puntos en base a su intervalo de incertidumbre.	64
Figura 56. Cilindros de concreto con el patrón aleatorio de puntos aplicado en su superficie.	65
Figura 57. Análisis de la distribución y calidad del patrón de puntos en base a su intervalo de incertidumbre.	66
Figura 58. Enfoque manual de las cámaras previsualizado desde la pantalla principal.	67
Figura 59. Campo de visión de las cámaras para diferentes estados del ensayo de carga cíclica en muros.	68
Figura 60. Las tres transformaciones elementales del modelo de cámara pinhole y los sistemas de coordenadas asociados. La primera transformación relaciona las coordenadas globales de un punto de la escena con las coordenadas en el sistema de la cámara. La segunda es la transformación de proyección de este punto en el plano retiniano. La tercera transforma el punto en el sistema de coordenadas del sensor (unidades de píxeles) [20].	69

RESUMEN.

La aplicación de la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) provee mediciones del desplazamiento en elementos estructurales y no estructurales sometidos a diferentes tipos de carga. Esta técnica permite el uso de equipos y configuraciones más simples que las planteadas en los sistemas tradicionales de medición (p.e., medición con LVDTs, potenciómetros, etc.), los cuales requieren gran cantidad de conexiones, complejos sistemas de adquisición, y se limitan a dar información en unos cuantos puntos y solo en la dirección de medición del sensor. Adicionalmente, los sistemas comerciales de DIC, compuestos por software y hardware, presentan un costo elevado que los hace inviables para ser utilizados en algunos laboratorios de investigación. De acuerdo con esto, se implementó esta técnica con un sistema de bajo costo, compuesto por dos cámaras DSLR de buena resolución, una estructura adecuada para el soporte de las cámaras, un buen sistema de iluminación, un sistema de adquisición para realizar la captura automática de las imágenes, y un software libre de procesamiento, permitiendo obtener campos tridimensionales de desplazamiento. En este trabajo de grado se presenta la implementación y la validación de un sistema de bajo costo para la medición de campos de desplazamiento en 2 y 3 dimensiones. En ensayos desarrollados sobre elementos estructurales, se encontró que el sistema propuesto, unido al procesamiento con un software libre (NCORR, DuoDIC), resulta ser versátil y provee mediciones confiables, además de brindar un panorama completo de la evolución de los estados del daño de las probetas.

Palabras clave: correlación digital de imágenes, campos tridimensionales de desplazamiento, sistema de bajo costo, NCORR, DuoDIC.

ABSTRACT

The application of Digital Image Correlation (DIC) technique provides measurements of displacement in structural and non-structural elements subjected to various types of loading. This technique allows for the use of simpler equipment and configurations compared to traditional measurement systems (e.g., measurement with LVDTs, potentiometers, etc.), which require a large number of connections, complex data acquisition systems, and are limited to providing information at a few points and only in the direction of the sensor's measurement. Additionally, commercial DIC systems, consisting of software and hardware, come with a high cost that makes them impractical for use in some research laboratories. In line with this, this technique was implemented using a low-cost system. This system is composed of two high-resolution DSLR cameras, a suitable camera support structure, effective lighting, an acquisition system for automated image capture, and free processing software, allowing for the generation of three-dimensional displacement fields. This thesis presents the implementation and validation of a low-cost system for measuring displacement fields in both 2 and 3 dimensions. Through experiments conducted on structural elements, it was found that the proposed system, combined with processing using free software (NCORR, DuoDIC), is versatile and provides reliable measurements, while also offering a comprehensive view of the evolution of the specimen's damage states.

Keywords: digital image correlation, three-dimensional displacement fields, low-cost system, NCORR, DuoDIC.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de técnicas de visión artificial ha experimentado un crecimiento casi exponencial, despertando un interés significativo en su aplicación en una amplia gama de campos que abarcan desde la mecánica experimental de materiales hasta la medicina y la astronomía, entre otros [1]. Estas técnicas se aplican para medir la respuesta mecánica de materiales y estructuras, así como para caracterizar sus propiedades mecánicas, lo que resulta en aplicaciones que abarcan desde la nano escala hasta la macro escala, con notables avances y desarrollos en constante evolución [Pan, 2018; Reu, 2015; Sutton et al., 2017]. En el campo de la ingeniería, ha surgido un interés por emplear la visión artificial en estructuras civiles, motivado en gran medida por las dificultades experimentales y los altos costos asociados a las técnicas tradicionales de medición de desplazamientos [2,3]. La correlación digital de imágenes en 3 dimensiones (Estéreo DIC) es una técnica óptica-numérica sin contacto para medir campos de desplazamiento en 3D, a partir de pares de imágenes digitales de la superficie de un objeto. Estas imágenes sincronizadas desde Matlab y capturadas mediante el uso de un par de cámaras DSLR que basan la adquisición de una imagen a través del reflejo en un espejo de la luz que llega del objetivo hacia un visor óptico. Su nombre es prácticamente sinónimo de «cámara profesional», pero existe una amplia variedad de DSLR adaptadas para diferentes tipos de usuarios, desde aficionados, hasta profesionales [4]. El uso de un sistema estéreo creado con este tipo de cámaras y su procesamiento con la técnica de correlación digital de imágenes en tres dimensiones (Estéreo DIC) es capaz de generar un campo tridimensional de desplazamientos en cualquier superficie sometida a ensayos mecánicos.

Cuando se emplea una técnica tradicional para medición de desplazamientos (p.e., medición con LVDTs, potenciómetros, etc.), se requieren gran cantidad de conexiones, complejos sistemas de adquisición (tarjetas de adquisición y de acondicionamiento), y grandes longitudes de cableado directamente relacionadas a las necesidades de medición. Por otro lado, se obtiene información limitada en unos cuantos puntos ligado a la cantidad de sensores que se tengan disponibles y solo en la dirección de medición del sensor. En el caso de un sistema estéreo de cámaras, aplicando la técnica de correlación digital de imágenes, se busca medir un campo tridimensional de desplazamientos sobre toda la superficie de interés a partir de la comparación de subregiones en toda la imagen, definidas por patrones aleatorios de puntos [5].

Los sensores tradicionales tienen una buena precisión en la medida de desplazamientos, siempre y cuando se lleve a cabo un adecuado montaje e instrumentación en cada ensayo, sin embargo, siempre existe la posibilidad de pérdidas parciales o totales de la información debido a desconexiones, ruido excesivo, inconvenientes en los sistemas de adquisición, etc. [2,3]. Además, se debe salvaguardar la integridad del sensor limitando su utilización hasta antes de la falla del elemento, dejando de adquirir datos que pueden ser de interés al realizar una caracterización de comportamiento. Por otro lado, los sensores son costosos, requieren cables y puertos específicos de cada marca, y sus reparaciones deben hacerse por personal calificado, generando costos adicionales de instrumentación. En contraste, el uso de un sistema estéreo de correlación digital de imágenes provee campos de desplazamientos en 3 dimensiones hasta la falla sin necesidad de una gran longitud de cableado y con mínima participación de personal, solo aplicando un patrón aleatorio de puntos. Se garantiza entonces una alta densidad de mediciones en toda la superficie de interés, reemplazando así gran cantidad de sensores por un sistema estéreo de cámaras DSLR. Esto reduce significativamente el costo de un ensayo en comparación con el sistema tradicional y con el sistema estéreo comercial de DIC.

En este trabajo de grado se implementa un sistema de medición de desplazamientos en 3 dimensiones. Se emplea un montaje desarrollado en el laboratorio Marco de Pruebas Para Homologaciones del Grupo de Investigación G7, compuesto por un par de cámaras DSLR Nikon

D5600, una estructura tipo trípode para el soporte de las cámaras, un sistema de iluminación, y un sistema de adquisición para realizar la captura automática de las imágenes desde el computador. Las imágenes son procesadas con códigos libres de correlación digital de imágenes en 2d (NCORR) y 3d (DuoDIC) adecuados para este fin. El sistema se valida mediante la comparación con las mediciones realizadas con sensores convencionales en pruebas experimentales de muros estructurales de concreto reforzado y platinas de acero sometidas a tensión. Esta investigación se encuentra enmarcada dentro del proyecto “Evaluación del comportamiento estructural y propuesta de reforzamiento para edificaciones existentes de muros delgados de concreto reforzado”, perteneciente al programa “TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE INFRAESTRUCTURA CIVIL”, a cargo del Grupo de Investigación en Ingenierías Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7), patrocinado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MINCIENCIAS) de la República de Colombia y la Universidad del Valle.

1. DESCRIPCIÓN

1.1. Planteamiento del problema.

Los ensayos mecánicos en elementos estructurales, no estructurales y probetas de materiales requieren una gran cantidad de sensores (LVDT's, deformímetros, strain gauges, entre otros) para obtener una descripción completa de su comportamiento mecánico, (Figura 1). Ellos requieren múltiples sistemas de adquisición (tarjetas de adquisición y de acondicionamiento), grandes longitudes de cableado, personal altamente calificado, y calibración de los sensores. Esto genera un alto costo y consume un tiempo considerable en los proyectos de investigación. Además, al tener contacto directo con el elemento pueden dañarse durante el desarrollo del ensayo, y es más dispendioso el hacer perforaciones y colocar elementos de apoyo externos y otros adheridos al muro. Estas perforaciones también pueden afectar las propiedades mecánicas de los elementos a ensayar y por ende afectar los resultados experimentales.



Figura 1. Instrumentación de un muro de concreto reforzado con sensores (LVDT's, deformímetros, strain gauges, entre otros).

Debido a esto, en muchos laboratorios de investigación se emplean métodos de visión artificial con técnicas más complejas que utilizan la óptica para analizar desplazamientos y deformaciones sin necesidad de tener un contacto directo con los elementos, requiriendo menor tiempo de instrumentación que con métodos tradicionales y obteniéndose mediciones de campo completo. También se emplean otros métodos como la correlación digital de imágenes usando un sistema estéreo de cámaras (Estéreo DIC) [2,4,5] o el uso de un sistema de cámaras de alcance/profundidad utilizando Kinect [2,4].

En el caso del sistema de Estéreo DIC, el problema radica en que estos sistemas comerciales presentan un costo muy elevado (45000 US\$ el hardware+software), además, si se tuviese un hardware propio, los software comerciales (p.e. Correlated Solution, Dantec Dynamics, EikoSim, gom, LaVision y MatchID) son propietarios y de código cerrado con un costo igualmente muy elevado (superior a los 35000 US\$), lo que limita su uso para algunos laboratorios o universidades, generando una barrera para la comunidad científica. Para el sistema de cámaras de alcance/profundidad (RGB-D-DIC), el problema radica en que la resolución obtenida en las mediciones realizadas no es muy alta como para reemplazar la precisión de los sensores convencionales.

Es por ello que es necesario implementar un sistema estéreo de correlación digital de imágenes compuesto por un hardware propio con coste menor al comercial y la adaptación de diferentes códigos abiertos que permitan desarrollar el procesamiento de las imágenes, haciendo posible la obtención de campos de desplazamiento en diversos elementos. En los ensayos cuasi estáticos de muros de concreto reforzado se espera reducir significativamente los costes de instrumentación, además de proveer información sobre toda la superficie del elemento y la evolución de los estados daño de los mismos.

Este proyecto reduce los costos de instrumentación y es una alternativa a los sistemas comerciales de DIC, por lo tanto, surge la siguiente pregunta:

¿Cómo implementar un sistema estéreo de correlación digital de imágenes de bajo costo para medir campos de desplazamientos en aplicaciones civiles?

1.2. Objetivos:

1.2.1. General:

Implementar y validar un sistema estéreo de correlación digital de imágenes de bajo costo para medir campos de desplazamiento en aplicaciones civiles.

1.1.1. Específicos:

- Adecuar diversos códigos libres de correlación digital de imágenes para generar un código preliminar en MATLAB que permita medir campos de desplazamiento en aplicaciones civiles.
- Mejorar el montaje para medición con DIC existente en el laboratorio Marco de Pruebas para Homologaciones.
- Validar el sistema de DIC mediante la comparación con mediciones realizadas en ensayos cuasi-estáticos de muros de concreto reforzado.
- Validar el sistema de DIC mediante la comparación con mediciones realizadas a probetas sometidas a tensión.

- Crear un manual de usuario detallado para el montaje del sistema, ejecución del ensayo y procesamiento digital de imágenes.

1.3. Justificación.

La caracterización del comportamiento mecánico de los materiales, elementos estructurales y no estructurales es de vital importancia en el campo de la ingeniería civil, y en particular, en el campo de estudio de la mecánica de la fractura de los materiales. Dicha caracterización está basada en ensayos de laboratorio que por lo general emplean sistemas tradicionales de medición basados en LVDT's o deformímetros análogos que requieren gran cantidad conexiones, complejos sistemas de adquisición, que se limitan a dar información solo en unos puntos específicos y en un sentido definido y no en toda la superficie visible del elemento. Esto implica que se requieran múltiples sensores en varios puntos para obtener resultados representativos del comportamiento del elemento, incurriendo en altos costos de instrumentación y consumiendo un tiempo considerable en los proyectos de investigación debido a lo dispendioso de la instalación de estos.

Esta propuesta de metodología para medir deformaciones sin contacto directo haciendo uso de un sistema estéreo de cámaras tendrá la capacidad de medir desplazamientos en tres direcciones simultáneamente sobre toda la superficie visible del elemento a ensayar, con un hardware de cámaras DSLR Nikon D5600 de bajo costo, y un software libre que sustituirá el uso de software comerciales (p.e. Correlated Solution, Dantec Dynamics, EikoSim, gom, LaVision y MatchID) que presentan un costo muy elevado (superior a los 35000 US\$), son propietarios y de código cerrado que los hace inviables para ser utilizados en algunos laboratorios de investigación y por estudiantes. En cuanto al hardware, estos sistemas comerciales utilizan cámaras SLR para la adquisición de las imágenes, dichas cámaras son de uso muy particular y no son tan comunes como las convencionales cámaras profesionales DSLR que podría tener cualquier persona interesada en aplicar la técnica para medir campos de desplazamientos en diferentes ensayos.

Se busca lograr una caracterización mecánica de los elementos y materiales ensayados, además de la posibilidad de aplicar estos resultados para mejorar el ajuste de modelos de elementos finitos, lo que lograría obtener desarrollos confiables en nuevos prototipos de elementos estructurales y no estructurales, materiales compuestos y caracterización de nuevos desarrollos, buscando mejorar y optimizar la infraestructura y vivienda, además de disminuir considerablemente los costos de instrumentación asociados a las nuevas investigaciones. En el caso de los muros de concreto reforzado ensayados en el Laboratorio Marco de Pruebas Para Homologaciones se busca poder analizar a profundidad la evolución de los estados de daño y completar información faltante. Se tendrá entonces un sistema DIC de bajo costo que se pueda implementar casi a cualquier tipo de ensayo, fácil de instalar, sencillo de manipular y procesar con moderado costo computacional beneficiando a la comunidad científica.

Debido a su capacidad para captar de forma sencilla e intuitiva el campo de deformaciones de una muestra, no cabe duda de que la correlación digital de imágenes (DIC) ha revolucionado y seguirá revolucionando las mediciones, con un hardware de cámara poco costoso se garantizará su continuo crecimiento y aplicación en diversos campos. El apoyo de un gran número de proveedores comerciales que venden sistemas de DIC es una prueba más de la popularidad y el poder de la técnica.

La figura que se presenta a continuación ilustra la tasa de publicación de artículos en revistas que hacen uso de dos técnicas de medición óptica diferentes: el DIC y la interferometría electrónica de patrones aleatorios (ESPI). Se observa un notorio crecimiento exponencial en el uso del DIC, a medida que la comunidad científica se adapta a esta innovadora técnica [5].

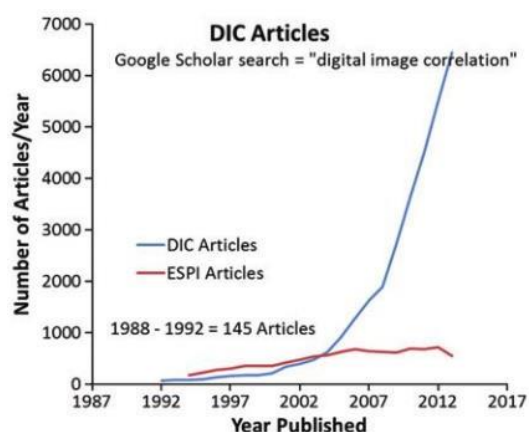


Figura 2. Tasa de publicación de artículos en revistas que utilizan la técnica del DIC [5].

Dado que la técnica del DIC es independiente del material ensayado o de la escala de longitud de interés, puede utilizarse en una amplia variedad de aplicaciones para investigar y caracterizar las deformaciones en los sólidos. Comúnmente se ensayan metales, polímeros, concreto reforzado, muestras geológicas, tejidos biológicos, electrodos de baterías, explosivos, etc. Y las piezas de ensayo van desde pequeñas probetas de ensayos a tracción hasta piezas enteras de aviones [3]. Se tienen múltiples aplicaciones de esta técnica, tales como, el análisis del comportamiento de materiales de pavimentos [6,7,8], análisis de elementos estructurales de concreto y concreto reforzado [9,10], análisis del comportamiento de geogrillas utilizadas en el campo de la geotecnia [11], identificación del comportamiento elástico de materiales [12], estudio del proceso de fractura y la evolución del daño en elementos de concreto [13,14,15], análisis biomecánico del cuerpo humano y el comportamiento de los materiales que lo componen [16], medición de propiedades mecánicas de acero de altaresistencia [17], mediciones en obra sobre puntales de acero y en tuberías bajo cambios de temperatura [18], entre otras múltiples aplicaciones en ingeniería [4]. Desde el punto de vista comercial, la técnica es aplicada por la NASA, Boeing, BMW, Michellin, Pirelli, la Armada de los Estados Unidos de Norteamérica, entre otros.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes

Los primeros trabajos desarrollados en el ámbito de la correlación de imágenes fueron realizados a principios de la década de 1950 por Gilbert Hobrough (1919-2002), quien comparó representaciones analógicas de fotografías para registrar características de varias vistas [19]. En 1961, Hobrough firmó y construyó un instrumento para "correlacionar la fotografía de reconocimiento de alta resolución con la fotografía topográfica de alta precisión con el fin de permitir una medición más precisa de las condiciones cambiantes del terreno" [19], siendo así uno de los primeros investigadores en intentar una forma de correlación digital de imágenes para extraer la formación posicional del proceso de correlación/cotejo de imágenes. A medida que se disponía de imágenes digitalizadas en las décadas de 1960 y 1970, los investigadores de inteligencia artificial y robótica empezaron a desarrollar algoritmos basados en la visión y metodologías de estereovisión en paralelo a las aplicaciones de fotogrametría para las fotografías aéreas [20].

Dadas las dificultades encontradas por los mecánicos experimentales durante el posprocesamiento de los datos de medición registrados fotográficamente, y el floreciente crecimiento de los métodos de procesamiento de imágenes en la comunidad de la visión, era natural que los investigadores emplearan el reciente progreso en la tecnología de imágenes digitales y desarrollaran (a) métodos para registrar digitalmente las imágenes que contienen datos de medición, (b) algoritmos para analizar las imágenes digitales y extraer los datos de medición y (c) enfoques para automatizar todo el proceso [20].

Uno de los primeros artículos en proponer el uso de la adquisición de imágenes por ordenador y la medición de deformaciones en sistemas de materiales fue escrito por Peters y Ranson en 1982 [21]. El método sugería una comparación de las imágenes digitales para varias regiones pequeñas (conocidas como subconjuntos) a lo largo de las imágenes antes y después de la deformación, localizando las posiciones de cada uno de estos subconjuntos después de la deformación a través del análisis de imágenes digitales. Como parte del enfoque previsto, los autores sugirieron utilizar los conceptos fundamentales de la mecánica del medio continuo que rigen la deformación de las áreas pequeñas como parte del "proceso de coincidencia" [20].

Utilizando este enfoque, en 1983 Sutton et al. [22] desarrollaron algoritmos numéricos y realizaron experimentos preliminares utilizando imágenes grabadas ópticamente para demostrar que lo que hoy en día se conoce como Correlación digital de Imágenes en 2D (2D-DIC), era factible cuando se utilizaban imágenes grabadas ópticamente. Anderson et al. [23] realizaron mediciones del movimiento del cuerpo rígido utilizando los algoritmos, demostrando que tanto las traslaciones como las rotaciones planas pueden ser estimadas de forma fiable a través de la correlación de imágenes 2D-DIC. Chu et al. en 1985 [24] realizaron una serie de experimentos para demostrar que el método puede aplicarse para cuantificar rotaciones y deformaciones en sólidos. Para mejorar la velocidad del proceso de análisis, en 1986 Sutton et al. [25] demostraron el uso de métodos de búsqueda de gradientes para que el emparejamiento de subconjuntos pudiera realizarse con una precisión de subpíxeles en toda la imagen para obtener un conjunto denso de mediciones de desplazamiento bidimensionales de campo completo. A finales de la década de 1980, Sutton et al. [26] realizaron simulaciones numéricas unidimensionales para proporcionar estimaciones iniciales sobre la precisión de las mediciones de la deformación en la correlación de imágenes [20].

Combinando los principios de estereovisión con los conceptos de 2D-DIC desarrollados y utilizados en imágenes de una sola cámara, Chao et al. desarrollaron, automatizaron y aplicaron con éxito un sistema de estereovisión de dos cámaras para la medición de las deformaciones tridimensionales en el extremo de la grieta [27,28]. Cárdenas-García et al. [29] consideraron configuraciones estéreo paralelas y convergentes con DIC para identificar características. Para superar algunas de las principales limitaciones del método utilizado en estos estudios (los subconjuntos cuadrados permanecían cuadrados en ambas cámaras, desajuste en la triangulación de los puntos correspondientes y movimientos manuales en un proceso de calibración que era laborioso y requería mucho tiempo), el método de estereovisión fue modificado [30] para incluir (a) los efectos de la perspectiva en la forma de los subconjuntos, (b) el uso de una rejilla con un rango de movimientos de calibración y (c) restricciones apropiadas en el análisis para incluir la presencia de líneas epipolares. Como parte del programa de investigación sobre el envejecimiento de las aeronaves de Estados Unidos, el sistema modificado se utilizó para obtener mediciones de deformación en una gama de tamaños de paneles de grietas [20].

En la Universidad de Valle, grupo de Investigación G7, se ha caracterizado e implementado dos metodologías para la medición de desplazamientos mediante técnicas de visión artificial, para aplicaciones estructurales como el análisis modal experimental, ensayos de carga cíclica, ensayos de fluencia y los ensayos de desplazamientos estáticos. La primera metodología utiliza cámaras de profundidad de bajo coste, una cámara de tiempo de vuelo y otra de luz estructurada, que fueron calibradas, evaluadas e implementadas en ensayos estáticos y dinámicos, durante un ensayo de carga cíclica de un muro de hormigón armado a escala real y en ensayos de mesa vibratoria [2]. La segunda metodología utiliza los principios de la correlación digital de imágenes (DIC) y una cámara RGB-D (RGB-D-DIC). Una cámara Kinect V2 de bajo costo fue calibrada individualmente y en estéreo, evaluada e implementada en una prueba de comparación con un sistema DIC tridimensional comercial [3]. Los resultados muestran que ambas metodologías proporcionan mediciones de alta precisión en comparación con los sensores comúnmente utilizados para las mediciones de desplazamiento, con las ventajas añadidas de ser sin contacto y proporcionar información tridimensional.

2.2. ESTADO DEL ARTE.

Justin Blaber desarrollo un software de código abierto en MATLAB para la correlación digital de imágenes en 2D. Este software tiene una interfaz gráfica de usuario accesible e intuitiva, utiliza muchos algoritmos novedosos de 2D DIC, está totalmente contenido en el entorno MATLAB y contiene herramientas de trazado para la creación de figuras. Los algoritmos de cálculo intensivo están optimizados mediante el uso de C++/MEX, mientras que la interfaz gráfica de usuario está escrita principalmente en MATLAB. Ofrece a los usuarios un programa DIC fácil de usar, eficiente y flexible [31].

Devan Atkinson y Thorsten Hermann Becker presentaron el marco teórico de la correlación digital de imágenes en dos dimensiones 2D DIC basado en subconjuntos que es predominantemente coherente con las técnicas más avanzadas, y lo implementaron en un código abierto modular de MATLAB que han desarrollado. El aspecto de la correlación de este código ha sido validado, mostrando que funciona a la par que los softwares DIC bien establecidos, tales como los comerciales y, por tanto, es suficientemente fiable para su uso práctico. Por lo tanto, este trabajo sirve como recurso educativo para salvar la brecha entre la teoría del DIC y su implementación práctica. Además, aunque el código está diseñado como un recurso educativo, su validación combinada con su modularidad lo hace atractivo como punto de partida para desarrollar las capacidades de DIC [32].

Posteriormente, estos autores han presentado el marco teórico del Estéreo DIC basado en subconjuntos para la aplicación con dos cámaras. El marco teórico se implementa en la práctica como un código MATLAB de 202 líneas. La validación del marco teórico muestra que funciona a la par que los algoritmos Estéreo DIC bien establecidos, lo que indica que es suficientemente fiable para su uso práctico [33].

El grupo de investigación de Dana Solav en el Technion ha desarrollado un código abierto en MATLAB para correlación digital de imágenes en 3 dimensiones (Estéreo DIC). Este código es llamado MultiDIC y fue desarrollado para permitir una rápida calibración y fusión de datos incluso para un gran número de cámaras, y para ser fácilmente adaptable a diferentes requisitos experimentales. MultiDIC integra el software Ncorr, basado en subconjuntos 2D DIC, con los algoritmos de calibración de cámaras de MATLAB para reconstruir superficies 3D a partir de múltiples pares de imágenes estéreo. Además, contiene algoritmos para calcular y visualizar medidas de desplazamiento, deformación y tensión en 3D. Los scripts de alto nivel permiten a los usuarios realizar análisis 3D-DIC con una interacción mínima con la sintaxis de MATLAB, mientras que los usuarios competentes de MATLAB también pueden utilizar funciones y estructuras de datos independientes para escribir scripts personalizados para requisitos experimentales específicos [34]. Posteriormente, y debido a la creciente necesidad de adaptar su código abierto a la metodología de los softwares comerciales, Solav ha desarrollado un código abierto en MATLAB para correlación digital de imágenes en 3 dimensiones (Estéreo DIC) utilizando un sistema de dos cámaras, basados en el marco teórico propuesto por Atkinson y Becker [33]. Este código es llamado DuoDIC e integra la misma metodología de MultiDIC integrando Ncorr y reconstruyendo superficies 3D a partir de pares de imágenes estéreo [35].

En los últimos años se han venido desarrollando sistemas de correlación digital de imágenes de bajo coste para evaluar el comportamiento de diferentes materiales. En la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro se ha desarrollado un sistema para 2D DIC compuesto por una cámara DSLR semiprofesional Nikon D3400 y un lente AF-S DX Nikkor 18-105 mm f/3,5-5,6 ED VR, acompañada de un montaje específico, un par de lámparas LED como sistema de iluminación y el procesamiento de las imágenes mediante la licencia educativa del software GOM Correlated. Los resultados obtenidos permitieron describir el comportamiento intrínseco de los diferentes polímeros ensayados comparados con los resultados obtenidos mediante el uso de un extensómetro. Se pudieron representar todas las etapas de deformación y analizar el comportamiento mecánico macroscópico [36]. Por otro lado, se ha propuesto una metodología para aplicar técnicas de 2D DIC utilizando cámaras profesionales DSLR, realizando el procesamiento de imágenes con un código abierto llamado DICe creado por el Sandia National Lab para supervisar el ensayo brasileño de resistencia a la tracción en suelos compactados. Obteniendo medidas independientes de campo completo y mostrando la secuencia de iniciación, propagación y terminación de grietas durante el ensayo, constituyendo una alternativa fiable frente a sensores tradicionales que proveen únicamente mediciones locales. Este sistema de bajo costo fue comparado con un sistema estéreo comercial llamado Aramis-3D de la empresa Gom Correlated que fue utilizado paralelamente durante los ensayos. Los resultados obtenidos fueron muy buenos y, por tanto, el enfoque de bajo coste propuesto implica un ahorro considerable en comparación con los sistemas comerciales [37].

3. RESULTADOS

En esta sección se exponen los resultados y productos obtenidos, organizados en cuatro subsecciones: i) código para procesamiento de imágenes en 3D con diversos patrones de calibración y para diferentes aplicaciones en ingeniería civil; ii) descripción del mejoramiento del montaje de DIC; iii) validación de los softwares libres de correlación de imágenes, y iv) manual del sistema para aplicación de la técnica de DIC. El desarrollo de estos pasos permitió construir un prototipo para el sistema de medición de campos de desplazamientos en 2D y 3D mediante el empleo de cámaras DSLR convencionales.

4. CÓDIGO PARA PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN 3D.

Durante el desarrollo de este trabajo de grado se implementaron múltiples códigos libres de correlación digital de imágenes para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes en 2D Y 3D en diversas aplicaciones de ingeniería civil, dichos códigos fueron testeados y evaluados utilizando imágenes adquiridas con el sistema de correlación digital de imágenes de bajo costo desarrollado en la Universidad del Valle. Se validaron diversos patrones de calibración para que cualquier usuario del sistema pueda utilizarlos en otros ensayos, y se obtuvieron las imágenes de la propagación de los estados de daño en diversas probetas.

4.1. Adecuación de los códigos libres para realizar la calibración estéreo de las cámaras con patrones de calibración de ajedrez y de puntos.

Para llevar a cabo la calibración estéreo se utilizó el primer script de DuoDIC que tiene como nombre *DuoDIC_STEP1_Stereo_calibration*, y es el script principal para llevar a cabo la calibración estéreo, calculando los parámetros extrínsecos e intrínsecos de las cámaras necesarios para desarrollar la reconstrucción 3d del elemento ensayado. La calibración permite encontrar en base a la geometría epipolar, las distancias focales y los puntos principales de las cámaras. Además, determina la transformación de coordenadas de las cámaras a partir de la obtención de la matriz de rotación y el vector de traslación que relaciona el sistema coordenado de una cámara con el de la otra. Este script utiliza el Toolbox de Visión de Artificial de Matlab, que incluye algoritmos de calibración diseñados para procesar pares de imágenes del patrón de calibración de ajedrez calculando los parámetros de las cámaras.

Nota: Los resultados de la calibración y sus respectivos errores de reproyección dependen de la calidad del patrón de calibración, las condiciones de iluminación, la sincronización entre cámaras al momento de hacer capturas, y la configuración propia de las cámaras que debe ser la misma para ambas. Si se presentan movimientos en el sistema, hay variaciones en el zoom o enfoque de las cámaras luego de terminada la fase de calibración, debe repetirse dicha fase ya que los parámetros varían y se invalida la reconstrucción 3d.

Se validaron múltiples patrones de calibración con propiedades geométricas distintas para diversas aplicaciones de mecánica de materiales, en video se explica más detalladamente la ejecución de estas pruebas (https://correounivalleeducomy.sharepoint.com/:f:/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/Eu3mkHPSWPhBvhhreHWWXQ9UBwlmjLK6bnqmkcBOEVu_pPQ?e=00UIR3). Se siguió la metodología de desarrollo de la fase de calibración propuesta en este trabajo de grado y descrita en el ítem 3.4.4. Calibración Estéreo de Cámaras. El procesamiento de las imágenes se hizo siguiendo la metodología propuesta en el ANEXO 2 manual de DuoDIC, “2.1. Paso 1, Calibración estéreo”. A continuación, se presentan los patrones de calibración validados.

- Patrón de calibración de ajedrez con longitud de lado de 35mm. Este tipo de patrón de calibración se usa en probetas grandes y fue utilizado para los

The screenshot shows the Stereo Camera Calibrator software interface. The top menu bar includes 'Calibration', 'Image', 'Parameters', 'Options', 'Help', 'About', 'Exit', 'Open', 'Save', 'Print', 'Zoom Out', 'Zoom In', 'Reset', 'Load Preset', 'Save Preset', 'Load Preset', 'Save Preset', 'Load Preset', 'Save Preset'. The left sidebar shows a list of calibration images. The main window displays two camera views, Camera 1 and Camera 2, with detected points and a checkerboard pattern. The bottom left shows a 'Preparation Error' dialog box, and the bottom right shows a 3D point cloud visualization.

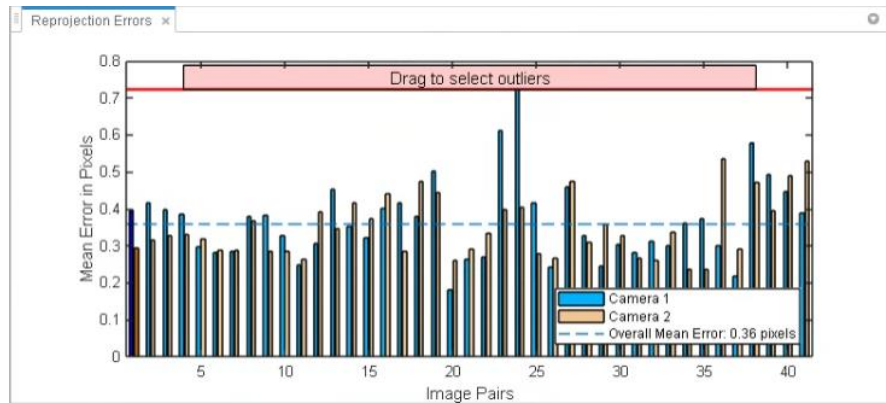
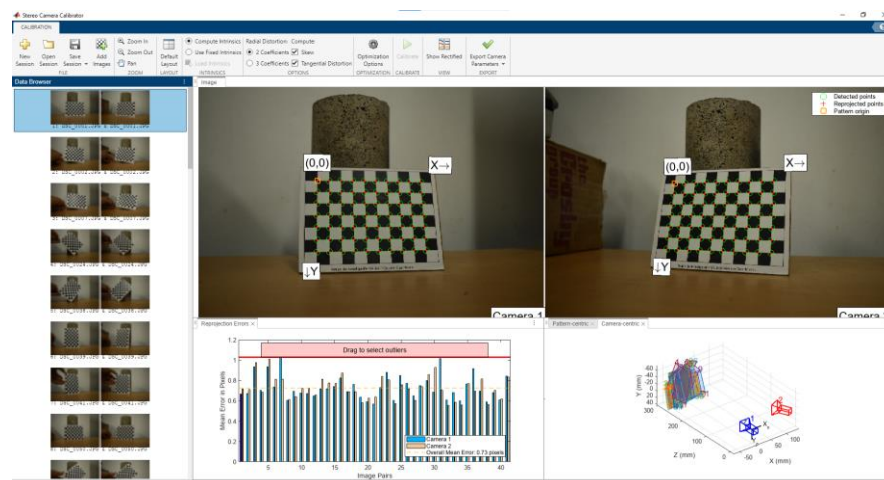


Figura 4. Resultados de calibración para el patrón de ajedrez de 35mm de lado.

- *Patrón de calibración de ajedrez con longitud de lado de 10mm.* Este tipo de patrón de calibración está pensado para probetas medianas y pequeñas, (Figura 5). Los resultados de calibración muestran que el error medio obtenido al utilizar este patrón de calibración es muy bajo, de alrededor de 0.73 píxeles, (Figura 6), lo que lo valida para ser utilizado en cualquier tipo de ensayo ya que arroja buenos resultados de calibración.



Figura 5. Prueba de calibración con el patrón de ajedrez de 10mm de lado.



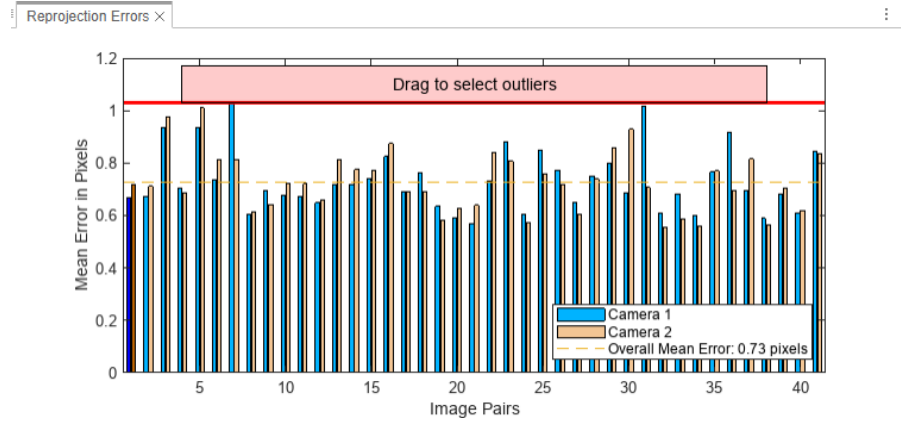


Figura 6. Resultados de calibración para el patrón de ajedrez de 10mm de lado.

- *Patrón de calibración de ajedrez con longitud de lado de 7mm.* Este tipo de patrón de calibración está pensado para ser utilizado en ensayos sobre probetas pequeñas, tales como cilindros de concreto o platinas de acero que requieran 3D DIC. Los resultados de calibración muestran que el error medio obtenido al utilizar este patrón de calibración es muy bajo, de alrededor de 0.80 píxeles, (Figura 8), lo que lo valida para ser utilizado en cualquier tipo de ensayo ya que arroja buenos resultados de calibración.



Figura 7. Prueba de calibración con el patrón de ajedrez de 7mm de lado.

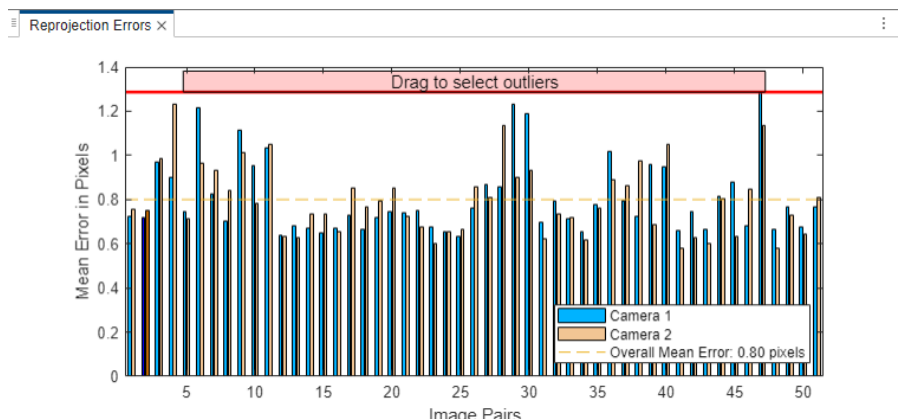


Figura 8. Resultados de calibración para el patrón de ajedrez de 7mm de lado.

- *Patrón de calibración de ajedrez con longitud de lado de 5mm.* Este tipo de patrón de calibración está pensado para ser utilizado en ensayos sobre probetas pequeñas, tales como cilindros de concreto o platinas de acero que requieran 3D DIC. Los resultados de calibración muestran que el error medio obtenido al utilizar este patrón de calibración es muy bajo, de alrededor de 0.73 pixeles, (Figura 10), lo que lo valida para ser utilizado en cualquier tipo de ensayo ya que arroja buenos resultados de calibración.



Figura 9. Prueba de calibración con el patrón de ajedrez de 5mm de lado.

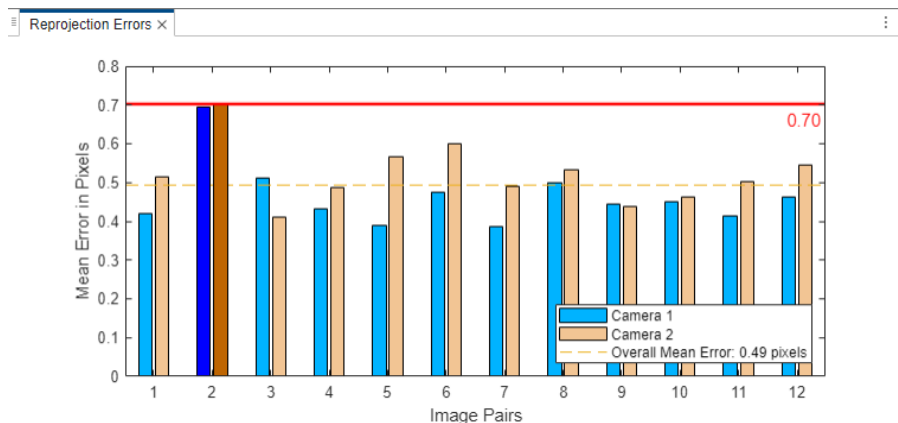


Figura 10. Resultados de calibración con el patrón de ajedrez de 5mm de lado.

4.2. Adecuación de los códigos libres para procesar múltiples imágenes de un objeto de prueba capturadas simultáneamente por el par de cámaras estéreo.

Para llevar a cabo el procesamiento de los pares de imágenes se utilizó el segundo script de DuoDIC que tiene como nombre *DuoDIC_STEP2_2DDIC_using_NCORR*, que es el script principal para analizar las imágenes estéreo de ambas cámaras utilizando Correlación Digital de Imágenes en 2D (2D DIC). Este script utiliza el software abierto NCORR [31]. La metodología llevada a cabo para este procesamiento se encuentra de forma detallada en los anexos presentados en este trabajo de grado “MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D USANDO EL SOFTWARE LIBRE NCORR” y “MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D USANDO EL SOFTWARE LIBRE

DuoDIC, Paso 2: 2D DIC utilizando NCORR Este procesamiento permite encontrar en términos de píxeles la correlación digital de imágenes de cada cámara de forma individual en 2 dimensiones.

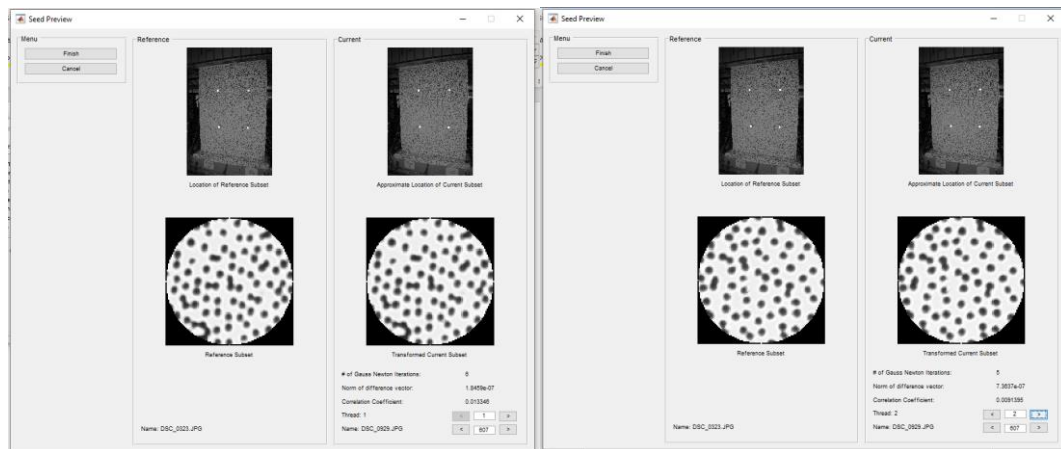
La reconstrucción de puntos 3D y superficies se lleva a cabo mediante triangulación estéreo utilizando el tercer script de DuoDIC que tiene como nombre *DuoDIC_STEP3_3D_Reconstruction*, este script transforma las nubes de puntos obtenidas del procesamiento previo en 2D de una imagen en puntos y superficies 3D, utilizando los parámetros de calibración.

El cálculo de los campos totales de desplazamiento se lleva a cabo con el cuarto script de DuoDIC que tiene como nombre *DuoDIC_STEP4_Post_Processing*, este script transforma las superficies 3D en campos de desplazamiento y deformaciones con sentido físico.

La metodología llevada a cabo para este procesamiento se encuentra de forma detallada en el manual presentado en este trabajo de grado **“MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D USANDO EL SOFTWARE LIBRE DuoDIC”**

4.3. Adecuación de los códigos libres para incluir puntos de control en las regiones de interés durante el procesamiento de los pares de imágenes.

No fue necesario adecuar los códigos libres para incluir puntos de control, ya que tanto el software NCORR, diseñado para el procesamiento digital de imágenes en 2D, como el software DuoDIC, orientado a la correlación digital de imágenes en 3D, cuentan con una herramienta que permite incluir puntos de control como centros de las subdivisiones utilizadas para procesar la región de interés. Esta herramienta permite detectar errores de correlación, los cuales pueden ser corregidos manualmente antes de continuar con el procesamiento, tras realizar una inspección visual tanto del estado inicial como del estado final de la probeta. Es posible colocar un punto de control por cada núcleo del procesador.



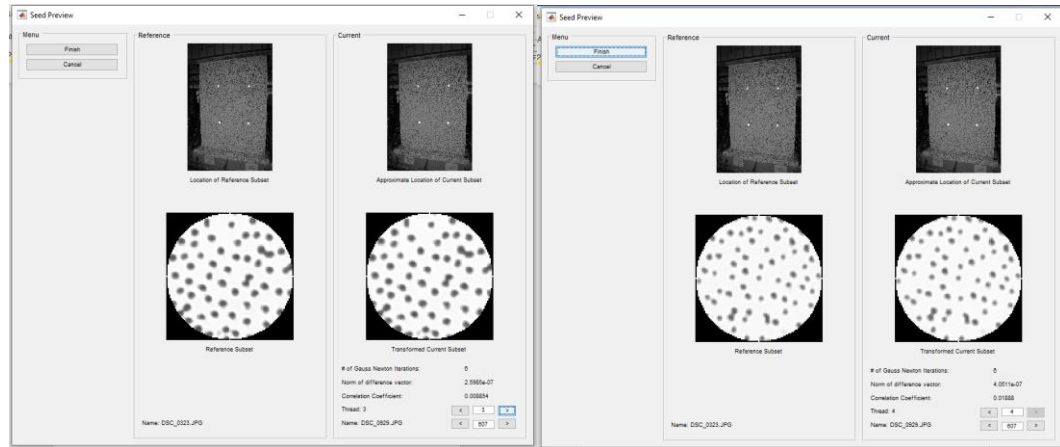


Figura 11. Puntos de control en procesamiento de un muro de concreto reforzado, en las miniaturas se chequea que el subset de referencia corresponda con los subsets deformados a lo largo del ensayo.

4.4. Adecuación de los códigos libres para exportar los datos generados a partir del procesamiento de las imágenes a Matlab y Excel.

No fue necesario adecuar los códigos libres para exportar los datos de la correlación digital de imágenes en 2D y 3D. NCORR y DuoDIC tienen herramientas que permiten exportar los resultados de la correlación como una matriz global de puntos que contiene los campos de desplazamiento para la imagen de referencia y cada una de las imágenes deformadas. Para exportar los datos del procesamiento fue utilizado el cuarto script de DuoDIC que tiene como nombre *DuoDIC_STEP4_Postprocessing*, y en NCORR la opción “Export Data”.

La metodología llevada a cabo para la extracción de datos se encuentra de forma detallada en los manuales presentados en este trabajo de grado **“MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D USANDO EL SOFTWARE LIBRE DuoDIC, Paso 4: Postprocesamiento”** y **“MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D USANDO EL SOFTWARE LIBRE NCORR”**

4.5. Adecuación de los códigos libres para exportar las imágenes de los estados de daño del objetode prueba en diversas escalas de colores.

No fue necesario adecuar los códigos libres para exportar las imágenes de los estados de daño de la probeta. NCORR y DuoDIC tienen herramientas que permiten exportar las imágenes del daño en diversas escalas de colores utilizando funciones de GIBBONCODE, un toolbox abierto de Matlab desarrollado por Kevin M. Moerman [42].

Para exportar las imágenes de los estados de daño de la probeta a lo largo del ensayo fue utilizado el cuarto script de DuoDIC que tiene como nombre *DuoDIC_STEP4_Postprocessing* y en NCORR la opción “Export Images”.

La metodología llevada a cabo para la extracción de las imágenes se encuentra de forma detallada en los manuales presentados en este trabajo de grado **“MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D USANDO EL SOFTWARE LIBRE DuoDIC, Paso 4: Postprocesamiento”** y **“MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D USANDO EL SOFTWARE LIBRE NCORR”**

4.5.1. Evolución de los estados de daño en probetas de acero sometidas a tensión.

En el ensayo de tracción en probetas de acero, se utilizó el sistema de DIC en 2D para monitorear la progresión de la falla en tiempo real, se muestra a continuación la deformación unitaria en ϵ_{xx} que experimentó la probeta para diferentes instantes del ensayo hasta la falla. Se puede apreciar cómo empieza a fluir el material bajo deformaciones unitarias de 0.0021 y cómo se concentran las deformaciones en la rótula plástica del material hasta su rotura, (figura 12). Este tipo de análisis en 2D permite encontrar las deformaciones y desplazamientos en cualquier punto dentro de la ROI, representando una ventaja con respecto a las tradicionales strain gauges que únicamente arrojan mediciones en un punto especificado de la probeta y que muchas veces se despegan de la misma antes de terminar la prueba.

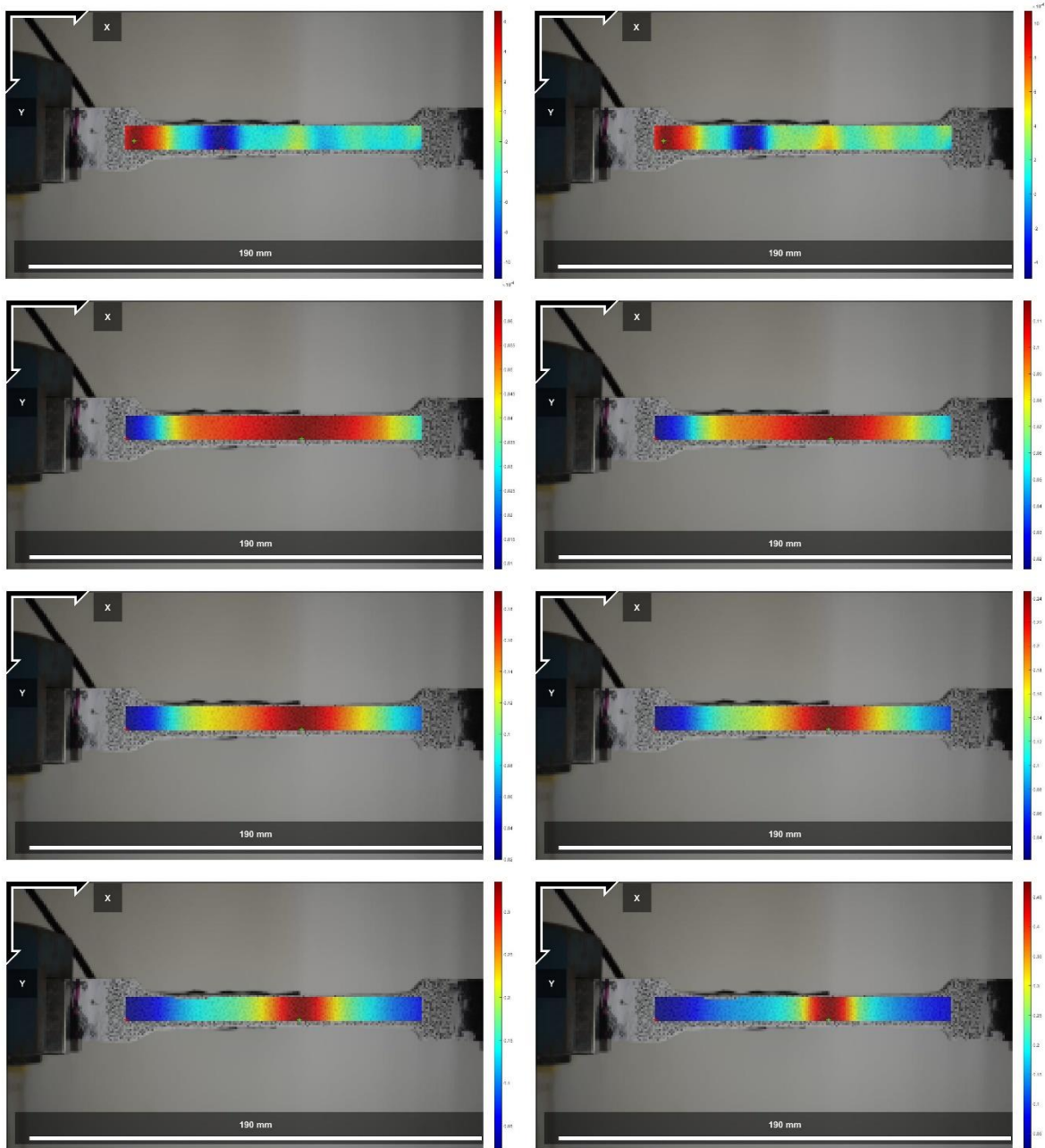


Figura 12. Deformación unitaria en ϵ_{xx} para diferentes instantes de un ensayo de tracción en platinas de acero. Se puede apreciar la generación de una rótula plástica en el punto de concentración de esfuerzos de la probeta.

Se muestra también la deformación unitaria en Y ϵ_{yy} que experimentó la probeta a lo largo del ensayo; se observa cómo la sección disminuye a medida que se aplica la tensión en el elemento y cómo esta reducción se concentra en la rótula plástica del elemento, (Figura 13).

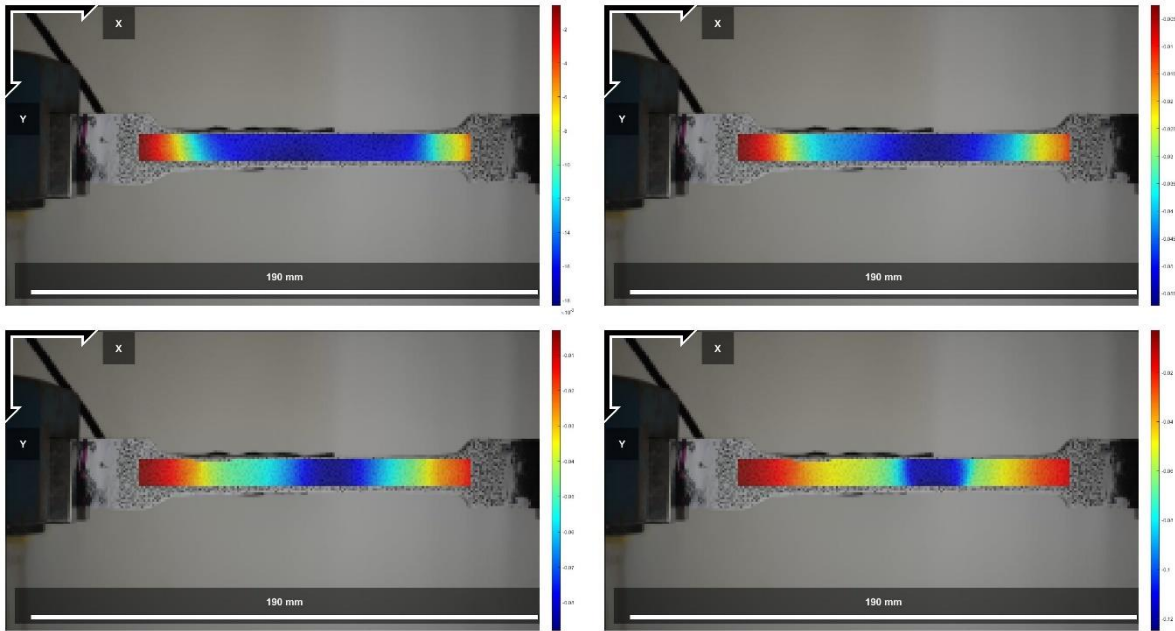


Figura 13. Deformación unitaria en Y ϵ_{yy} para diferentes instantes de un ensayo de tracción en platinas de acero. Se puede apreciar la disminución de sección en el punto de concentración de esfuerzos de tensión.

4.5.2. *Evolución de los estados de daño en cilindros de concreto sometidos a tracción indirecta.*

En un trabajo en conjunto con la profesora Mónica Villaquirán, de la Escuela de Ingeniería de Materiales [41], se utilizó el sistema de DIC en 2D para monitorear la progresión de la falla en tiempo real sobre probetas de concreto sometidas a tracción indirecta. La propagación de las grietas en este material bajo dicho ensayo se produce de forma súbita en un tiempo de alrededor de 1/60 segundos, por lo que se utilizó captura de video para adquirir las imágenes. Si bien esto reduce la resolución de las imágenes adquiridas, el objeto de la implementación de la técnica DIC en estas probetas fue únicamente el estudio de la progresión del daño. El procesamiento se llevó a cabo con el software NCORR, y se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 14).

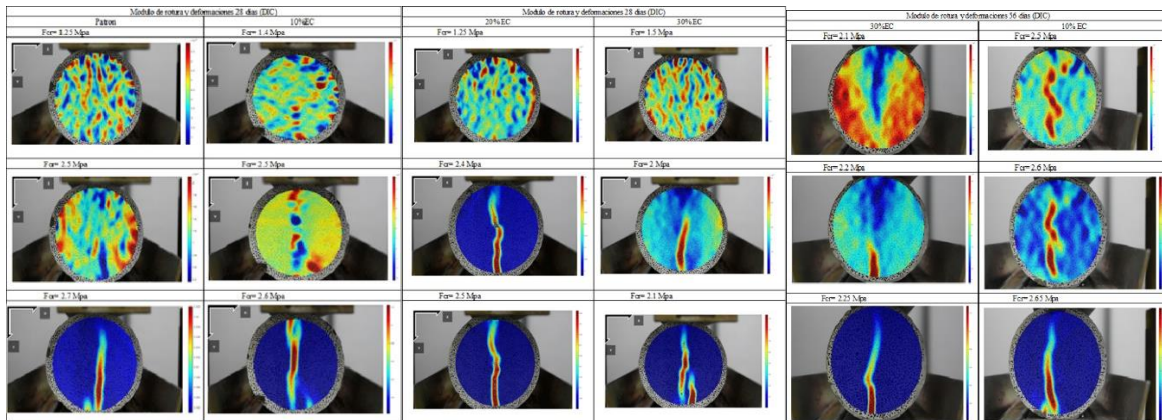
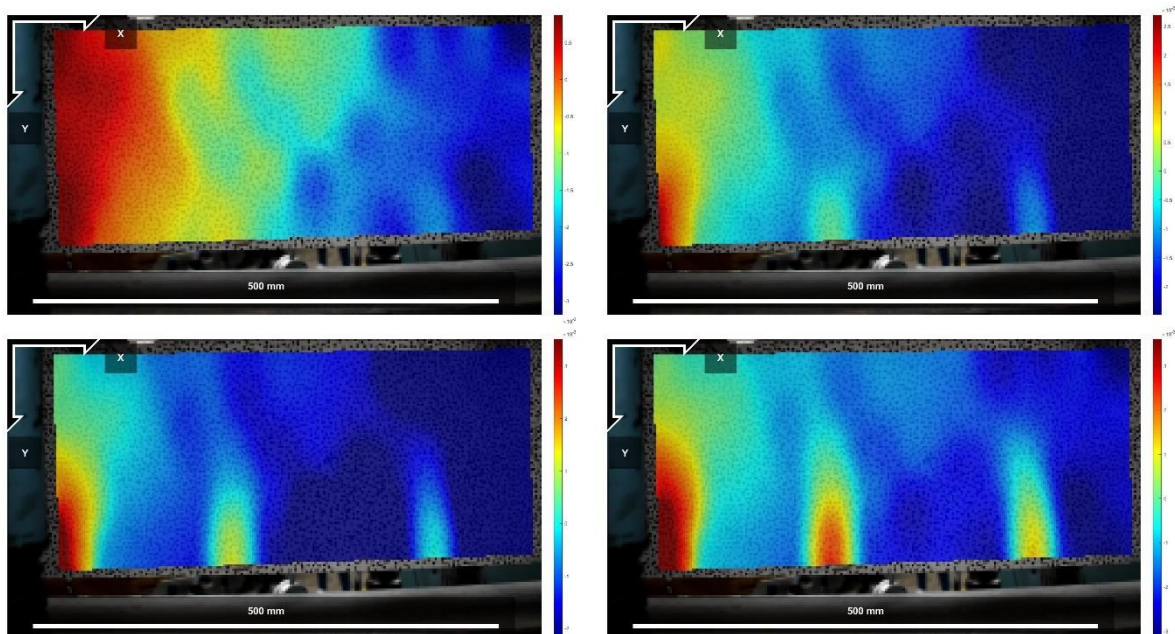


Figura 14. Evolución de los estados de daño en cilindros de concreto sometidos a tracción indirecta [41].

4.5.3. Evolución de los estados de daño en vigas de concreto reforzado sometidas a flexión.

Se utilizó el sistema de DIC en 2D para monitorear la progresión del daño en una viga de concreto reforzado sometida a flexión, (Figura 15). Este ensayo hizo parte de un concurso regional del ACI llamado Green Concrete Beam Competition en el cual se obtuvo el primer lugar por la novedosa aplicación de técnicas avanzadas de medición. La implementación de este sistema permitió determinar el instante de aparición del primer agrietamiento (que en un principio se detectaba únicamente por inspección visual teniendo un margen de error considerable), y, además, calcular la deflexión en el punto de máxima resistencia del elemento, (Figura 16).



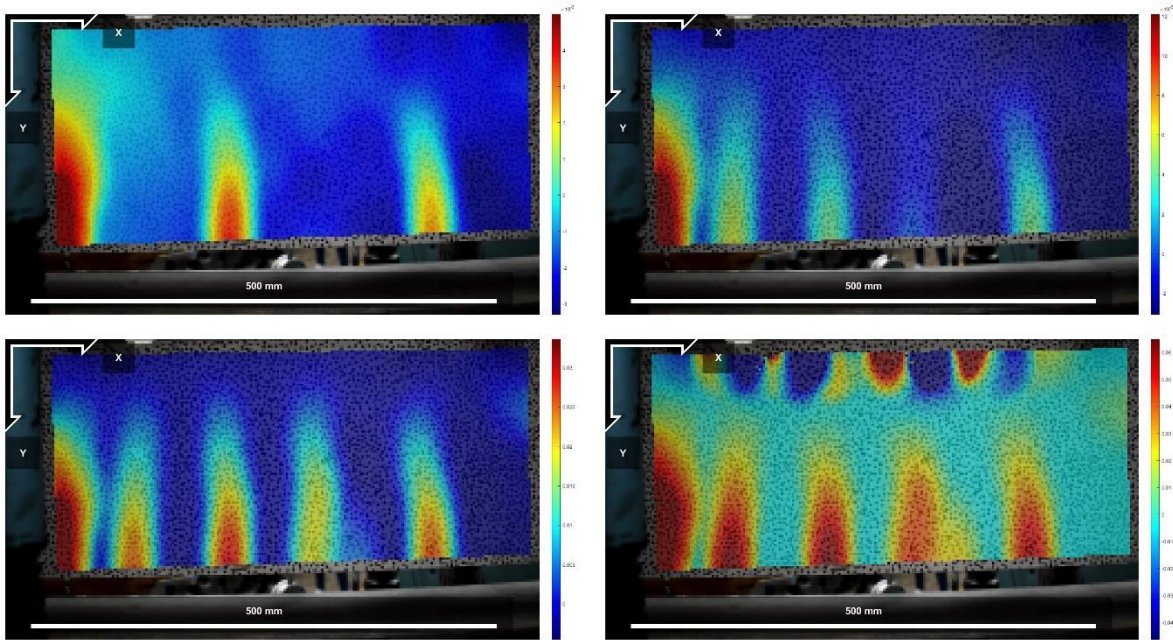


Figura 15. Evolución de los estados de daño en una viga de concreto reforzado sometida a flexión, Green Concrete Beam Competition.

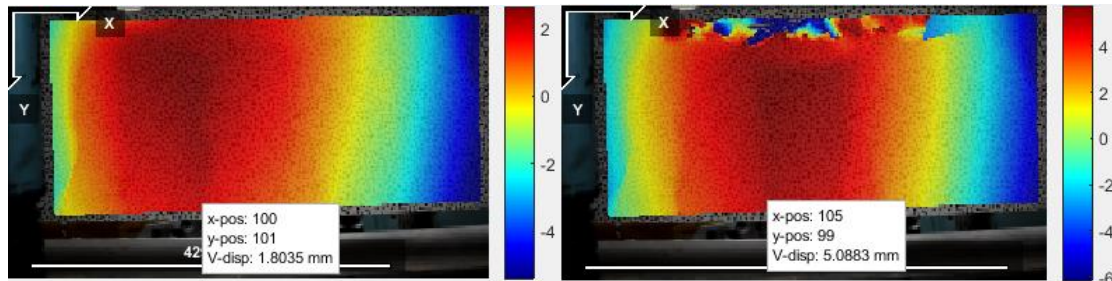


Figura 16. Deflexiones en el centro de la luz en una viga de concreto reforzado en el instante de máxima resistencia y al momento en que se presenta la falla por flexión.

5. MONTAJE DE DIC MEJORADO.

5.1. Mejoramiento del sistema de soporte de las cámaras para que sea más estable y fácil de montar.

Inicialmente, se diseñó un sistema de soporte para la configuración estéreo de cámaras. Este sistema estaba compuesto por un trípode robusto de la marca Zeikos colocado en el centro, con dos soportes adicionales en forma de paralelos, todos conectados mediante un perfil de aluminio de alrededor de 2 metros de longitud, (Figura 17). Este perfil aseguraba que el plano donde se ubicaban las cámaras mantuviera una altura, distancia con respecto a la probeta, distancia focal, entre otras, mejorando la efectividad del modelo epipolar de las cámaras y la calibración. Además, cuenta con perforaciones cada cierta distancia que permiten cambiar la posición de las cámaras según sea necesario para satisfacer diferentes ensayos y configuraciones. En dichas perforaciones se pueden colocar unos ángulos en L que permiten colocar las cámaras rotadas, dando más resolución al sentido vertical del campo de visión de las cámaras, según lo requiera el usuario. También permite colocar cámaras y dispositivos adicionales para usar en simultaneo durante los ensayos, convirtiéndose en un sistema de Multi DIC.



Figura 17. Sistema de soporte inicial para la configuración estéreo de cámaras.

Sin embargo, durante el desarrollo de múltiples ensayos, se hizo evidente que este sistema inicial presentaba una notable inestabilidad y representaba un riesgo para la integridad de las cámaras y de la correlación. Ya que existía la posibilidad de que alguien pudiera tropezar con las cámaras o moverlas con facilidad, alterando los resultados del ensayo, incluyendo la pérdida de correspondencia entre imágenes, errores significativos en la calibración y la inducción de desplazamientos ficticios similares a movimientos o rotaciones de cuerpo rígido. Por esta razón se mejoró el sistema de soporte de las cámaras sustituyendo los soportes ubicados en los extremos por un par de trípodes compactos, y se agregaron dos conos grandes de advertencia para disuadir a las personas de acercarse al sistema DIC durante la realización del ensayo. Esto garantiza que no se produzca ningún movimiento relativo de las cámaras durante el desarrollo del ensayo, ya que le da suficiente rigidez al montaje como para que sea estable, (Figura 18).



Figura 18. Sistema de soporte definitivo para la configuración estéreo de cámaras.

5.2. Implementación un sistema de iluminación que permita variar la orientación de los reflectores y cambiar la intensidad de luz durante el desarrollo de los ensayos.

Para el primer ensayo desarrollado utilizando el sistema DIC, aplicado a la medición de campos de desplazamiento y patrones de agrietamiento en muros de concreto reforzado, la iluminación dependía en gran medida de los flashes incorporados de las cámaras, esto traía consigo problemas de batería, ya que el uso prolongado de flashes descargaba las cámaras rápidamente sin alcanzarse a tomar de forma continua las 600 a 800 fotos necesarias para registrar un ensayo de este tipo. Y, por otro lado, genera problemas de desincronización entre las capturas, generando así diferencias notables de entre 15 a 20 milésimas de segundo entre imágenes de un par y capturas faltantes. Esto debido a que el flash funciona cargando gradualmente un condensador hasta un nivel que permita producir una ráfaga de luz intensa, y descargándolo súbitamente, requiriendo un tiempo específico para recargarse antes de poder disparar nuevamente. La desincronización entre capturas trae consigo errores en la correlación de imágenes, ya que, si las imágenes de un par en un instante determinado presentan desfase, se estaría capturando el estado de la probeta y/o el patrón de calibración para diferentes condiciones de desplazamiento y con diferentes condiciones de iluminación, traducido en errores durante el procesamiento y, por tanto, valores y desplazamientos erróneos, (Figura 19).



Figura 19. Desfase entre capturas para el ensayo del muro M2T, cámara 0 y cámara 1.

Por consiguiente, surge la necesidad de implementar un sistema que mejore las condiciones de iluminación. Para lo que, se adaptaron un par de reflectores de luz blanca led de 50W, capaces de iluminar de forma constante el desarrollo del ensayo. Estos reflectores van sujetos a las barandas de protección y conectados a una regleta que se puede apagar y prender de forma manual según sea necesario, (Figura 20).



Figura 20. Sistema de iluminación compuesto por dos reflectores de 50W, configuración #1.

Durante la fase de calibración, es necesario disminuir la intensidad de luz de los reflectores para evitar el exceso de brillo que genere reflejo en los patrones de calibración y, por tanto, errores de calibración. Solía suceder, que la intensidad de la luz de los reflectores era tan alta que parte del patrón de calibración reflejaba la luz y al momento de hacer el procesamiento era necesario descartar cerca del 60% de las imágenes de calibración. Es por ello que, para el ensayo de los muros, era necesario capturar alrededor de 300 pares de imágenes, descartando al menos 150 de ellos. Para solucionar este problema durante la fase de calibración, se instaló un sistema de luces led de 6 metros de largo adheridas al marco de pruebas para homologaciones y conectadas mediante un adaptador de corriente a la energía. Esto permitió disminuir la intensidad de los reflectores durante la fase de calibración, manteniendo unas condiciones ideales de iluminación, (Figura 21).



Figura 21. Sistema de iluminación definitivo, compuesto por los reflectores y luces led distribuidas en el marco de pruebas, configuración #2.

En cuanto a la iluminación para ensayos donde el sistema DIC está configurado mucho más cerca de la probeta, se instaló al montaje de soporte un sistema de luces led que permite iluminar de forma constante la probeta, (Figura 22), sin generar reflejos importantes durante la

etapa de calibración.



Figura 22. Sistema de iluminación para ensayos cercanos, configuración #3.

5.3. Implementación de un sistema de protección de cámaras contra posibles explosiones de probetas que puedan afectar la integridad de estas durante el desarrollo de ensayos de compresión.

Para ensayos en los cuales las cámaras deban colocarse muy cerca a la probeta, y en el que está presente un mecanismo de falla frágil, como el ensayo de compresión simple del concreto, es necesario proteger la cámara contra posibles explosiones del material que puedan impactar el lente y/o algún componente de la cámara afectando su integridad. Por ello, se adaptó un sistema de protección que no altera las condiciones ópticas de las cámaras y es resistente al impacto. Dicho sistema, está compuesto por dos láminas de acrílico para cada cámara, que van ajustadas en configuración de sándwich, es decir, una lámina va colocada directamente contra el lente, la otra lamina va en el extremo opuesto apoyada sobre los bordes de la cámara, y van unidas mediante 4 tornillos largos que permiten asegurar el montaje de protección, (Figura 23). La lámina que va sobre la pantalla tiene recortes en la zona de botones y en la pantalla táctil, permitiendo que se pueda manipular incluso con la protección en su lugar.



Figura 23. Configuración del sistema DIC contra explosiones de probetas.

5.4. Implementación de mejoras en el cableado, código de adquisición y circuito del sistema DIC.

5.4.1. Cableado

Debido a la necesidad de llevar a cabo ensayos fuera del Marco de Pruebas para Homologaciones, se adaptó un cable lo suficientemente largo para llevar a cabo la adquisición

de datos y el control del sistema DIC desde el laboratorio MAPH hacia la máquina universal y el patio de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, donde se llevan a cabo múltiples ensayos en materiales y elementos estructurales.

5.4.2. Código de adquisición y circuito

El código de adquisición y control del sistema DIC ha experimentado modificaciones desde el inicio de los ensayos en muros de concreto reforzado en el año 2019. En su etapa inicial, se presentaban numerosos problemas en el código, los cuales ocasionaban desfases y una constante desincronización en las capturas de las cámaras. Los desfases oscilaban en un rango de entre 10 y 20 milisegundos, generando errores en la correlación debido a que ambas capturas no se realizaban de forma simultánea y presentaban un desplazamiento relativo entre las imágenes de un par. Adicionalmente, se presentaba un problema recurrente en el que, en varias ocasiones, las señales se perdían, lo que provocaba que una de las cámaras dejara de capturar la imagen. Como resultado, al concluir el ensayo, se disponía de pares de imágenes incompletos, lo que complicaba el proceso de procesamiento de datos y suponía una pérdida de información importante. La combinación de estos desfases y el uso inicial de los flashes integrados en las cámaras generaba cambios significativos en las condiciones de iluminación. Esto resultaba en situaciones en las que, en un instante dado, la mitad de la superficie del elemento quedaba iluminada mientras que la otra mitad permanecía oscurecida.

La mayoría de los problemas se experimentaron durante la primera implementación del sistema de DIC en 3D en una prueba realizada en el muro M2T10. Al concluir el ensayo, se disponía de 580 imágenes capturadas con la cámara izquierda y 581 imágenes con la cámara derecha. En la versión inicial del código, no se registraba un vector de disparos que permitiera identificar las imágenes faltantes ni el tiempo exacto en que se habían tomado las capturas. Esto implicaba un proceso de preprocesamiento largo y laborioso en el que se debía construir manualmente el vector de tiempo y ajustar los pares de imágenes para que coincidieran en términos temporales. Para abordar estas dificultades, se realizaron una serie de ajustes en el código y el sistema de adquisición, que se enumeran a continuación:

- Se añadió un canal adicional para enviar las señales de captura de imágenes de forma independiente para cada cámara; las señales se chequearon utilizando un osciloscopio, (Figura 24), evidenciando de que, si bien la señal digital de captura no presentaba ningún problema y se enviaba de forma correcta, la duración de los pulsos entre flancos de bajada de 5 a 0 voltios (traducido en el tiempo que la persona deja sostenido el botón de captura para tomar una fotografía) era muy corta, generando ausencia de algunas capturas durante el desarrollo del ensayo. Por ello, se ajustó la duración de los pulsos a 1 segundo y constante para todo el ensayo, eliminando el problema totalmente.

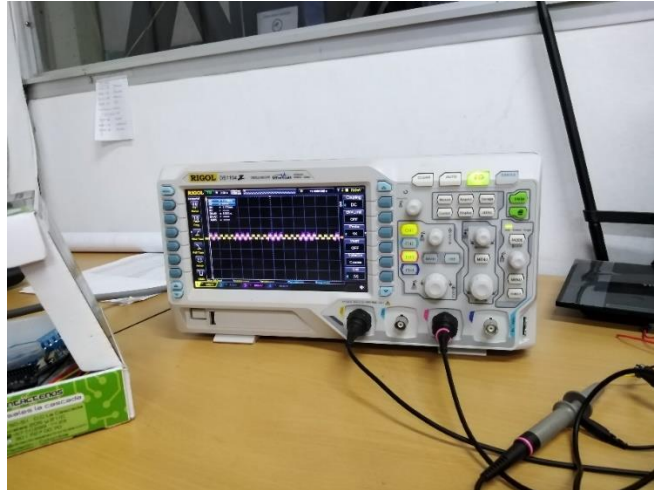


Figura 24. Pruebas con osciloscopio sobre las señales digitales de captura de imágenes.

- Se incluyó una tarjeta electrónica en el extremo del cable para filtrar las señales digitales de cualquier ruido generado; esta solución luego se desechó ya que incrementaba los desfases y la desincronización entre cámaras.

En un primer momento, las señales de disparo estaban vinculadas a un vector de tiempo establecido para cada fase (con fotografías capturadas cada 10, 20 o 30 segundos, dependiendo de la fase en curso). En teoría, este vector de tiempo estaba sincronizado con la señal de control. Sin embargo, la acumulación de pequeños desfases temporales provocaba que la señal de DIC no coincidiera exactamente con la señal de los sensores en los picos de desplazamiento.

- Es por ello que se modificó, junto al ingeniero Miller Andreus Ocampo, la forma en la que se enviaban las señales de disparo, sincronizando las capturas con la señal de referencia de desplazamiento en tiempo real, haciendo que el desfase en tiempo de los picos del protocolo de desplazamiento entre DIC y los sensores sea cero.
- Se incluyó dentro del código un vector que almacena los tiempos y los disparos de las cámaras, lo que permite construir el vector de tiempo de forma automática, eliminando las fotos que no correspondan y estén fuera del protocolo, (Figura 25).
- Se incluyó dentro del sistema un cronómetro que se debe ubicar en una región visible del campo de visión de las cámaras sin interferir en la región de interés del elemento a analizar; este sirve como soporte para solucionar algún problema o inconsistencia en el procesamiento y postprocesamiento, ya que permite identificar los tiempos de captura de cada imagen para cada cámara y posibles errores de captura.

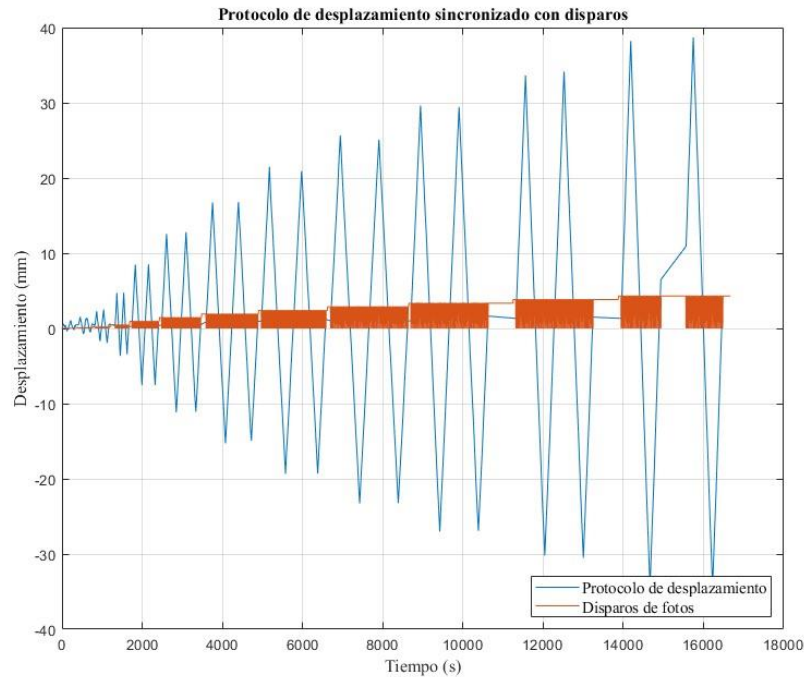


Figura 25. Protocolo de desplazamiento de un ensayo en muros de concreto reforzado sincronizado con los disparos de las cámaras.

5.5. Prototipo para ensayos en muros de concreto reforzado (https://correounivalle.edu.co/my.sharepoint.com/:f:/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/EjO-92bQxXZOqbZm5DsmAB8Bj2Cphl0UsKgjnVQAiqq81Q?e=HjneK3)

Se obtuvo un prototipo mejorado para medición de campos de desplazamientos en 3D usando cámaras convencionales DSLR. La configuración mostrada corresponde con la utilizada para ensayos cuasi estáticos en muros de concreto reforzado bajo carga cíclica, (Figura 26).



Figura 26. Sistema estéreo de bajo costo para correlación digital de imágenes en 3D, configuración para ensayos en muros de concreto reforzado.

5.6. Prototipo para ensayos de compresión en cilindros de concreto
(https://correounivalleeduco-my.sharepoint.com/:f/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/EscitZY7midKj4Lg-m6SDjEBxdRPWYdCFs5cbj7CE-dojg?e=GRB5a1)

Se obtuvo un prototipo mejorado para medición de campos de desplazamientos en 3d usando cámaras convencionales DSLR. La configuración mostrada corresponde con la utilizada en ensayos de compresión en cilindros de concreto, (Figura 27). Las cámaras tienen adaptado el sistema de protección contra impactos. Actualmente, se llevan a cabo investigaciones enfocadas en este tipo de ensayos para medir deformación unitaria utilizando la técnica de correlación digital de imágenes.

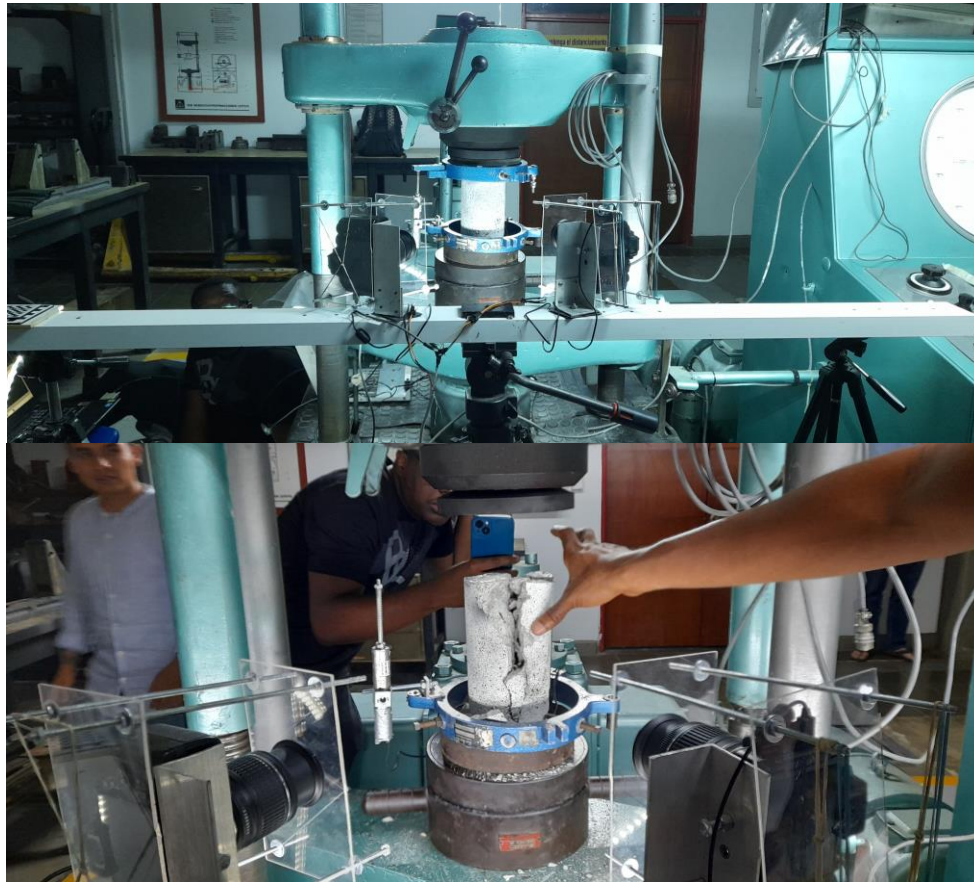


Figura 27. Sistema estéreo de bajo costo para correlación digital de imágenes en 3D; configuración para ensayos en cilindros de concreto.

5.7. Prototipo para ensayos de tracción en platinas de acero con correlación digital de imágenes en 2D
(https://correounivalleeduco-my.sharepoint.com/:f/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/Ekoosu9k3htCgpEQTn9uBBIBw1kfsMAU278_m93lcVLgrA?e=1K9IIE).

Se obtuvo un prototipo para medición de campos de desplazamientos en 2d usando una cámara convencional DSLR. La configuración mostrada corresponde con la utilizada para ensayos de tracción en platinas, (Figura 28).

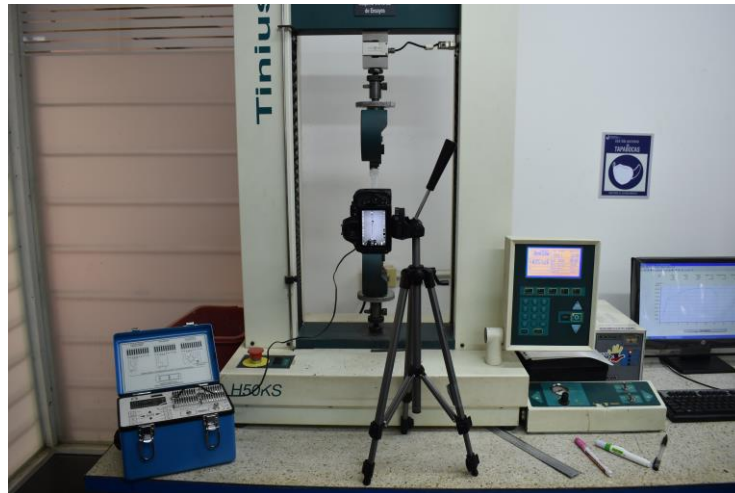


Figura 28. Sistema DIC de bajo costo para correlación digital de imágenes en 2D; configuración para ensayos de tracción en platinas de acero.

5.8. Prototipo para ensayos de flexión en vigas de concreto reforzado con correlación digital de imágenes en 2D.

Se obtuvo un prototipo para medición de campos de desplazamientos en 2d usando una cámara convencional DSLR. La configuración mostrada corresponde con la utilizada en el concurso internacional del ACI Green Concrete Beam Competition 2022 para flexión en vigas de concreto reforzado, (Figura 29).



Figura 29. Sistema DIC de bajo costo para correlación digital de imágenes en 2D; configuración para ensayos de flexión en vigas de concreto reforzado.

5.9. Presupuesto del sistema estéreo de correlación digital de imágenes.

El hardware correspondiente al sistema estéreo de correlación digital de imágenes desarrollado en este trabajo de grado se basa en los precios de mercado vigentes en el año 2023.

Tabla 1. Presupuesto sistema estéreo DIC a costo 2023.

Sistema estéreo de correlación digital de imágenes			
Equipo	Cantidad	Precio	Total
Cámaras Nikon D5600	2	\$850	\$1700
Reflectores	2	\$25	\$50
Trípode compacto	1	\$250	\$250
Trípode estándar	2	\$50	\$200
Cableado	1	\$50	\$100
CPU Procesamiento	1	\$1500	\$1500
Sistema de adquisición	1	\$250	\$250
Patrones de calibración	1	\$100	\$100
Total		USD 4150	

El precio mencionado es aproximadamente una décima parte del costo de un sistema de correlación digital de imágenes comercial, que se sitúa en torno a los 45,000 dólares, según una cotización proporcionada por las empresas Lynz US y Correlated Solutions.

6. CÓDIGO DE CORRELACIÓN DE IMÁGENES VALIDADO

En este paso se llevó a cabo la validación del código de procesamiento de imágenes procesando múltiples imágenes de ensayos en muros estructurales de concreto reforzado, y de ensayos realizados sobre probetas de acero sometidas a tensión. Se compararon los resultados obtenidos del post procesamiento con la información obtenida con la licencia educativa del software comercial de Correlated Solutions (VIC 3D-9), y con la información obtenida a partir de los sistemas de instrumentación utilizados.

6.1. Procesamiento de imágenes de muros estructurales de concreto reforzado sometidos a ensayos cuasi estáticos de carga cíclica, validando los resultados obtenidos con los sistemas de instrumentación convencionales y software comercial.

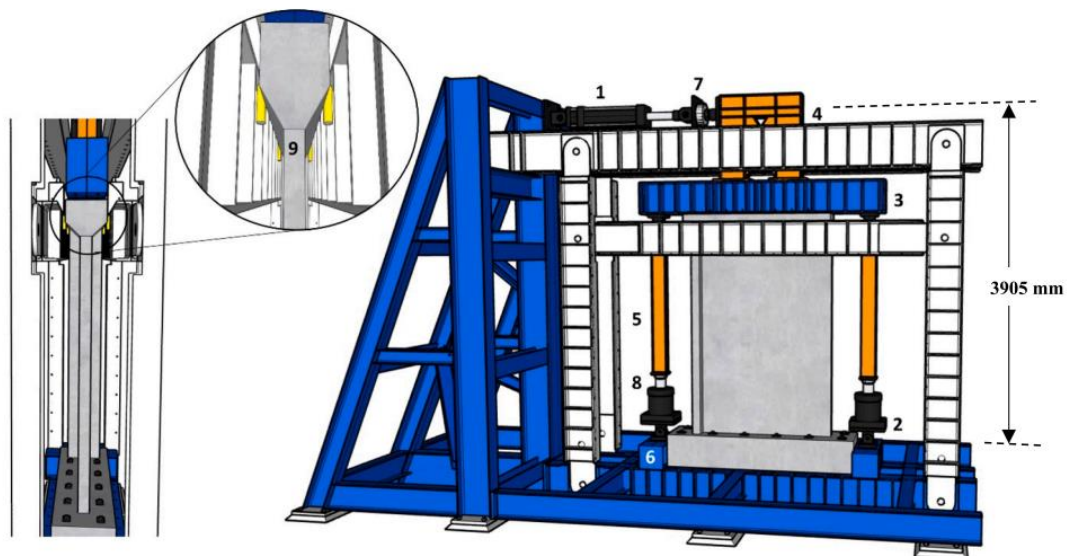
El ensayo cuasi estático de muros estructurales de concreto reforzado sometidos a carga cíclica se llevó a cabo en el laboratorio Marco de Pruebas Para Homologaciones, de la Escuela de Ingeniería de Civil y Geomática, Grupo de investigación G7 de la Universidad del Valle. Para el monitoreo del comportamiento mecánico del material, se utilizaron múltiples sensores distribuidos por todo el elemento, strain gauges, y se implementó el sistema de correlación digital de imágenes en 3D.

6.1.1. Montaje experimental

Los ensayos cuasi estáticos sobre muros de concreto reforzado fueron llevados a cabo en la Universidad del Valle, laboratorio Marco de Pruebas para Homologaciones, de la Escuela de Ingeniería de Civil y Geomática, Grupo de investigación G7. Para estos ensayos, el elemento estructural se somete a carga axial constante y un protocolo de desplazamientos especificado.

El protocolo de desplazamientos de las pruebas fue definido mediante simulaciones numéricas de la respuesta esperada de los muros [39,40] para capturar adecuadamente el comportamiento en el rango elástico y el progreso del daño hasta el fallo. Para cada nivel de deriva, los muros se sometieron a dos ciclos de desplazamiento. Las derivas definidas para el protocolo fueron 0,025% (0,6 mm), 0,05%, 0,1%, 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8%, 1,0% (24 mm), 1,2%, 1,4%, 1,6%, 1,8%, 2,0% (48 mm), 2,25%, 2,5% y así sucesivamente hasta el fallo. La velocidad de ejecución de la prueba se controló para evitar efectos dinámicos, permitir la revisión del funcionamiento del sistema hidráulico y registrar los daños en los muros [38].

El marco de pruebas está compuesto por una viga HEA400 con atiesadores, conectada a la viga superior del muro mediante 14 barras roscadas B7 de 7/8", que se encuentran embebidos en la viga superior del muro. En la parte superior de la viga HEA400 se conecta un marco metálico rígido, que cumple la función de transmitir la fuerza lateral del actuador hidráulico. A cada extremo de la viga HEA400 se conecta un tensor, compuesto por: dos rótulas, una en cada extremo, una viga IPE180, una celda de carga de 250 kN y un actuador hidráulico de 1000 kN de ± 50 mm de recorrido de vástago. Los dos tensores se utilizan para aplicar la carga axial al muro. Las mangueras de los actuadores hidráulicos, de los dos tensores, se encontraban conectadas entre ellas, para garantizar la misma presión en ambos actuadores y así evitar la aplicación de carga axial asimétrica. Para el anclaje de la cimentación de los muros M2T a M6T se amplió el diámetro de los pernos de anclaje a 1" y se aumentó la cantidad a 12, 6 a cada lado. Los dos pórticos articulados, utilizados en el primer montaje experimental, se desconectaron del actuador hidráulico de fuerza lateral y se restringió su movimiento, de esta manera, su única función fue impedir el desplazamiento fuera del plano de la viga superior del muro [38].



1. Lateral load actuator, 2. Vertical load actuators, 3. Transfer beam, 4. Rigid metal frame, 5. Tensioners system, 6. Side supports, 7. Lateral load cell, 8. Vertical load cells, and 9. Side rollers.

Figura 30. Montaje experimental utilizado para ensayos de muros de concreto reforzado [38].

6.1.2. Instrumentación

Los ensayos mecánicos en elementos estructurales, no estructurales y probetas de materiales requieren una gran cantidad de sensores (LVDT's, deformímetros, strain gauges, entre otros) para obtener una descripción completa de su comportamiento mecánico, (Figura 1). Ellos requieren múltiples sistemas de adquisición (tarjetas de adquisición y de acondicionamiento), grandes longitudes de cableado, personal altamente calificado, y calibración de los sensores. Esto genera un alto costo y consume un tiempo considerable en los proyectos de investigación. Además, al tener contacto directo con el elemento pueden dañarse durante el desarrollo del ensayo, y es más dispendioso hacer perforaciones y colocar elementos de apoyo externos y otros adheridos al muro. Estas perforaciones también pueden afectar las propiedades mecánicas de los elementos a ensayar y por ende afectar los resultados experimentales.

Los detalles de la instrumentación típica de un muro se muestran en la (Figura 31a). En cada ensayo se utilizaron tres celdas de carga para registrar las cargas laterales y axiales. Se utilizaron 35 sensores, del tipo transductores diferenciales de variación lineal (LVDT), potenciómetros y potenciómetros de cuerda, para medir los desplazamientos laterales, las deformaciones axiales, las deformaciones por cizallamiento, los desplazamientos fuera del plano y los posibles desplazamientos o rotaciones de los cimientos de los muros. Durante la construcción de los muros, se instalaron diez galgas extensométricas a nivel de la interfaz y a una altura de 300 mm para medir las deformaciones axiales en las barras de la armadura longitudinal en los extremos de los muros y en los alambres del alma (Fig. 31b). Además, se pegaron galgas extensométricas a la superficie del hormigón en las caras laterales (este y oeste) y en los extremos de la cara norte, a 30 mm del nivel de la interfaz y a 300 mm de altura [38].

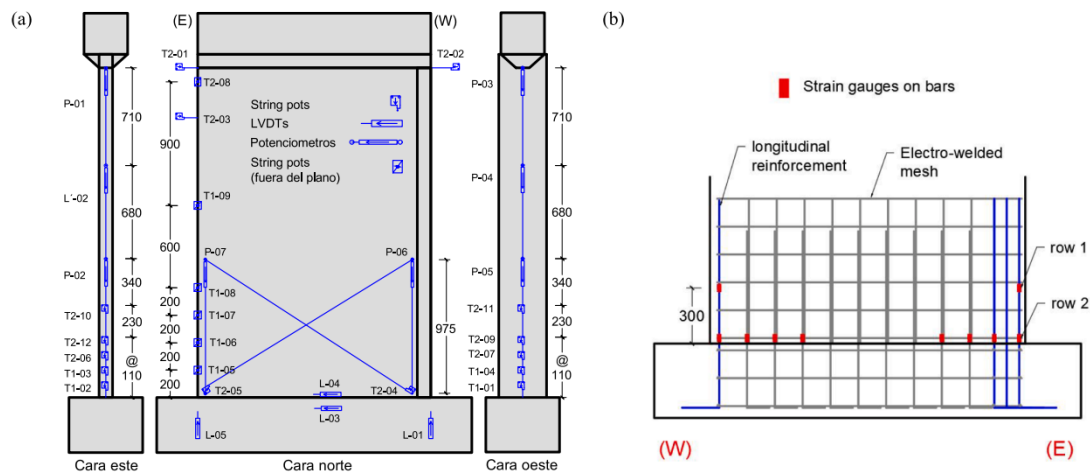


Figura 31. (a) Instrumentación de un muro de pruebas en la cara norte y caras laterales, y (b) localización de galgas internas del acero.

Para la medición de los campos de desplazamiento tridimensionales y la evaluación de la evolución de los estados de daño de la probeta, se utilizó la técnica de correlación digital de imágenes (DIC), implementando el sistema estéreo de bajo costo desarrollado en este trabajo de grado, (Figura 32). Para ello, se aplicó un patrón de aleatorio de puntos en la superficie de la probeta y, se sincronizó el protocolo de captura de imágenes con el protocolo de desplazamientos de la prueba para tomar fotos sincronizadas con los ceros y los picos de desplazamiento de cada ciclo. En las fases iniciales se capturan alrededor de 32 pares de

imágenes, luego 48 pares en las fases intermedias y en las más largas alrededor de 64 pares imágenes.



Figura 32. Implementación del sistema estéreo DIC en una prueba cíclica en muros de concreto reforzado.

6.1.3. Desarrollo del ensayo en muros de concreto reforzado.

Para llevar a cabo el desarrollo del ensayo en muros de concreto reforzado se siguió la metodología propuesta en “**Ajuste de los parámetros intrínsecos de las cámaras para el desarrollo de un ensayo de correlación digital de imágenes en 3D**”, “**Calibración Estéreo de Cámaras**” y en el manual audiovisual para el desarrollo de ensayos en muros de concreto reforzado y tracción en probetas de acero. Este manual es una compilación de videos en donde se explica cómo desarrollar un ensayo cuasi estático sobre muros de concreto reforzado (https://correounivalleeducomy.sharepoint.com/:f:/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/EjO-92bQxXZOqbZm5DsmAB8Bj2Cphl0UsKgjnVQAiqq81Q?e=BhHWrM).

6.1.4. Validación del sistema de correlación digital de imágenes de bajo costo utilizando la licencia educativa del software comercial de Correlated Solutions (VIC 3D-9)

A la fecha, se han venido desarrollando una serie de ensayos de carga cíclica sobre muros delgados de concreto reforzado (muro M2T10, M2T10RR, M3R10, M4I10, M5T10, M6T10, M5T10R) con la finalidad de caracterizar y analizar el comportamiento sísmico de este elemento estructural. Estos ensayos se ejecutaron en el marco de pruebas para homologaciones de la Escuela de Ingeniería Civil, grupo de investigación G7, empleando el método tradicional de medición de desplazamientos, compuesto por múltiples LVDT's, potenciómetros y strain gauges. Adicionalmente, y como parte del desarrollo de este trabajo se implementó un método óptico de visión artificial aplicando la técnica decorrelación digital de imágenes en 3d para obtener un campo de desplazamientos sobre toda la superficie del elemento a ensayar, empleando un hardware propio compuesto por un par de cámaras tradicionales DSLR Nikon D5600, que se usan generalmente para tomar fotografías de la cotidianidad, unido a una estructura adecuada para el soporte de las cámaras, un buen sistema de iluminación, un sistema de adquisición simple para realizar la captura automática de las imágenes, y un software comercial de la empresa Correlated Solutions (VIC 3D-9) en

su versión educativa.



Figura 33. Sistema estéreo de correlación digital de imágenes propuesto.

La aplicación en paralelo de ambos sistemas de medición ha permitido llevar a cabo una validación preliminar del sistema de DIC. Al comparar los datos obtenidos mediante el método tradicional de medición, que provee información en puntos específicos con datos extraídos del campo tridimensional de desplazamientos, obtenidos mediante el método óptico de medición, se obtuvieron resultados satisfactorios, como se muestra en las (Figuras 34,35). Al analizar el sensor T25-03, que mide desplazamiento en X se tiene que: para el muro M4I10 se tiene una diferencia promedio en los valores positivos de desplazamiento de 0.2mm y en los valores negativos de 0.6mm. Para el muro M5T10 se tiene una diferencia promedio en los valores positivos de desplazamiento de 0.4mm y en los valores negativos de 0.3mm. Para el muro M6T10 se tiene una diferencia promedio en los valores positivos de desplazamiento de 0.2mm y en los valores negativos de 0.5mm. Para el muro M5T10R se tiene una diferencia promedio en los valores positivos de desplazamiento de 0.3mm y en los valores negativos de 0.8mm.

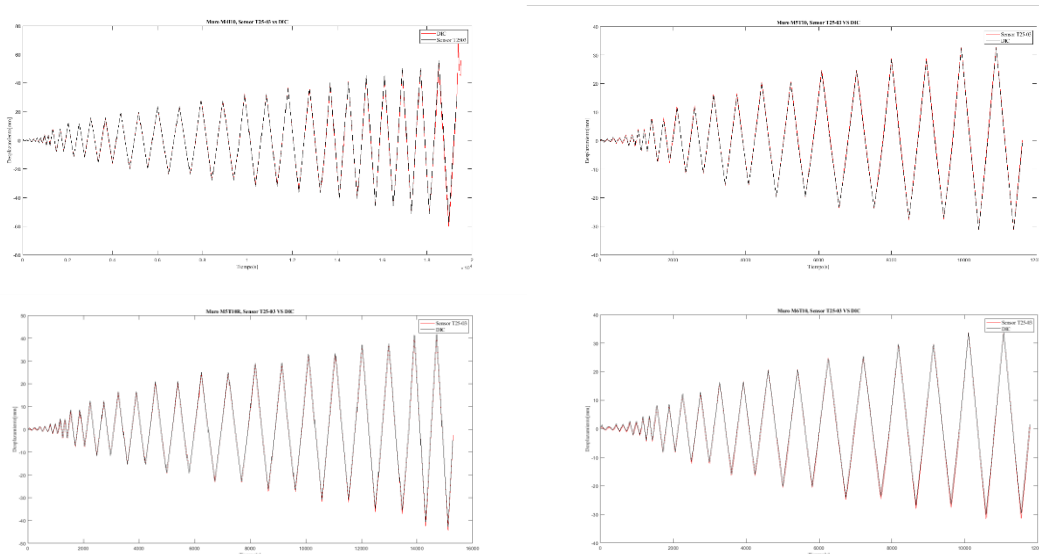


Figura 34. Comparación de resultados del sensor T25-03 VS DIC, muro M4I10, M5T10, M6T10, M5T10R.

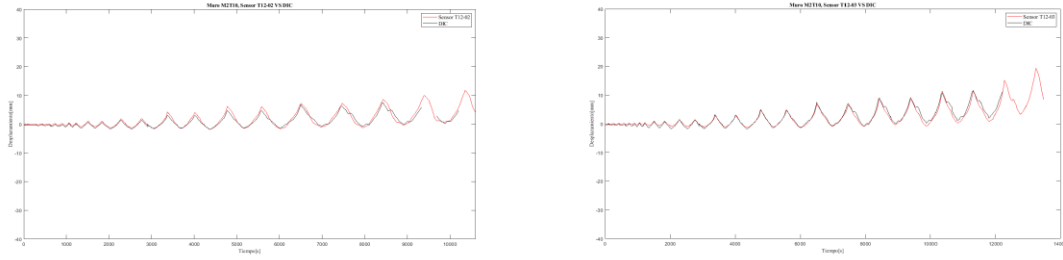


Figura 35. Comparación de resultados, sensor T12-02 y T12-03 VS DIC, muro M2T10.

Debido a que la técnica de correlación digital de imágenes no requiere contacto, es posible obtener información más allá del límite seguro de utilización de los sensores; este límite está definido cualitativamente para salvaguardar la integridad de estos, ya que están en constante contacto con el elemento y pueden destruirse. El límite de la técnica de visión artificial solo dependerá de que el patrón de puntos aleatorio no esté muy afectado a razón del daño de la probeta. Es posible ver como el sensor T12-04 deja de registrar a alrededor de los 6000 segundos de ensayo, sin embargo, el DIC provee información hasta el colapso total del elemento.

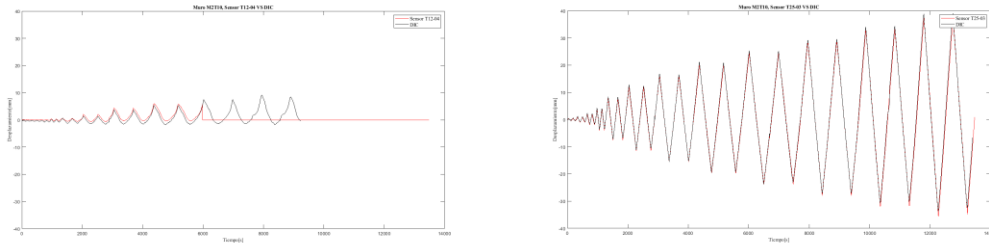


Figura 36. Comparación de resultados sensor T12-04 y T25-03 VS DIC, muro M2T10.

La aplicación de la técnica de correlación digital de imágenes en 3d ha permitido completar información faltante en la superficie de los elementos estructurales evaluados, al momento de analizar su comportamiento. Lo que genera una caracterización más precisa y discretizada del elemento. Además, permite obtener un parámetro muy llamativo e importante en la caracterización del mecanismo de falla de estos elementos, que es la visualización de la evolución de los estados de daño del elemento estructural, desde el momento en el que sale la primera grieta no visible hasta la aparición de múltiples grietas que atraviesan el elemento, viendo cómo estas se van propagando en cada ciclo de desplazamiento. A continuación, se muestra el panorama de los estados de daño de cada uno de los muros evaluados en el laboratorio (Figura 37):

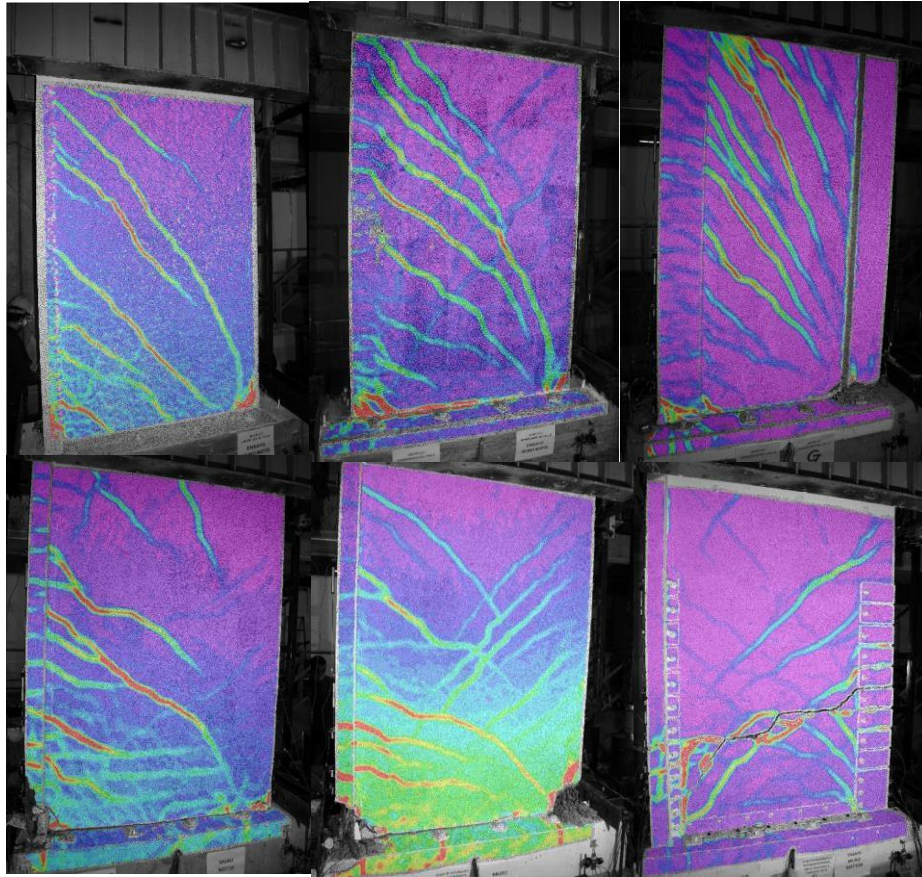


Figura 37. Estados de daño de los muros ensayados en laboratorio aplicando la técnica de 3D-DIC, muro M2T10, M2T10RR, M3R10, M4I10, M5T10, M6T10, M5T10R.

Los estados de daño de los muros se sincronizaron con su protocolo de desplazamientos y con su respectivo ciclo de histéresis para entender y analizar mejor el comportamiento de cada elemento (Figura 38).

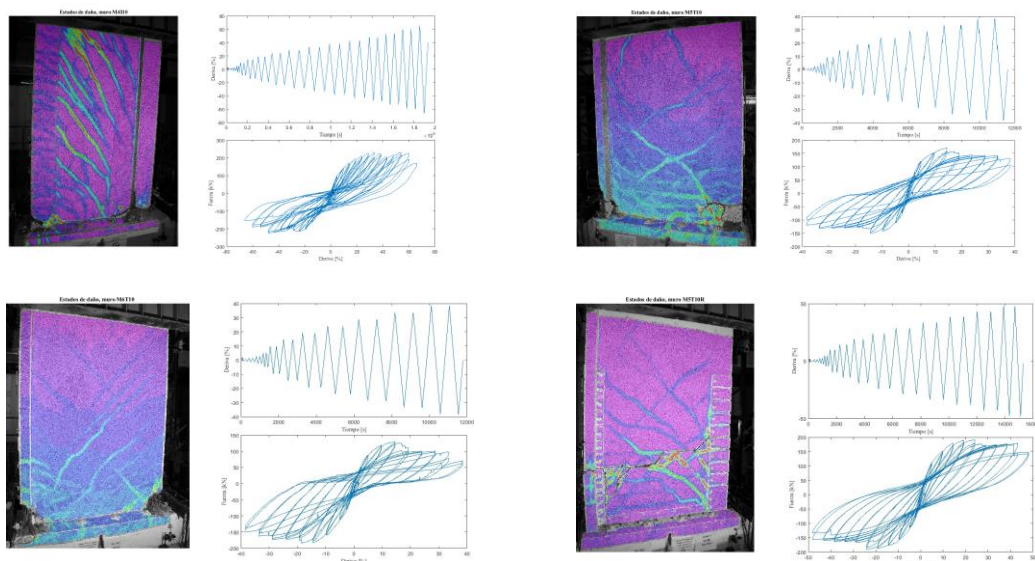


Figura 38. Evolución del daño vs deriva y ciclo de histéresis en los muros estructurales evaluados en laboratorio, muro M4I10, M5T10, M6T10, M5T10R.

Los resultados obtenidos indican que la metodología de 3D DIC es factible y puede seguir siendo aplicada para más ensayos, validando la utilización de un sistema estéreo de DIC compuesto por un hardware propio de adquisición de imágenes que incluye un montaje de cámaras DSLR Nikon D5600 e iluminación y un software libre de procesamiento.

6.1.5. Validación del sistema de correlación digital de imágenes de bajo costo utilizando el software de código abierto de Dana Solav (DuoDIC).

La metodología empleada para llevar a cabo el procesamiento digital de las imágenes de los muros de concreto se basa en el **"MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D UTILIZANDO EL SOFTWARE LIBRE DUODIC"** presentado en los anexos. Este manual proporciona una guía detallada para realizar el procesamiento digital de imágenes en 3D de muros de concreto reforzado que están sometidos a cargas cíclicas.

El sistema de correlación digital de imágenes en 3D ha sido validado de manera exitosa mediante la comparación de las mediciones obtenidas con tres fuentes diferentes: el software comercial, el software DuoDIC y el sensor T25-03 del muro M7RR. Cabe destacar que el sensor T25-03 se considera la principal referencia para cualquier ensayo relacionado con muros de concreto. La comparación se realizó para las fases 7,8 y 9 del muro M7RR, debido a la alta demanda computacional del software libre. El análisis de los desplazamientos obtenidos tanto a través del sensor como mediante la técnica óptica, procesadas con diferentes softwares ha arrojado resultados satisfactorios. Los desplazamientos obtenidos con el software libre son muy similares con respecto al sensor de referencia con diferencias de alrededor de 0.25mm en el sentido positivo, y de 1mm en el sentido negativo. En lo que respecta a las diferencias en los desplazamientos obtenidos entre el software de pago y el software libre, se sitúa por debajo del 5%. Esto se debe a que ambos procesamientos utilizan coeficientes y patrones de calibración diferentes. A continuación, se presenta la comparación respectiva:

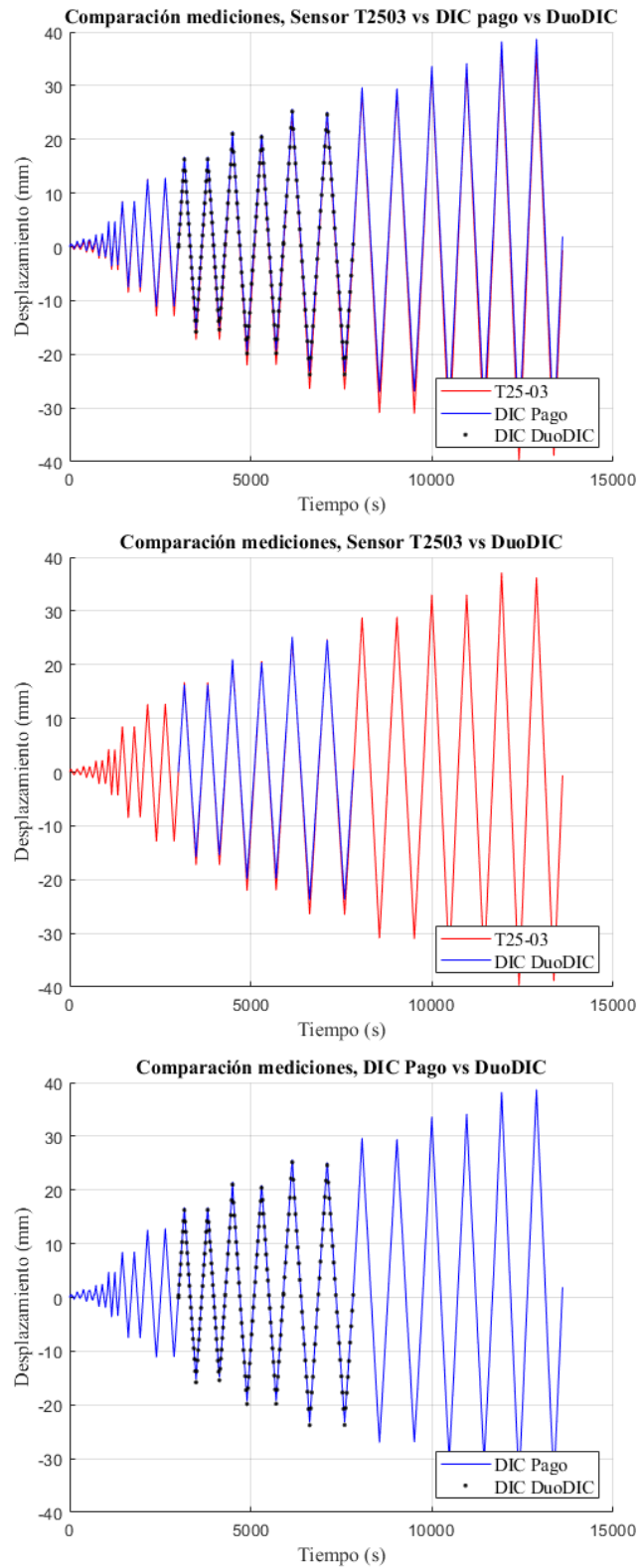
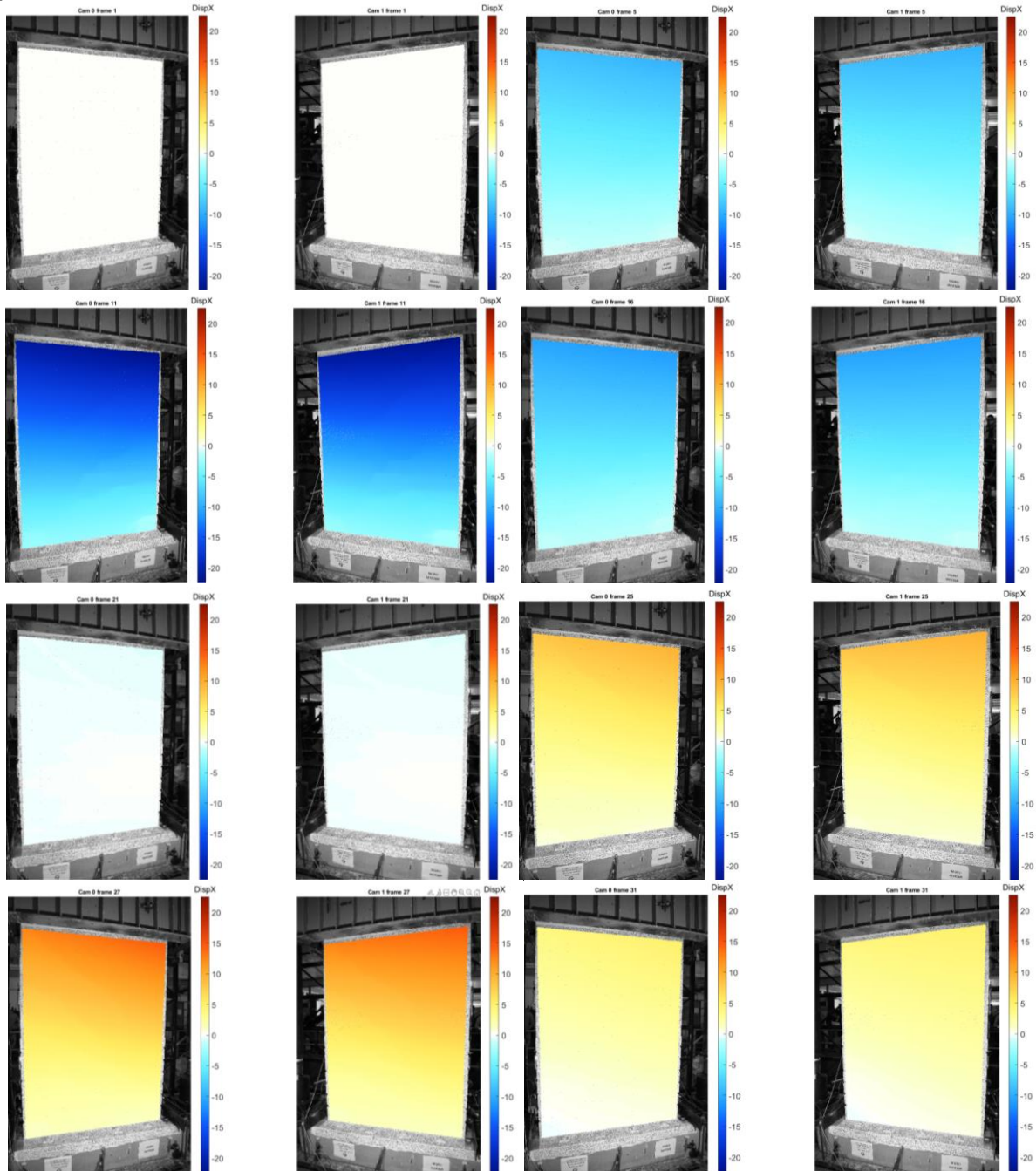


Figura 39. Comparación de mediciones obtenidos con el sensor T25-03 vs DIC.

A continuación, se muestran los campos de desplazamiento en el eje X correspondientes a una fase del muro M7RR. A través de una escala de colores, es posible visualizar cómo varía el campo de desplazamientos en toda la superficie para distintos estados de la probeta. En azul se encuentran los desplazamientos negativos hacia la izquierda (Oeste) y en Naranja se encuentran los desplazamientos positivos hacia la derecha (Este).



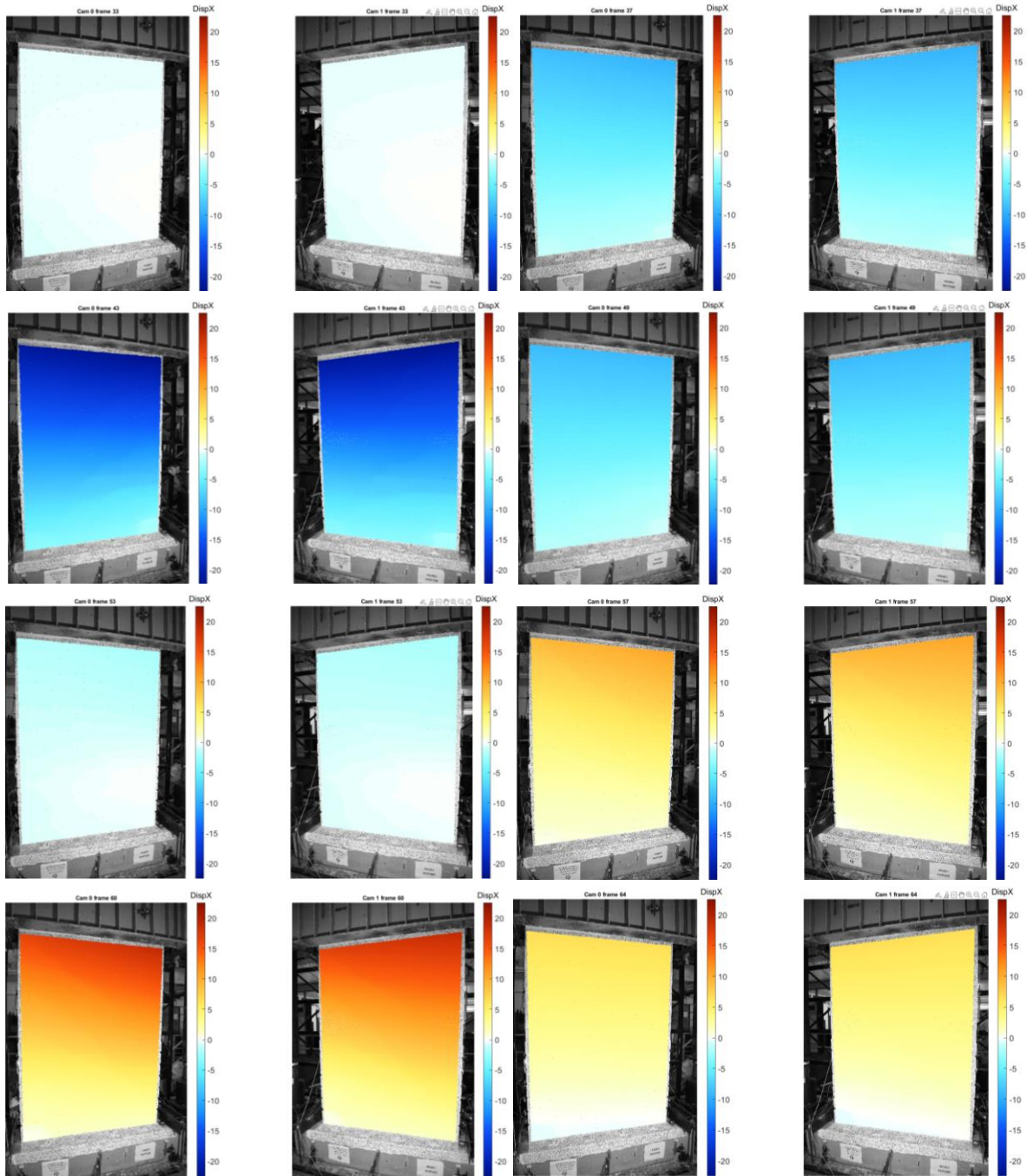


Figura 40. Campo de desplazamientos en X para diferentes estados del muro M7RR.

Los resultados obtenidos validan la implementación del sistema estéreo de DIC de bajo costo desarrollado en este trabajo de grado, el cual está compuesto por hardware propio de adquisición de imágenes, que incluye un montaje de cámaras DSLR Nikon D5600 y software de procesamiento gratuito llamado DuoDIC. Este sistema puede ser aplicado en una variedad de ensayos y permite la obtención de campos de desplazamiento en los ejes X, Y y Z.

Este sistema de bajo costo ha posibilitado la obtención de un parámetro sumamente relevante en la caracterización del mecanismo de falla de estos elementos: la capacidad de visualizar la evolución de los estados de daño en la estructura. Desde el momento en que surge la primera grieta, que no es visible, hasta la aparición de múltiples grietas que atraviesan el elemento, es posible observar cómo se

propagan en cada ciclo de desplazamiento. Para mejorar tanto los resultados como la calidad de la visualización, se puede ajustar el radio de deformación (*strain radius*) durante la etapa 2 del procesamiento con DuoDIC.

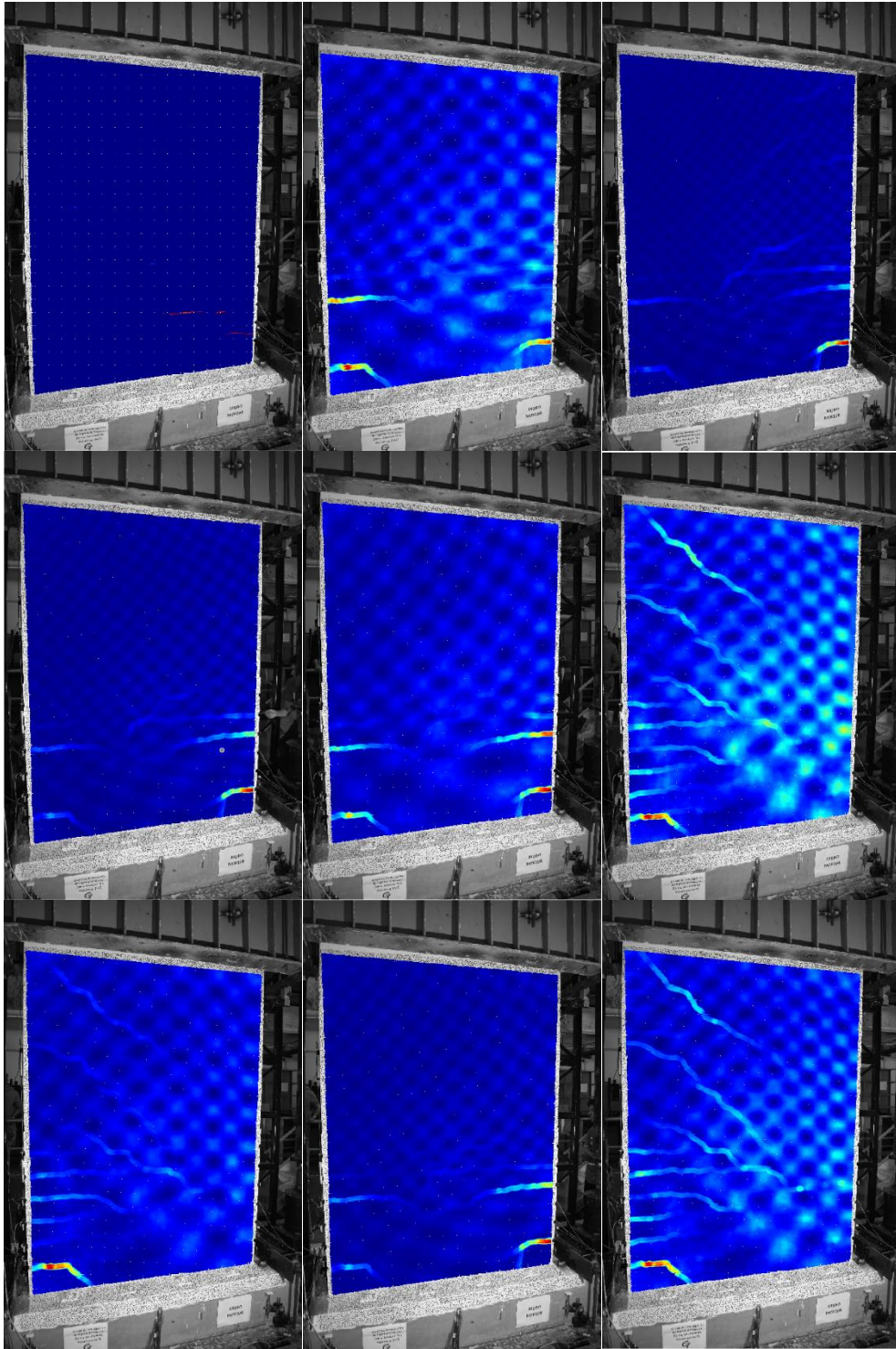


Figura 41. Estados de daño del muro M7RR.

6.2. Procesamiento de imágenes de probetas de acero sometidas a ensayos de tensión, validando los resultados obtenidos con los sistemas de instrumentación utilizados y el software comercial.

El ensayo de tracción en probetas de acero se llevó a cabo utilizando la máquina universal de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle. Para el monitoreo del comportamiento mecánico del material, se hizo uso de strain gauges, el deformímetro propio de la máquina universal y se implementó el sistema de correlación digital de imágenes en 2D, (Figura 42). Para esta última, se utilizó una cámara Nikon D5600 que se configuró en modo de grabación de video durante el desarrollo de cada uno de los ensayos hasta la falla de las probetas. Los videos capturados por la cámara cuentan con 60 cuadros por segundo, lo que le permite al usuario extraer la cantidad de cuadros por segundos necesarios, siempre y cuando no excedan dicho valor. La alta frecuencia de adquisición obtenida permite observar incluso la forma en como se produce súbitamente la falla del material.

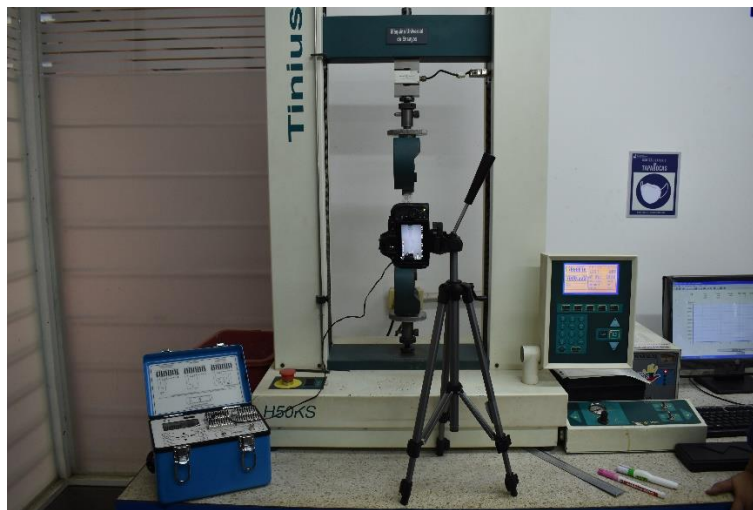


Figura 42. Sistema de correlación de imágenes en 2D en ensayos de tracción.

6.2.1. Preparación para implementación de la técnica de correlación digital de imágenes en 2d sobre probetas de acero reforzado.

Previo al desarrollo del ensayo, se llevó a cabo la preparación de la superficie de las probetas de acero mediante la aplicación de un patrón aleatorio de puntos conocido como "speckle pattern". Para lograr esto, se siguió un proceso que consistió en aplicar una capa de pintura a base de aceite seguida de otra capa de pintura a base de agua, ambas de color blanco. Esta medida se adoptó para evitar la reacción del material metálico con la humedad de la pintura, lo cual podría generar puntos y manchas de óxido en la superficie de las probetas alterando el contraste del patrón.

Una vez finalizada la aplicación y secado de la pintura de la superficie, se procedió a crear un patrón aleatorio de puntos mediante el uso de un lapicero de tinta negra en gel de secado rápido. Se tuvo especial cuidado para evitar manchar la superficie con la mano, aplicando el patrón de forma descendente. En el caso particular de este ensayo, se requería un patrón de puntos donde cada punto tuviese un diámetro relativamente pequeño, debido al tamaño de la probeta y la necesidad de obtener una alta resolución en los datos. El uso de un marcador Sharpie de punta fina no permitía alcanzar esta resolución requerida. Por lo tanto, se optó por utilizar un lapicero en gel con un grosor de trazo de 0.5 mm, lo que determinó el diámetro de los puntos en el patrón, (Figura 43). Para proteger la superficie del elemento y evitar

alteraciones en el patrón antes del ensayo, se cubrió con papel bond y se aseguró con cinta de enmascarar.



Figura 43. Platinas de acero con el patrón aleatorio de puntos en su superficie.

6.2.2. Preparación de la probeta de acero para implementación del sistema de strain gauges.

Los strain gauges, o galgas extensiométricas, son sensores utilizados en ensayos de materiales para medir deformaciones en una muestra sometida a fuerzas. Son ampliamente utilizados debido a su sensibilidad, versatilidad, rango de medición, precisión, integración con sistemas de adquisición de datos y bajo costo (alrededor de 5 USD la unidad). Estos sensores desempeñan un papel fundamental en la caracterización de materiales y en el análisis de su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga.

Para instalar las galgas en las probetas, es necesario lijar y limpiar la superficie del elemento para eliminar imperfecciones y porosidades. Esto ayuda a aumentar la adherencia entre la galga y el material. A continuación, se selecciona la ubicación de la galga, que en este caso es la mitad del elemento. Esto se debe a que la rótula plástica, o zona de concentración de deformaciones, se encuentra en ese lugar, lo cual lo convierte en el punto de mayor interés para el análisis del comportamiento del material. La galga se adhiere a la superficie utilizando un adhesivo especializado para superficies de acero. Luego se deja secar sin aplicar ningún tipo de esfuerzo, lo que garantiza una unión sólida entre la galga y la superficie. Por último, se sueldan los terminales de la galga a un cable lo suficientemente largo como para llevar a cabo el ensayo mientras está conectado a un sistema de adquisición; se debe tener sumo cuidado con sobrecalentar la galga durante el proceso. Es importante tener en cuenta que las conexiones de las galgas son extremadamente frágiles y pueden desprenderse con facilidad, por lo que son protegidas utilizando cinta aislante, (Figura 44). Por lo tanto, se deben manipular con sumo cuidado y no jalarlos muy fuerte. Antes de realizar el ensayo, es necesario medir la impedancia en el cableado de la galga para determinar si la galga sigue siendo funcional. Una galga se considerará funcional si su impedancia se encuentra alrededor de los 120 Ohmios, aproximadamente. Las galgas son un muy buen indicador para estimar el comportamiento mecánico de un material, ya que permite obtener el módulo de elasticidad y la curva esfuerzo deformación, sin embargo, las mediciones de estas son localizadas, tomando como referencia una longitud hasta 10 veces menor que la longitud total de la probeta. Por dicha razón, se ubican en el centro del material donde están concentradas las deformaciones.



Figura 44. Strain gauge instalada y cableada en la probeta de acero.

6.2.3. Preparación e implementación del ensayo de tracción en platinas.

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería de Materiales, bajo la supervisión de July Manquillo, Laboratorista. Se utilizó una máquina universal de tracción equipada con un sistema digital de adquisición de datos, capaz de registrar de forma precisa la carga aplicada vs la deformación experimentada por la probeta, graficándolos de forma simultánea en un computador. La deformación es medida mediante un deformímetro incorporado que provee mediciones muy confiables, tomando como referencia la longitud libre entre mordazas. La máquina tiene la capacidad de aplicar hasta 5 toneladas de fuerza, carga suficiente para llevar las probetas hasta la falla, (Figura 45), considerando que la carga última teórica estimada rondaba las 4 toneladas fuerza.



Figura 45. Ensayo de tracción en platinas hasta la falla.

Las probetas se colocan de manera individual en la máquina y se sujetan mediante un par de mordazas: una superior y otra inferior. Estas mordazas se aprietan girando las roscas de

sujeción correspondientes. Para evitar cualquier deslizamiento de las probetas durante la aplicación de carga, se realizan marcas iniciales con Liquid Paper cerca de las zonas de agarre de las mordazas. Estas marcas sirven como referencia para determinar si la probeta se está deslizando. En caso de que se observe deslizamiento, se deben apretar las roscas de sujeción de manera más rigurosa para evitar errores en el ensayo o caídas abruptas de carga debido al deslizamiento. La superficie que contiene el patrón de puntos se coloca estratégicamente de manera que apunte hacia el exterior de la máquina. Esto se hace con el propósito de utilizar la técnica de correlación digital de imágenes, la cual requiere una visualización clara y precisa del patrón durante el ensayo, (Figura 46).

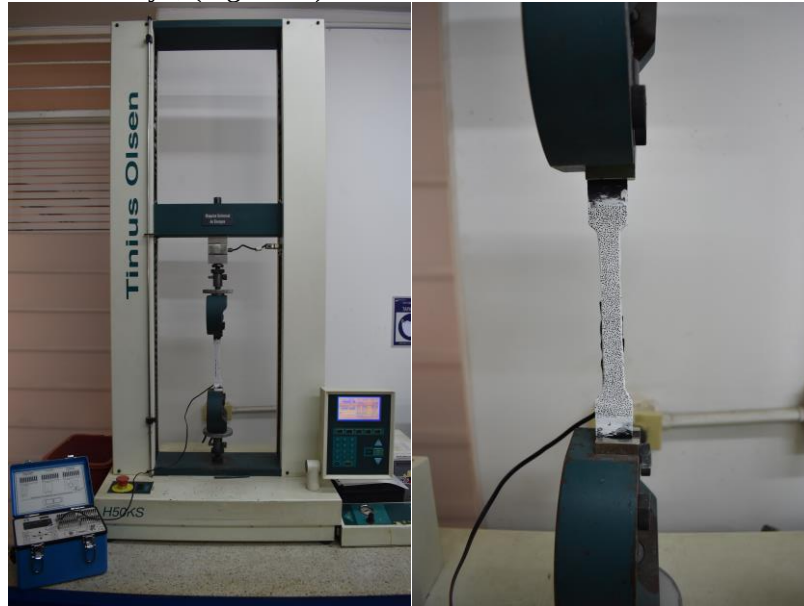


Figura 46. Configuración del ensayo de tracción en probetas de acero.

Las probetas para ensayar consistían en trozos de platina de acero estructural, con una longitud de 180 mm, un ancho promedio de 13.4 mm y un espesor promedio de 4.40 mm. Estas probetas se utilizaban como refuerzo en los muros delgados de concreto reforzado, las cuales eran parte del proyecto en el que se estaba trabajando en el grupo de investigación G7, laboratorio Marco de Pruebas Para Homologaciones.

6.2.4. Implementación del sistema de DIC 2D.

El sistema de DIC en 2D utilizado está compuesto por una cámara DSLR Nikon D5600 y un trípode convencional. La cámara se ubica lo más cerca posible de la probeta utilizando el lente de 55 mm, (Figura 47). Se opta por usar DIC en 2D ya que no existen deformaciones fuera del plano durante el ensayo y debido a que la superficie de la probeta es plana y no se inducen errores por curvatura. Los parámetros intrínsecos de la cámara deben configurarse de forma manual, dejando fijos el ISO, #F, tiempo de exposición y enfoque durante todo el ensayo. La cámara tampoco debe manipularse ni desplazarse durante el desarrollo de este. Esto evita que se generen desplazamientos ficticios y ruido al procesar las imágenes. Debido a la velocidad del ensayo, se opta por grabar video en lugar de tomar fotos a la probeta, si bien, esto disminuye la resolución de 6000x4000 píxeles a 1980x1280 píxeles, aumenta la frecuencia de adquisición de una foto cada dos segundos a 30 o 60 fps, según sea necesario. Esto último relacionado con la rapidez en la que se genera la falla del material y/o la probeta.

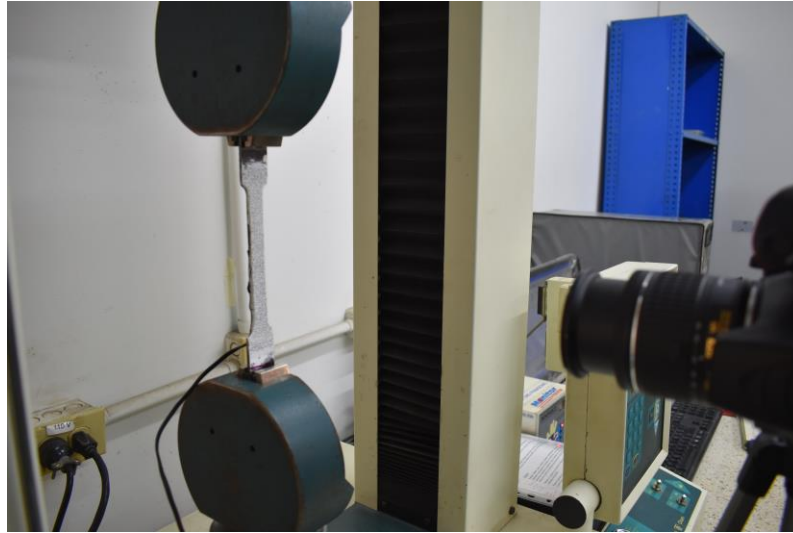


Figura 47. Configuración del ensayo de tracción en probetas de acero; posición de la cámara con respecto a la probeta.

En un trabajo reciente realizado en colaboración con el Ingeniero Juan David Benavides, la Profesora Mónica Villaquirán de la Universidad del Valle y el Ingeniero Ph.D. Jimmy Silva de la Universidad Católica de Chile, se encontró que la falla en cilindros de concreto durante los ensayos se propagaba rápidamente debido al comportamiento frágil del material. Por esta razón, se decidió utilizar la adquisición de información mediante video, con una tasa de adquisición de 60 fotogramas por segundo (fps). La falla de los cilindros de concreto sometidos a tracción indirecta y compresión ocurrió en menos de 1/60 de segundo, lo cual representó un desafío para las cámaras utilizadas, ya que el objetivo del ensayo era capturar con precisión la propagación del daño y, en particular, las grietas. Esto indica la necesidad de utilizar una cámara de alta velocidad, con una frecuencia de captura superior a los 120 fps. Hasta el momento, debido a las limitaciones en la resolución de las cámaras, no ha sido posible medir con precisión la deformación unitaria en el concreto. Este aspecto plantea un desafío en la obtención de datos cuantitativos en este tipo de ensayos.

6.2.5. *Desarrollo del ensayo de tracción en platinas.*

Para iniciar el ensayo de tracción, se verificaron los parámetros intrínsecos de las cámaras y el enfoque, los cuales deben configurarse manualmente para asegurar la nitidez en las capturas. Posteriormente, se procede a conectar las galgas a la caja de adquisición proporcionada por la Escuela de Ingeniería Mecánica, (Figura 48). La manipulación de la caja de adquisición fue dirigida por el Laboratorista de Estructuras del Grupo de Investigación G7, William Viveros. Es importante establecer la configuración adecuada en la caja de adquisición para que pueda adquirir las señales del canal donde se conecten las galgas. Además, se debe fijar una tasa de adquisición de datos, que en este caso se estableció en 60 Hz.

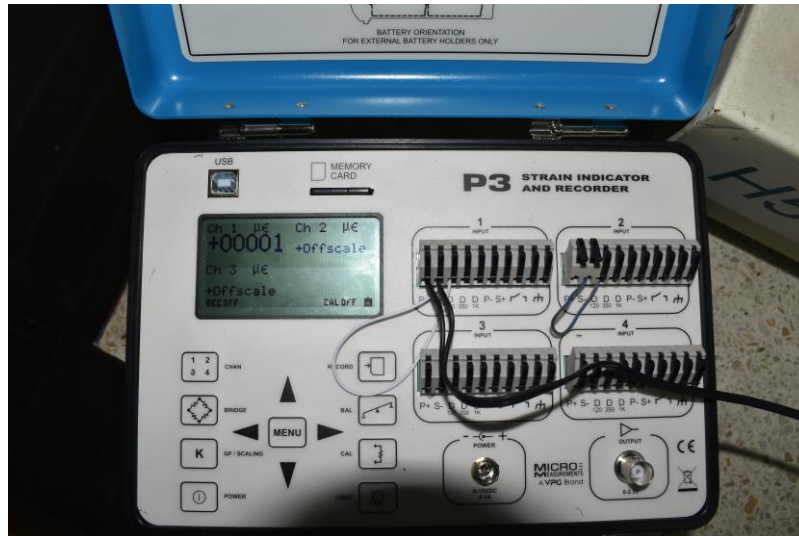


Figura 48. Caja de adquisición de strain gauges.

Una vez preparados todos los equipos, se inicia la grabación de la cámara y se comienza a aplicar la carga utilizando la máquina universal hasta que se produce la falla del material. En ese momento, la máquina detiene automáticamente la adquisición de datos, mientras que la adquisición de datos de las galgas y la cámara se detiene manualmente. Una vez preparados todos los equipos, se inicia la grabación de la cámara y se comienza a aplicar la carga utilizando la máquina universal hasta que se produce la falla del material. En ese momento, la máquina detiene automáticamente la adquisición de datos, mientras que la adquisición de datos de las galgas y la cámara debe detenerse manualmente.

Los datos de las galgas son adquiridos como cambios de impedancia que se traducen en deformaciones mediante una constante propia de las galgas. Esta constante, viene descrita en el paquete y manual de Tokyo Measurements Lab (TML), una empresa japonesa de sensores de medición.

Las galgas empleadas en el ensayo experimentaron problemas de adherencia con la superficie del material, lo que ocasionó que dejaran de registrar datos y sus mediciones no fueran representativas. Es por ello que no se presentan resultados de deformación con strain gauges.

6.2.6. Procesamiento digital de imágenes en 2D usando el software NCORR.

El procesamiento de las imágenes en 2D se llevó a cabo utilizando el software libre NCORR, desarrollado por Justin Blaber y Antonia Antoniou, del Georgia Institute of Technology. La metodología de procesamiento digital de imágenes en 2D se describe detalladamente en el manual desarrollado “**MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D USANDO EL SOFTWARE LIBRE NCORR**”. Este manual es una integración del manual de NCORR, aplicado al procesamiento de las imágenes de un ensayo en probetas de acero sometidas a tracción hasta la falla, (Figura 49). Se recopilan recomendaciones, instrucciones y experiencias para que el procesamiento de las imágenes sea satisfactorio y se obtengan resultados confiables, implementando de forma integral el sistema de correlación digital de imágenes en 2D de bajo costo desarrollado junto al grupo de investigación G7 de la Universidad del Valle, aplicable a cualquier ensayo cuyas mediciones solo se requieran en el plano.

Las mediciones obtenidas se sincronizaron con la carga, las galgas, y el extensómetro haciendo uso de Matlab.

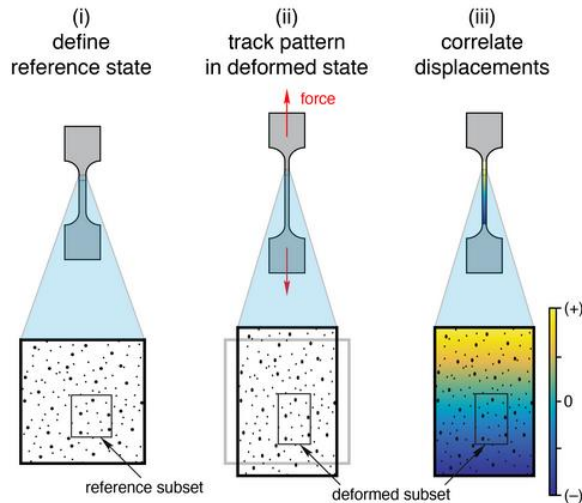


Figura 49. Principio de correlación digital de imágenes en ensayos de tracción en 2d.

6.2.7. Validación del sistema de correlación digital de imágenes en 2D de bajo costo utilizando el software de código abierto de Justin Blaber (NCORR).

Se ha validado exitosamente el sistema de correlación digital de imágenes en 2D al comparar las mediciones obtenidas con este sistema con las del extensómetro de la máquina universal de la Escuela de Ingeniería de Materiales. Al analizar los desplazamientos obtenidos a través del sensor y la técnica óptica, se obtuvieron resultados satisfactorios, como se muestra en (Figura 50). Los desplazamientos son técnicamente iguales con un error por debajo del 5%. En estas pruebas, los resultados del DIC no llegaron hasta la falla del elemento. Esto debido a que la pintura blanca de base se desprendió de la superficie del material en las áreas donde se produjeron altas concentraciones de tensión. Sin embargo, se logró medir casi la totalidad de la curva de esfuerzo-desplazamiento.

El sistema DIC permitió medir la deformación unitaria en ϵ_{xx} que experimentó la probeta. Esto complementó el análisis del comportamiento mecánico del material ya que la instrumentación con strain gauges únicamente provee mediciones de un punto particular de la probeta, sumado a que presenta problemas y errores significativos al despegarse de la superficie de medición. Las deformaciones unitarias obtenidas con DIC son consistentes con los valores esperados, para las 3 curvas esfuerzo-deformación la deformación de fluencia se acerca mucho al valor teórico de 0.0021, validando el sistema para dichas aplicaciones.

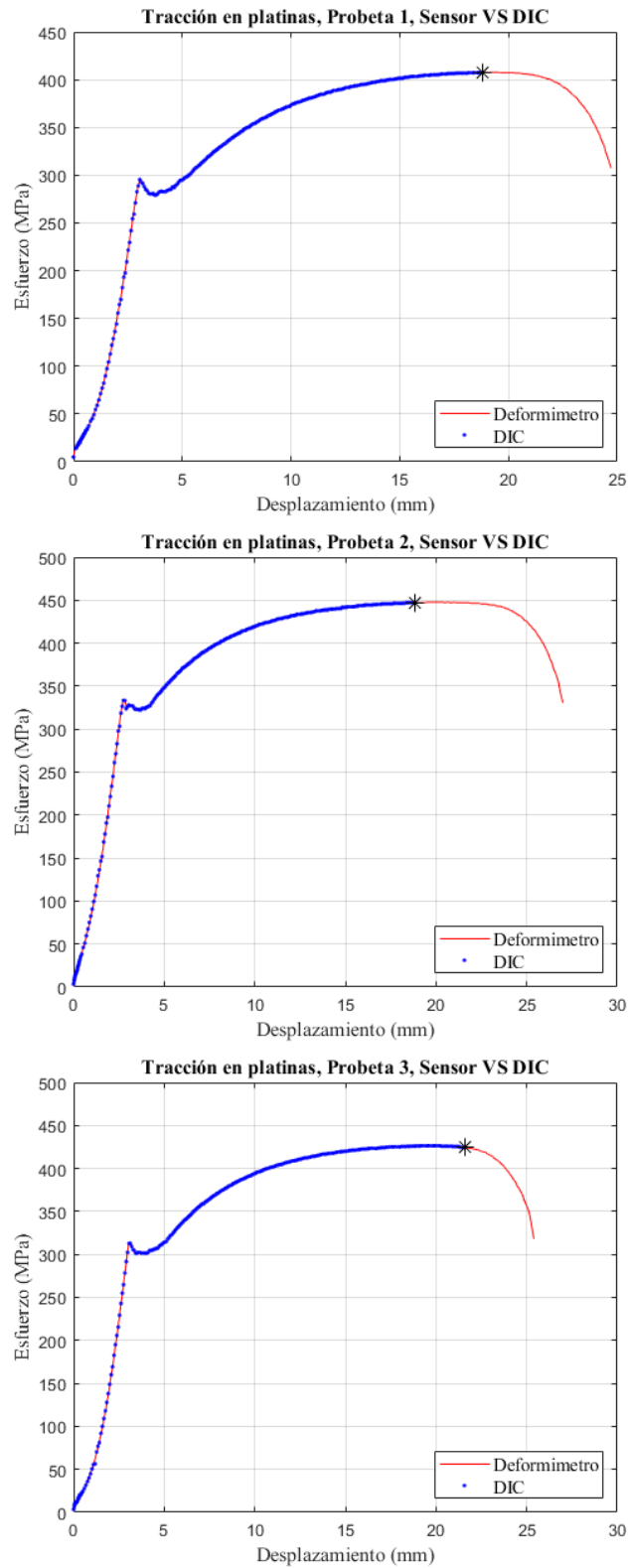


Figura 50. Comparación de resultados obtenidos del deformímetro vs DIC, probeta 1, 2 y 3.

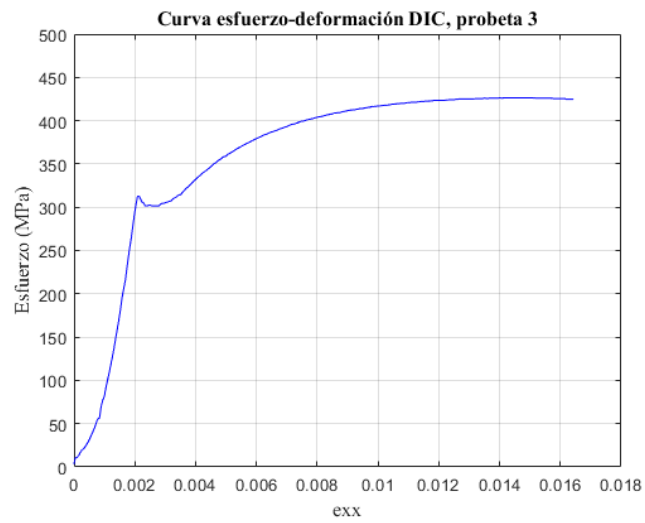
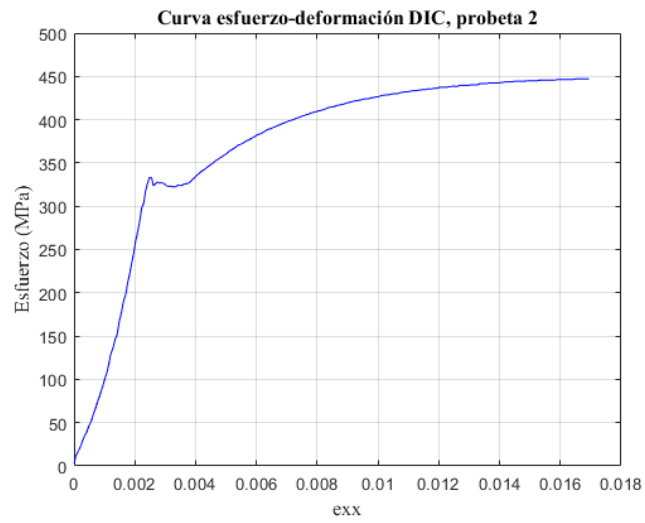
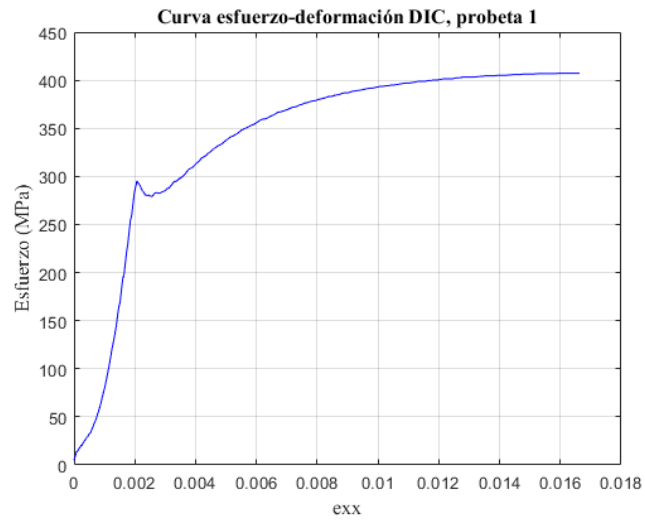


Figura 51. Curvas esfuerzo deformación obtenidas con DIC, probeta 1, 2 y 3.

6.3. Adecuación final del código según los resultados obtenidos con los ensayos.

La implementación del software NCORR para el procesamiento de las imágenes en 2D, y de DuoDIC para el procesamiento de imágenes en 3D, demuestran que los softwares libres cuentan con todo lo necesario para otorgar resultados confiables, de forma intuitiva para el usuario.

El único problema se presenta en el software DuoDIC, y se produce debido a la forma en cómo se cargan las imágenes, ya que utiliza la función de NCORR “Load all”, cargando de forma simultánea gran cantidad de pares de imágenes de los ensayos en muros que poseen alta resolución. Esto implica que se requiera para el procesamiento una gran cantidad de memoria RAM, demandando como mínimo 128gb de RAM para evitar que Matlab y el computador se bloqueen en este paso. Como solución, se opta por procesar los ensayos de manera fraccionada y se plantea una modificación futura del script de DuoDIC, específicamente en el script “Step 2: 2D-DIC using NCORR” para que carguen las imágenes utilizando la segunda función de carga de imágenes de NCORR “Load Lazy”, disminuyendo los requerimientos computacionales.

7. MANUALES DE USUARIO.

Se presenta una compilación de manuales de usuario para la implementación y desarrollo de la técnica DIC. Estos manuales incluyen la preparación del objeto de prueba para ser ensayado, el ensamble y montaje de las cámaras, el ajuste de los parámetros intrínsecos de las cámaras, el montaje del sistema de iluminación, la ejecución y manejo del sistema de captura automatizada de imágenes, la calibración estéreo de las cámaras, y el procesamiento de las imágenes.

7.1. Metodología de aplicación de puntos en muros de concreto reforzado.

En este tipo de probeta el patrón de puntos se ha venido aplicando de forma manual utilizando marcadores sharpie punta fina, (Figura 52). Esta metodología si bien es extenuante y requiere gran cantidad de mano de obra; es la que genera los patrones de puntos de más alta calidad, dando como resultado un tamaño de punto promedio de 15 pixeles y un tamaño de subset de entre 32 y 40 pixeles. Como recomendación, se debe procurar no utilizar demasiadas personas al tiempo y en lo posible utilizar las mismas para el desarrollo de todo el patrón sobre la probeta. Esto garantiza un patrón bien distribuido de buena densidad, con un tamaño de punto uniforme, y un mayor rendimiento en el desarrollo de estos. En este tipo de muros con una superficie de 1700mmx2200mm se requieren alrededor de 50 a 80 horas de mano de obra para terminar el patrón.



Figura 52. Aplicación del patrón aleatorio de puntos de forma manual con marcadores sharpie en un muro de concreto reforzado. Se observa el resultado del patrón aleatorio, de muy buena calidad, densidad y con buena distribución.

Se intentó implementar una plantilla tipo esténcil para aplicar el patrón de puntos aleatorio de forma rápida, sin embargo, los resultados no fueron favorables, ya que la plantilla era rígida y no se adaptaba correctamente a la superficie de las probetas que muchas veces era irregular; esto generaba que la plantilla quedara parcialmente levantada y al momento de aplicar la pintura en aerosol, esta salpicara el patrón aleatorio creando grandes manchas que hacían imposible la correlación en algunos lugares por la unión de puntos, (Figura 53). Otro problema radicaba en el traslapo entre patrones, ya que la unión entre las regiones creadas con la plantilla debía unirse con la metodología manual, lo que generaba grandes parches debido a la diferencia en tamaño de los puntos y a la saturación de color de la tinta y de la pintura, traducido en un patrón de mal aspecto, con mala distribución y con alta incertidumbre. Adicionalmente, se presentaba un problema con la disparidad del patrón de puntos, ya que la plantilla si bien se diseñó de forma aleatoria, su tamaño es pequeño por lo que debe replicarse en múltiples partes de la superficie hasta cubrir la mayor área posible, generando problemas de correlación y reconocimiento de la imagen. Se obtuvo con esta metodología un tamaño de punto promedio de 25 píxeles y un tamaño de subset de alrededor de 60 píxeles para no tener problemas en el procesamiento. Finalmente, el último problema asociado radica en que conforme se aplican las capas de pintura con el aerosol, se empieza a crear una capa de pintura sobre la plantilla que va ganando espesor, reduciendo y tapando las referencias de los puntos, por lo que cada vez los puntos quedan más pequeños, y se dificulta la manipulación de la plantilla ya que se vuelve bastante pegajosa, requiriendo de un disolvente como el thinner para llevar la plantilla a la normalidad.



Figura 53. Aplicación del patrón de puntos con la plantilla tipo stencil. Se observa cómo queda un patrón poco homogéneo, con mal aspecto, mala distribución y con diferencia de tonalidad en las tintas de la pintura con respecto a los marcadores.

7.2. Metodología de aplicación de puntos en probetas pequeñas.

En el caso de aplicaciones sobre probetas pequeñas, como cilindros de concreto, probetas de acero, polímeros y otros materiales, el sistema DIC se coloca significativamente más cerca de la superficie del material. Esto significa que el campo de visión de las cámaras (FOV) concentra su resolución de 6000x4000 píxeles sobre una buena parte de la región de interés de la probeta. Esta configuración cercana permite utilizar un tamaño mínimo de punto mucho más pequeño, con una densidad de patrón mucho mayor en la región de análisis, garantizando una alta resolución y calidad de patrón con el que sea posible medir deformaciones y desplazamientos en los elementos analizados.

Para probetas cuyas deformaciones sean relativamente grandes como las probetas de acero o polímeros, el patrón de puntos puede aplicarse de forma manual utilizando marcadores punta fina o lapiceros en gel, con esta técnica se logra obtener un patrón de muy buena calidad, uniforme y con un intervalo de incertidumbre bajo, de alrededor de 0.0096 píxeles, además, se obtiene un tamaño de punto promedio de 8x8 píxeles, un tamaño de subset estimado de 41 píxeles y un stepsize de 7 píxeles. Para aplicar esta técnica siga los siguientes pasos y recomendaciones:

- Lije la superficie de la probeta hasta obtener una ligera rugosidad que incremente la adherencia material-pintura.
- Limpie la superficie con alcohol u otro tipo de disolvente para eliminar aceites, restos de polvillo u otros contaminantes.
- Aplique una capa de pintura blanca (negra) sobre toda la probeta.
- Aplique el patrón aleatorio de puntos manualmente con un marcador Sharpie punta fina o lapiceros en gel negros(blancos).



Figura 54. Probetas de acero con el patrón aleatorio de puntos aplicado en su superficie.

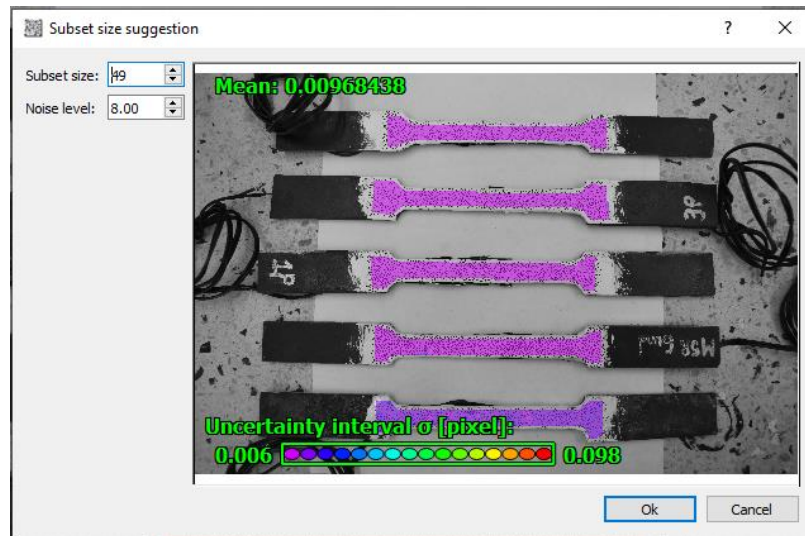


Figura 55. Análisis de la distribución y calidad del patrón de puntos en base a su intervalo de incertidumbre.

Nota: las pinturas convencionales de esmalte tienden a despegarse de la superficie del material en las zonas donde hay concentraciones de tensión, hasta el punto de llegar a agrietarse antes que la probeta llegue a su falla, generando deformaciones ficticias e impidiendo registrar la totalidad del ensayo por errores de correlación. Es por ello, que se recomienda aplicar el patrón aleatorio de puntos directamente sobre la superficie de forma que se genere contraste, utilizando en este caso un marcador Sharpie de punta fina color blanco. Sutton y su equipo [20] recomiendan utilizar pintura de alta elasticidad y adherencia como la pintura de altas temperaturas, y aplicar la misma justo antes del experimento para mantener la máxima adherencia a la muestra en las zonas con concentraciones de tensión, ya que en diferentes pruebas que han desarrollado han concluido que cuando las muestras se pintan uno o dos días antes del experimento la adherencia entre la pintura y la superficie se reduce radicalmente.

En probetas cuyas deformaciones sean muy pequeñas, como cilindros de concreto a compresión, la técnica anterior de aplicación del patrón de puntos se vuelve insuficiente, puesto que para lograr medir en este tipo de material es necesario un tamaño de punto mucho menor y con una densidad de puntos muy alta que manualmente es imposible lograr. Es por ello que el patrón de puntos puede aplicarse haciendo uso de un aerosol y destreza de aplicación, con esta técnica se obtiene un patrón de muy buena calidad, uniforme y con un intervalo de incertidumbre bajo, de alrededor de 0.0097 píxeles, además, se obtiene un tamaño de punto promedio de 4x4 píxeles, un tamaño de subet estimado de 53 píxeles y un stepsize de 7 píxeles. Para aplicar esta técnica se deben seguir los siguientes pasos y recomendaciones:

- En probetas cuyas deformaciones puedan llegar a ser muy altas, como elementos de acero o polímeros, no se debe aplicar pintura blanca de base, puesto que durante el desarrollo del ensayo la pintura tiene a romperse y fallar antes que el elemento, generando deformaciones ficticias e impidiendo registrar la totalidad del ensayo por errores de correlación. Se debe entonces, rociar el aerosol directamente sobre el material buscando el mayor contraste posible, evaluando si es mejor aplicar un patrón de puntos blanco o negro.
- En cilindros de concreto y en general, en materiales cuyas deformaciones no sean muy grandes, se debe aplicar inicialmente una capa de pintura blanca a base de agua para generar mayor contraste entre el fondo y el patrón generado con el aerosol.
- Posteriormente, debe utilizar un aerosol de pintura mate, con el cual debe rociar pintura a una distancia constante de entre 20 a 30 centímetros de la probeta, con una velocidad, presión e inclinación constante a la superficie, lo más perpendicular posible. Garantizando de que no se manche la superficie ni de que queden regiones del elemento con puntos de un tamaño mucho mayor al promedio. Esto requiere algo de práctica, pero es rápido y genera un patrón de puntos aleatorio con buena distribución y alta densidad, con un tamaño de punto promedio de 20 píxeles



Figura 56. Cilindros de concreto con el patrón aleatorio de puntos aplicado en su superficie.

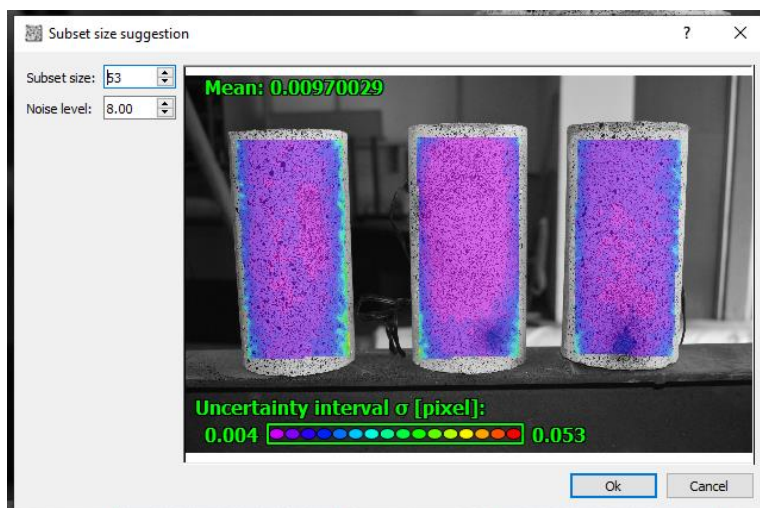


Figura 57. Análisis de la distribución y calidad del patrón de puntos en base a su intervalo de incertidumbre.

***Nota:** Otra metodología que resulta efectiva para aplicar el patrón de puntos en estos elementos pequeños consiste en utilizar un atomizador de perfume francés con balón pulverizador. Este es capaz de pulverizar pequeñas cantidades de pintura en partículas muy finas, generando tamaños de puntos incluso inferiores a los generados con la pintura en aerosol, con buena distribución aleatoria y alta densidad.*

7.3. Ajuste de los parámetros intrínsecos de las cámaras para el desarrollo de un ensayo de correlación digital de imágenes en 3D.

Previo a iniciar la fase de calibración, es necesario configurar los parámetros intrínsecos de las cámaras correspondientes al tiempo de exposición, grado de apertura del diafragma y la sensibilidad ISO. Los parámetros deben ser los mismos para ambas cámaras y durante todo el desarrollo del ensayo. Estos parámetros deben ser ajustados de acuerdo con las condiciones de iluminación del ensayo siguiendo las siguientes recomendaciones:

7.3.1. Tiempo de exposición.

El tiempo de exposición hace referencia al tiempo que el obturador de la cámara permanece abierto para permitir que la luz entre y llegue al sensor o película de la cámara. Se recomienda que ajuste el tiempo de exposición en un valor no menor de 1/40 segundos para evitar errores de sincronización entre cámaras y el efecto de desenfoque en las probetas que genera problemas de correlación.

7.3.2. Grado de apertura.

El grado de apertura se refiere al tamaño relativo de la abertura del diafragma en la lente. Esta apertura determina la cantidad de luz que ingresa a la cámara durante la toma de una imagen. Se recomienda que tome el nivel máximo de apertura para el zoom óptico que vaya a utilizar, es decir, el valor más bajo que le permita la cámara. Para los ensayos en muros de concreto con un zoom óptico de 18mm se toma un valor de #F de 3.5. Utilizar grados de apertura mayores reduce la cantidad de luz que llega al sensor, y, por tanto, oscurece la imagen, requiriendo incrementar el tiempo de exposición y la sensibilidad ISO para ajustar la

iluminación, aumentando la cantidad de ruido presente en las imágenes.

7.3.3. Sensibilidad ISO.

La sensibilidad ISO es un ajuste en las cámaras digitales y analógicas que controla la sensibilidad del sensor o la película a la luz. Al aumentar el valor ISO, el sensor se vuelve más sensible a la luz, lo que permite capturar imágenes en condiciones de poca luz o en situaciones donde se necesita una exposición más rápida. Por otro lado, al disminuir el valor ISO, el sensor se vuelve menos sensible a la luz, lo que es útil en condiciones de mucha luz o cuando se desea una menor sensibilidad para reducir el ruido en la imagen. Se recomienda que utilice valores de ISO por debajo de 200, ya que a medida que se aumenta el ISO, también aumenta la posibilidad de que aparezca ruido en la imagen, lo que puede degradar la calidad, la nitidez y, por tanto, resolución de datos.

7.3.4. Enfoque.

El enfoque debe ser configurado de forma manual girando el anillo de enfoque en la lente para ajustar la distancia y lograr la nitidez deseada. Ambas cámaras deben enfocarse sobre el mismo punto en el centro de la probeta a ensayar. Se deben tomar capturas de prueba para revisar la calidad y nitidez de las imágenes, sobre todo en la ROI. Tenga en cuenta que si no configura el enfoque en manual se generaran desplazamientos ficticios y relativos entre ambas cámaras ya que este se ajustara a como la probeta se haya desplazado, variando en el tiempo y produciendo grandes errores. El zoom óptico de las cámaras debe configurarse de acuerdo a las condiciones del ensayo, y estará dominado en base a la distancia de la probeta con respecto a las cámaras. En los ensayos de los muros de concreto reforzado se utilizó un zoom óptico de 18mm, mientras que en probetas más pequeñas como cilindros de concreto y platinas de acero, con regiones de interés muchas pequeñas y donde las cámaras están muy cerca se utilizó un zoom óptico de 55mm.

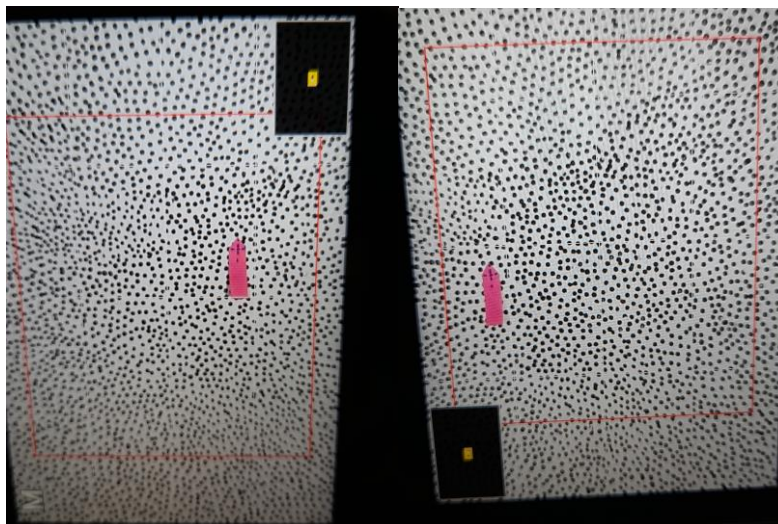


Figura 58. Enfoque manual de las cámaras previsualizado desde la pantalla principal.

7.3.5. Campo de visión.

Se debe verificar que el campo de visión de las cámaras alcance a registrar la probeta durante todo el ensayo, ya que es posible que bajo grandes desplazamientos (como en platinas de acero sometidas a tensión, o incluso los muros de concreto reforzado bajo carga cíclica cuando

alcanzan grandes derivas) una parte de la probeta se salga del campo visual de las cámaras y se corte la región de interés generando errores de correlación y ausencia de datos. Es necesario estimar cuanto será el mayor desplazamiento y en qué dirección se llevará a cabo para considerar este factor y corregirlo antes de iniciar con el ensayo.



Figura 59. Campo de visión de las cámaras para diferentes estados del ensayo de carga cíclica en muros.

7.4. Calibración estéreo de cámaras.

La calibración estéreo de cámaras hace referencia al proceso de ajustar y determinar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de dos cámaras que forman un sistema estéreo. La calibración es necesaria para obtener mediciones precisas en un sistema estéreo, ya que permite conocer la relación geométrica entre las dos cámaras y cómo se relacionan con el mundo real dándole sentido físico a cada una de las mediciones realizadas en píxeles. La calibración permite encontrar en base a la geometría epipolar, (Figura 60), las distancias focales y los puntos principales de las cámaras, además, determina la transformación de coordenadas de las cámaras a partir de la obtención de la matriz de rotación y el vector de traslación que relaciona el sistema coordenado de una cámara con el de la otra.

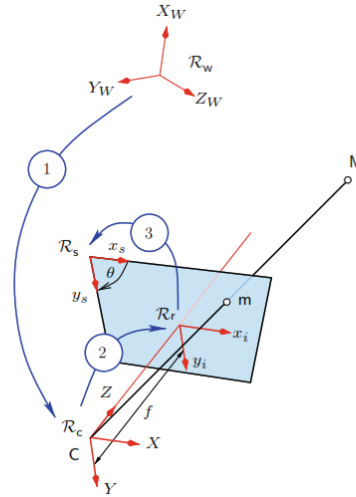


Figura 60. Las tres transformaciones elementales del modelo de cámara pinhole y los sistemas de coordenadas asociados. La primera transformación relaciona las coordenadas globales de un punto de la escena con las coordenadas en el sistema de la cámara. La segunda es la transformación de proyección de este punto en el plano retiniano. La tercera transforma el punto en el sistema de coordenadas del sensor (unidades de píxeles) [20].

Para llevar a cabo la fase de calibración estéreo de cámaras, es necesario ajustar la iluminación del ensayo para evitar reflejos en el patrón de calibración. En el caso de los ensayos de muros de concreto reforzado, se debe desactivar temporalmente uno de los reflectores de 50W y encender el sistema de iluminación LED instalado en el Marco de Pruebas. El procesamiento de las imágenes con reflejos suele dar como resultado coeficientes de correlación y reproyección muy altos, lo que implica una mala calibración por lo que deben descartarse. Si el patrón de calibración no es totalmente mate, es probable que muchos pares de imágenes presenten inconsistencias. Para mitigar este problema, es necesario capturar múltiples pares de imágenes de calibración, que permitan eliminar aquellas que no posean las características correctas. iDICS, Correlated Solutions, Sutton y Solav [5, 20, 35], recomiendan capturar entre 30 a 50 pares de imágenes de calibración para obtener resultados satisfactorios. Para el ensayo de muros de concreto reforzado se tomaron 70 imágenes de calibración con el patrón de ajedrez, resultando en buenos coeficientes de calibración.

A lo largo de este proceso, el usuario debe colocar el patrón de calibración en diferentes posiciones, desplazándolo por la superficie del objeto de prueba y rotándolo para abarcar múltiples planos, cubriendo toda la superficie. Con ello se logra obtener una vez procesados los parámetros extrínsecos e intrínsecos de las cámaras. Los disparos de las cámaras se activan desde el equipo de adquisición, donde previamente el usuario define el intervalo de tiempo entre capturas para permitir la orientación y el movimiento del patrón. En este caso particular, se toman fotos cada 6 segundos, lo que permite ajustar el patrón dentro de ese intervalo de tiempo.

Desde el momento en que se inicia la fase de calibración y hasta la finalización del ensayo, las cámaras y el sistema en general no pueden ser manipulados de ninguna forma; esto induciría cambios en las posiciones relativas de las cámaras y, por tanto, errores de calibración que se traducen en desplazamientos ficticios que podrían verse reflejados como movimiento de cuerpo rígido del elemento. Es por ello, que el sistema de soporte se modificó a lo largo de los ensayos garantizando que sea lo más estable y rígido posible. Las señales de advertencia y conos de prevención son muy importantes, el descuido de una persona puede llevar a que se deba detener el ensayo y repetir la fase calibración, complicando el procesamiento y

posprocesamiento de los datos. Si, durante el transcurso de la prueba, las cámaras se descargan, es necesario desmontar el sistema para retirar las baterías, lo que altera su posición y requiere repetir la calibración.

7.5. Manuales de procesamiento digital de imágenes en 2D y 3D.

Se crearon manuales para el procesamiento digital de imágenes en 2D y 3D haciendo uso del software libre NCORR, DuoDIC y del software pago de Correlated Solutions VIC 3D-9. Estos manuales tienen como objetivo asegurar que los usuarios del sistema de bajo costo desarrollado en la Universidad del Valle puedan utilizarlo en diversas aplicaciones. Facilitando el proceso de aprendizaje del DIC, reduciendo el tiempo de capacitación, y documentando las prácticas que se han desarrollado en los ensayos hasta la fecha.

En la sección de anexos, se encuentran los manuales respectivos para llevar a cabo el procesamiento digital de las imágenes en 2D Y 3D, que se numeran a continuación:

7.6. *Manual de correlación digital de imágenes en 2D haciendo uso del software libre NCORR.*

En este manual se explica paso a paso el procesamiento digital de imágenes en 2D de un ensayo de tracción en una probeta de acero.

7.7. *Manual de correlación digital de imágenes en 3D haciendo uso del software libre DuoDIC.*

En este manual se explica paso a paso el procesamiento digital de imágenes en 3D de un muro de concreto reforzado bajo carga cíclica.

7.8. *Manual de correlación digital de imágenes en 3D haciendo uso del software de Correlated Solutions VIC 3D9.*

En este manual se explica paso a paso el procesamiento digital de imágenes en 3D de un muro de concreto reforzado bajo carga cíclica. Se muestran las herramientas adicionales y de visualización del software de Correlated Solutions.

7.9. *Manual audiovisual para el desarrollo de ensayos en muros de concreto reforzado y tracción en probetas de acero.*

Este manual es una compilación de videos que explican cómo desarrollar un ensayo cuasi estático sobre muros de concreto reforzado (https://correounivalleeduco-my.sharepoint.com/:f/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/EjO-92bQxXZOqbZm5DsmAB8Bj2Cphl0UsKgjnVQAiqq81Q?e=6vkkTC) y de tracción en platinas (https://correounivalleeduco-my.sharepoint.com/:f/g/personal/sebastian_agudelo_correounivalle_edu_co/Ekoosu9k3htCgpEQTn9uBBIBw1kfsMAU278_m93lcVLgrA?e=j4ExUJ) utilizando la técnica de correlación digital de imágenes. En caso de que el link este caído, enviar un correo a sebastian.agudelo@correounivalle.edu.co para solucionarlo.

Estos manuales conforman el manual detallado del sistema DIC, fortaleciendo el grupo de investigación G7 y la Universidad del Valle.

8. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de grado se implementó y validó un sistema estéreo de correlación digital de imágenes de bajo costo para medir campos de desplazamiento en diversas aplicaciones civiles. Permitiendo llegar a las siguientes conclusiones generales:

- ✓ **Validación de la Técnica:** El desarrollo del prototipo de un sistema de correlación digital de imágenes en 2D y 3D utilizando cámaras DSLR convencionales permitió validar la efectividad de la técnica DIC en la medición de campos de desplazamientos en diversas aplicaciones, llevando a cabo el procesamiento mediante softwares de código abierto como NCORR y DuoDIC.
- ✓ **Eficiencia y Rapidez:** La aplicación de la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) provee mediciones de desplazamiento en elementos estructurales y no estructurales sometidos a diferentes tipos de carga. Esta técnica permite el uso de equipos y configuraciones más simples que las planteadas en los sistemas tradicionales de medición (p.e., medición con LVDTs, potenciómetros, etc.), los cuales requieren gran cantidad de conexiones, complejos sistemas de adquisición, y se limitan a dar información en unos cuantos puntos y solo en la dirección de medición del sensor. El sistema DIC demostró ser más eficiente y rápido en la obtención de resultados, lo que puede ahorrar tiempo y recursos en proyectos de investigación y desarrollo.
- ✓ **Precisión y Exactitud:** Se pudo observar que el sistema implementado era capaz de proporcionar mediciones precisas y confiables a la par de los métodos tradicionales de medición de desplazamientos.
- ✓ **Economía:** El sistema estéreo de correlación digital de imágenes para medición de campos de desplazamiento en 3d a bajo costo desarrollado en la Universidad del Valle tiene un costo de alrededor de 4350 dólares, muy por debajo del valor de los sistemas comerciales que rondan los 45000 dólares. Esto permite que sea implementado en diversos laboratorios de investigación.
- ✓ **Versatilidad de Aplicación:** El sistema desarrollado es versátil y aplicable en diversos ensayos y a diferentes escalas. Es por ello, que se incluyen diversos patrones de calibración validados para que el usuario pueda implementar la técnica según sus necesidades.
- ✓ **Necesidad de Calibración y Ajustes:** Se observó que, para garantizar mediciones precisas, es necesario llevar un control de calidad del patrón aleatorio de puntos, de los patrones de calibración, del desarrollo de los ensayos y del procesamiento, lo que requiere de un alto nivel de ingeniería para aplicar la técnica sin obtener mediciones erróneas.
- ✓ **Aplicaciones Futuras:** Las capacidades del sistema de correlación digital de imágenes desarrollado demuestran un gran potencial para futuras aplicaciones en áreas como el monitoreo estructural, la evaluación del comportamiento mecánico de materiales, y la investigación científica en general. Sirve como punto de partida en la colaboración con otras Escuelas como las Escuelas de Ingeniería de Materiales e Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle.
- ✓ **Importancia de la Formación:** Los manuales físicos y audiovisuales forman al usuario para que esté en la capacidad de llevar a cabo un ensayo aplicando la técnica DIC y su respectivo procesamiento. Es importante que la persona a cargo tenga suficiente conocimiento teórico en la técnica DIC para evitar que cometa errores en alguna de las fases de ejecución. Debe seguir las recomendaciones propuestas en la metodología y en los manuales de los anexos.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Semmlow, J.L. and B. Griffel, Biosignal and medical image processing. 2014: CRC press.
2. J.M. 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-D-DIC technique for low-cost 3D displacement fields measurements. *Engineering Structures*, vol. 197, p. 109457, oct. 2019.
4. Lopes, M. Conoce qué es una cámara DSLR y cuáles son sus ventajas. <https://es.digitaltrends.com/fotografia/que-es-una-camara-dslr/>
5. Reu, P. DIC: A Revolution in Experimental Mechanics. *Experimental Techniques* (2015), Society for Experimental Mechanics
6. Romeo E. 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.
7. Górszczyk J, Malicki K, Zych T. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials* (Basel). 2019 jul 24;12(15):2349. doi: 10.3390/ma12152349. PMID: 31344847; PMCID: PMC6696109.
8. Grygierek M., Grzesik B., Rokitowski P., Rusin T. Usage of digital image correlation in assessment of behaviour of block element pavement structure. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018; 356:012024. doi: 10.1088/1757-899X/356/1/012024.
9. Sutton, M. Ghorbani, R. Matta, F. Full-Field Displacement Measurement and Crack Mapping on Masonry Walls Using Digital Image Correlation.
10. Dai S., Liu X., Nawnit K. Experimental study on the fracture process zone characteristics in concrete utilizing DIC and AE methods. *Appl. Sci.* 2019; 9:1346. doi: 10.3390/app9071346.
11. Górszczyk J., Malicki K. Study of the mechanical properties of a hexagonal geogrid using the digital image correlation method; *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017*; Albena, Bulgaria. 29 June–5 July 2017; Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd.; 2017. pp. 809–816.
12. Hild, F. and S. Roux, Digital Image Correlation: from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties – a Review. *Strain*, 2006. 42(2): p. 69-80.
13. Dai S., Liu X., Nawnit K. Experimental study on the fracture process zone characteristics in concrete utilizing DIC and AE methods. *Appl. Sci.* 2019; 9:1346. doi: 10.3390/app9071346.
14. Wang, L. J., Li, J. J., Qi, Y. M., Tan, X. H., Deng, S. P., & Li, Q. (2018). Application of 3D-DIC Method on Crack Forming Process of Concrete under Axial Compression. In *Key Engineering Materials* (Vol. 764, pp. 21–27). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.764.21>
15. 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.

16. Pickworth, J., Tyson, J., Buciencki, J., International Medical Device Conference (2019). 3D Digital Image Correlation: The Ultimate Biomechanics Tool For Displacements And Strains Testing. Conference.
17. Zhu, F., Gu, X., Bai, P. & Lei, D. (2021). Application of 3D digital image correlation for the measurement of the tensile mechanical properties of high-strength steel. *Materials Testing*, 63(4), 303-310. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0044>
18. Maleza, M. Malowany, K. Tomczak, U. Siwek, B. Kujawińska, M. Siemińska-Lewandowska, A. Application of 3D digital image correlation in maintenance and process control in industry, *Computers in Industry*, Volume 64, Issue 9, 2013, Pages 1301-1315, ISSN 0166-3615.
19. Anon. Gilbert Louis Hobrough. *The Photogrammetric Record*, 18(104):337–340, 2003.
20. Sutton, M; Ortu J-J; Schreier, H., Springer, 2009. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic concepts and applications.*
21. W. H. Peters and W. F. Ranson. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*, 21(3):427–431, 1982.
22. M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson, and S. R. McNeill. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*, 1(3):133–139, August 1983.
23. J. Anderson, W. H. Peters, M. A. Sutton, W. F. Ranson, and T. C. Chu. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 22(6):238–243, 1984.
24. T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton, and W. H. Peters. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25(3):232–244, 1985.
25. M. A. Sutton, M. Q. Cheng, W. H. Peters, Y. J. Chao, and S. R. McNeill. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 4(3):143–150, August 1986.
26. M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. Jang, and M. Babai. Effects of sub-pixel image restoration on digital correlation error. *Optical Engineering*, 27(10):870–877, 1988.
27. P. F. Luo, Y. J. Chao, and M. A. Sutton. Application of stereo vision to three-dimensional deformation analyses in fracture experiments. *Optical Engineering*, 33(3):981–990, 1994.
28. P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton, and W. H. Peters. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision. *Experimental Mechanics*, 33(2):123–132, June 1993.
29. J. F. Cárdenas-García, H. G. Yao, and S. Zheng. 3D reconstruction of objects using stereo imaging. *Optics and Lasers in Engineering*, 22(3):193–213, 1995.
30. J. D. Helm, S. R. McNeill, and M. A. Sutton. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement. *Optical Engineering*, 35(7):1911–1920, 1996.
31. J Blaber, B Adair, A Antoniou, (2018). Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software, *Experimental Mechanics* 55 (6), 1105-1122.
32. Atkinson, D.; Becker, T. A 117 Line 2D Digital Image Correlation Code Written in MATLAB. *Remote Sens.* 2020, 12, 2906. Paper can be accessed at: <https://doi.org/10.3390/rs12182906>

33. Atkinson, D.; Becker, T.H. Stereo Digital Image Correlation in MATLAB. Appl. Sci. 2021, 11, 4904. Paper can be accessed at: <https://doi.org/10.3390/app11114904>
34. D. Solav, K. M. Moerman, A. M. Jaeger, K. Genovese and H. M. Herr, "MultiDIC: An Open-Source Toolbox for Multi-View 3D Digital Image Correlation," in IEEE Access, vol. 6, pp. 30520-30535, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843725.
35. D. Solav et al., (2022). DuoDIC: 3D Digital Image Correlation in MATLAB. Journal of Open Source Software, 7(74), 4279, <https://doi.org/10.21105/joss.04279>.
36. Pereira, A. d'Almeida, J, (2019). Development of a Low-Cost Digital Image Correlation System to Evaluate the Behaviour of Thermoplastics at Large Deformation, Chemical and Materials Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rua Marquês de São Vicente, 255 – Gávea – 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. DOI: 10.3303/CET1974181
37. Arza-García, M., Núñez-Temes, C., Lorenzana, J.A. et al. Evaluation of a low-cost approach to 2-D digital image correlation vs. a commercial stereo-DIC system in Brazilian testing of soil specimens. Archiv.Civ.Mech.Eng 22, 4 (2022). <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00325-0>.
38. Ortega, Roger & Torres Arbeláez, Pedro & Thomson, Peter & Marulanda, Johannio & Areiza, Gilberto. (2023). Behavior under lateral cyclical load of thin reinforced concrete walls of the industrialized system. Engineering Structures. 294. 10.1016/j.engstruct.2023.116634.
39. Cuesvas E, Ortega R, Marulanda J, Thomson P, Areiza G, Cruz A. Numerical evaluation of the seismic performance of thin reinforced concrete wall buildings representative of the industrialized building system. Lat Am J Solids Struct 2022; 19:1–18. <https://doi.org/10.1590/1679-78256759>.
40. Computers and Structures Inc. Performance-based design of 3D structures, Perform-3D. V 8.0; 2021.
41. Benavides J.D, Villaquiran M, Silva Y. Evaluación de propiedades mecánicas y estructurales de concreto con Escoria de Cobre Primaria como reemplazo parcial de cemento hidráulico. Tesis de pregrado.
42. Moerman, (2018). GIBBON: The Geometry and Image-Based Bioengineering add-On. Journal of Open Source Software, 3(22), 506, <https://doi.org/10.21105/joss.00506>

10. ANEXOS

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

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ESTÉREO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES PARA MEDICIÓN DE CAMPOS DE DESPLAZAMIENTO EN 3D A BAJO COSTO.

SEBASTIÁN SUÁREZ AGUDELO.

Tutor:

PETER THOMSON Ph.D.

Asesor:

ROGER ORTEGA CARABALLO Ph.D.



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2023

Tabla de contenido

1. Pre-Procesamiento.	78
1.1.Extracción de fotogramas.....	78
1.2.Rotación de imágenes.	79
1.3.Software libre NCORR.	80
1.4.Requerimientos del software libre NCORR.....	80
1.4.1. Requerimientos de hardware.....	80
1.4.2. Requerimientos de sistema operativo.....	81
1.4.3. Requerimientos de Matlab	81
1.4.4. Configuración MEX.....	81
1.5.Instalación del software libre NCORR.....	82
2. Procesamiento.....	83
2.1.Paso 1, Establezca la imagen de referencia:.....	84
2.2.Paso 2, Cargue las imágenes deformadas.....	84
2.3.Paso 3, Establezca la región de interés (ROI):	85
2.4.Paso 4, Establezca los parámetros de DIC para el procesamiento.	86
2.4.1. Tamaño de subset:.....	87
2.4.2. Tamaño del paso:	87
2.4.3. Criterios de correlación:.....	88
2.4.4. Opción multinúcleo:.....	88
2.4.5. Análisis de alta deformación:.....	88
2.4.6. Análisis discontinuo:.....	89
2.5.Paso 5, Análisis DIC:	89
2.5.1. Selección de la región de interés:.....	90
2.5.2. Establecer los “Seeds” o Subregiones de correlación:	90
2.5.3. Chequeo de subregiones de correlación:.....	91
2.6.Paso 6, Formato de desplazamientos	92
2.7.Paso 7, Calculo de deformaciones:	94

LIBRE NCORR

Este manual es una integración del manual de NCORR desarrollado por Justin Blaber y Antonia Antoniou, del Georgia Institute of Technology, aplicado al procesamiento de las imágenes de un ensayo en probetas de acero sometidas a tracción hasta la falla, (Figura 1). Se recopilan mis recomendaciones, instrucciones y experiencias para que el procesamiento de las imágenes sea satisfactorio y se obtengan resultados confiables, implementando de forma integral el sistema de correlación digital de imágenes en 2d de bajo costo que he desarrollado junto al grupo de investigación G7 de la Universidad del Valle, aplicable a cualquier ensayo cuyas mediciones solo se requieran en el plano.

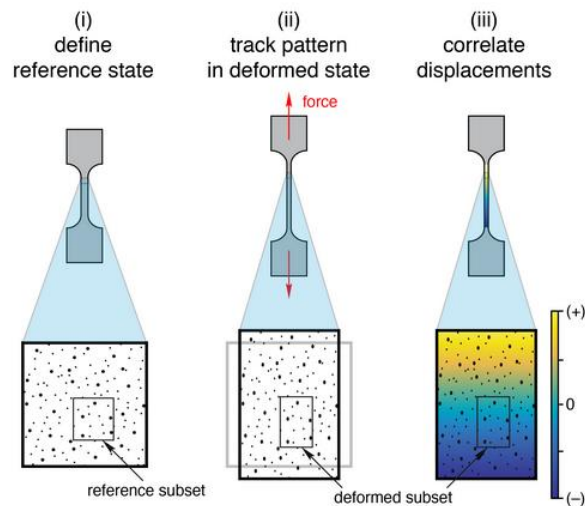


Figura 1. Principio de correlación digital de imágenes en ensayos de tracción en 2d.

El ensayo de tracción en probetas de acero se llevó a cabo utilizando la maquina universal de la Escuela de Ingeniería de Materiales de Universidad del Valle. Para el monitoreo del comportamiento mecánico del material, se utilizaron strain gauges, el deformímetro propio de la maquina universal y se implementó el sistema de correlación digital de imágenes en 2D, (Figura 2). Para esta última, se utilizó una cámara Nikon D5600 que se configuro en modo de grabación de video durante el desarrollo de cada uno de los ensayos hasta la falla de las probetas. Los videos capturados por la cámara cuentan hasta 60 cuadros por segundo, lo que le permite al usuario extraer la cantidad de cuadros por segundos necesarios, siempre y cuando no excedan dicho valor. La alta frecuencia de adquisición obtenida permite observar incluso la forma en cómo se produce súbitamente la falla del material.

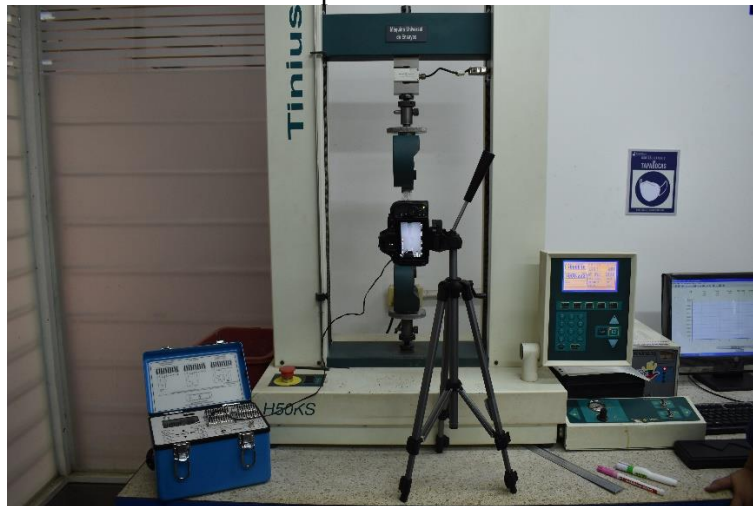


Figura 2. Sistema de correlación de imágenes en 2D en ensayos de tracción.

1. Pre-Procesamiento.

Una vez terminado el ensayo, guarde el video de la cámara(archivo.mov) o imágenes individuales en una carpeta con un nombre relacionado al tipo o número de ensayo que haya realizado, (Figura 3).

HD PEDRO (M:) > SEBAS > Traccion en platinas > 106D5600				
Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño	
Probeta_1	2/25/2023 9:54 AM	Carpeta de archivos		
Probeta_2	2/25/2023 9:53 AM	Carpeta de archivos		
Probeta_3	2/25/2023 9:54 AM	Carpeta de archivos		
Probeta_4	2/25/2023 9:54 AM	Carpeta de archivos		

Figura 3. Videos de ensayos de tracción en probetas de acero.

Para iniciar con el procesamiento digital de imágenes, es necesario transformar el video en una serie de fotogramas, extrayendo los cuadros individuales o imágenes deformadas de la probeta. Para ello, he desarrollado un script que permite extraer los fotogramas de un video, permitiendo al usuario seleccionar la tasa deseada de manera intuitiva. Además, nombra los fotogramas con la nomenclatura de NCORR para que puedan procesarse directamente.

1.1.Extracción de fotogramas. El script “Extract_frames” está diseñado para facilitar la extracción de los fotogramas del video de forma sencilla y automatizada, (Figura 4). Únicamente el usuario debe introducir el número de fotogramas por segundo (FPS) que desea extraer del video del ensayo. Este valor depende exclusivamente del tipo de ensayo y la velocidad en la que se propaga la deformación y el daño en la probeta. Para comenzar con el proceso realice los siguientes pasos.

Instrucciones:

1.1.1. Ubique una copia del script dentro de la carpeta donde se encuentra el video del ensayo que desea analizar.

1.1.2. Modifique la línea 6 del script “Extract_frames” para que tenga la cantidad de fotogramas por segundo que desea extraer del video.

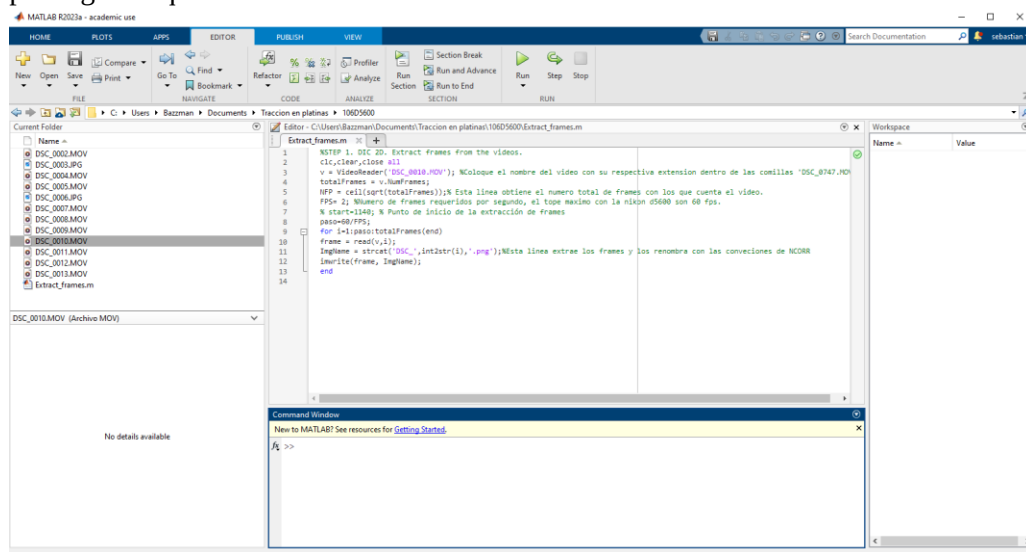


Figura 4. Script “Extract_frames” para extraer fotogramas de un video.

1.1.3. Ejecute el script para iniciar el proceso y obtener los fotogramas individuales.

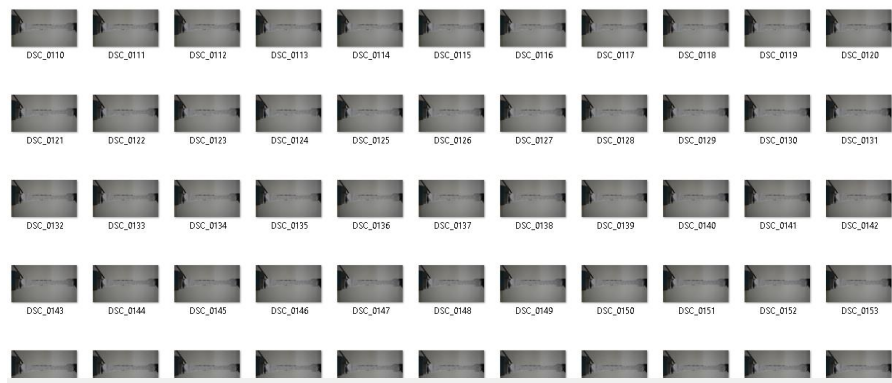


Figura 5. Fotogramas individuales del ensayo a analizar.

Por lo general, las imágenes y videos capturados se encuentran rotados con respecto al eje vertical, (Figura 6). Esto debido a que la orientación de la cámara esta ajustada para que su campo de visión (FOV) abarque la mayor cantidad de pixeles sobre la región de interés (ROI), por lo que previo al procesamiento en el software se sugiere realizar ajustes para dejar las imágenes de la cámara orientadas en el mismo sentido de aplicación de la carga, tal y como se evidencia a continuación.

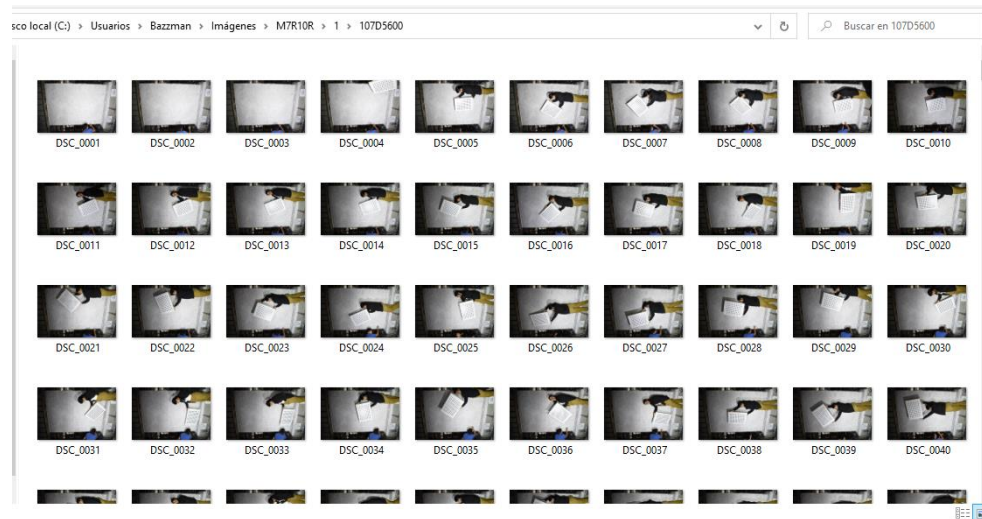


Figura 6. Imágenes brutas del ensayo, rotadas con respecto a la vertical.

1.2. Rotación de imágenes. El script RotateBatch está diseñado para facilitar la rotación de las imágenes de forma sencilla y automatizada, (Figura 7). Únicamente el usuario debe introducir el ángulo de rotación de las imágenes con respecto al eje vertical, tenga en cuenta que una rotación positiva en Matlab va en contra de las manecillas del reloj. Para comenzar con el proceso realice los siguientes pasos.

Instrucciones:

- 1.1.4.** Ubique una copia del script dentro de la carpeta donde se encuentran las imágenes o fotogramas individuales.
- 1.1.5.** Modifique en la línea 14 del script “RotateBatch”, dentro del comando “imrotate” el ángulo de rotación de las imágenes con respecto al eje vertical, de tal forma que queden

orientadas en el sentido de aplicación de la carga o en el que se concentren las deformaciones.

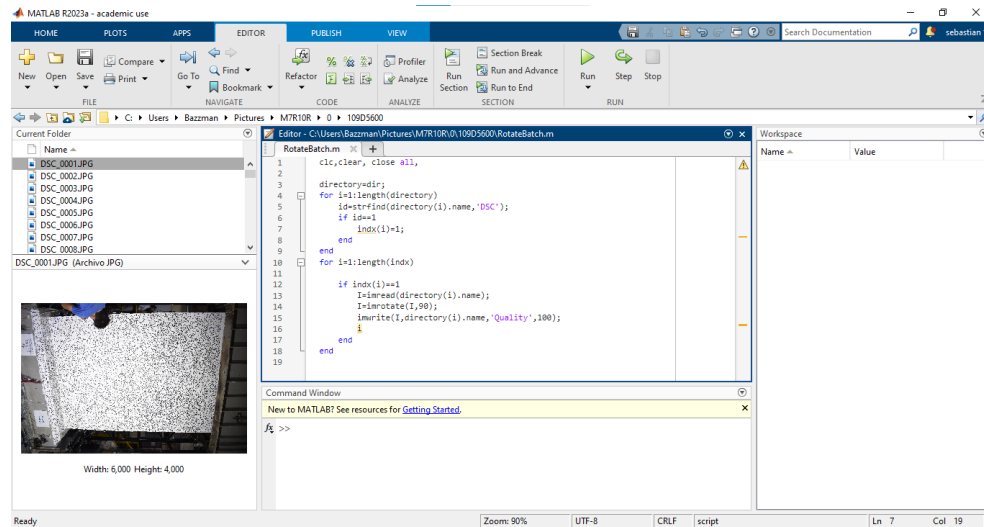


Figura 7. Script “RotateBatch” para rotación de imágenes.

1.1.6. Ejecute el script para iniciar el proceso.

1.3. Software libre NCORR.

La correlación digital de imágenes en 2d “2D DIC”, se lleva cabo en Matlab haciendo uso del software de código abierto NCORR desarrollado por Justin Blaber y Antonia Antoniou, del Georgia Institute of Technology. Este software abierto, permite la implementación del sistema de 2D DIC de bajo costo que se ha venido desarrollando en la Universidad del Valle con el grupo de investigación G7. NCORR tiene cualidades que lo destacan de otros softwares de código abierto, ya que permite llevar a cabo el procesamiento DIC de forma fácil e intuitiva haciendo uso de una interfaz gráfica amigable, totalmente integrado al entorno Matlab y con algoritmos de procesamiento de alto nivel optimizados mediante el uso de C++/MEX, ofreciendo a los usuarios un programa robusto de DIC fácil de usar y eficiente.

Este manual es entonces, la integración entre el manual de base propuesto por Blaber, y la recopilación de mi experiencia con el procesamiento de probetas de acero sometidas a tensión.

1.4. Requerimientos del software libre NCORR.

1.4.1. *Requerimientos de hardware*

Los requerimientos de hardware dependen exclusivamente de la cantidad y resolución de las imágenes a procesar, si el objeto del procesamiento son gran cantidad de imágenes con una resolución muy alta como la de las imágenes capturadas con la cámara NIKON D5600(6000x4000 pixeles), es necesario un equipo con buenas prestaciones. Sin embargo, la necesidad computacional puede reducirse si las imágenes tienen menor resolución, como es el caso del ensayo de tracción en probetas de acero donde la adquisición del ensayo se realizó mediante grabación, disminuyendo la resolución de las imágenes hasta (1980x1280 pixeles), con un tamaño de imagen 10 veces menor. Para el procesamiento se utilizó un buen equipo de procesamiento con las siguientes especificaciones, el pico de botella del procesamiento con NCORR es la memoria RAM.

- Procesador: AMD Ryzen 7 3700x (8 núcleos, 16 hilos, hasta 3,8 GHz).
- Memoria RAM: 64GB DDR3 o superior.

1.4.2. **Requerimientos de sistema operativo**

S.O.: Windows 10 64 Bit, Windows 11 64 Bit.

1.4.3. **Requerimientos de Matlab**

NCORR fue desarrollado en Matlab, versión R2009a, y se ha testado en la versión R2022a y R2023a.

Para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes con NCORR, es necesario instalar los siguientes Toolbox de Matlab, ellos contienen diferentes funciones que serán utilizadas durante el flujo de trabajo:

- Image Processing Toolbox

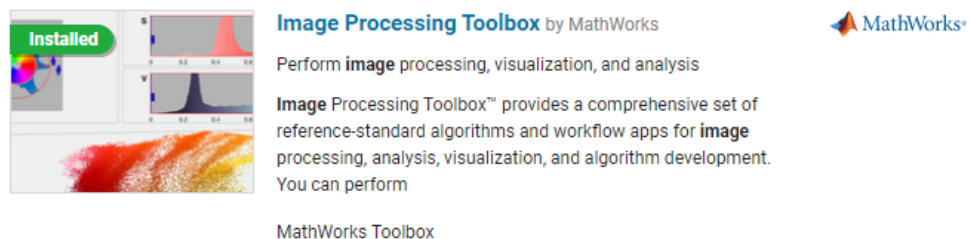


Figura 8. Image Processing Toolbox.

- Statistics and Machine Learning Toolbox

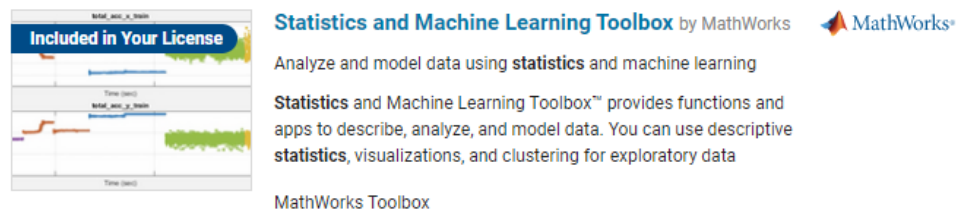


Figura 9. Statistics and Machine Learning Toolbox.

1.4.4. **Configuración 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: <http://www.ncorr.com/> and https://github.com/justinblaber/ncorr_2D_matlab. Se recomienda instalar el software Microsoft Visual Studio C++, (Figura 10), ya que fue testado para el procesamiento de las probetas de acero y 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: <https://visualstudio.microsoft.com/es/>. Por el contrario, no se recomienda instalar el compilador sugerido por Matlab “MinGW64 Compiler (C++)”, ya que únicamente permite llevar a cabo el procesamiento con un núcleo, desaprovechando la capacidad del procesador y ralentizando el análisis.

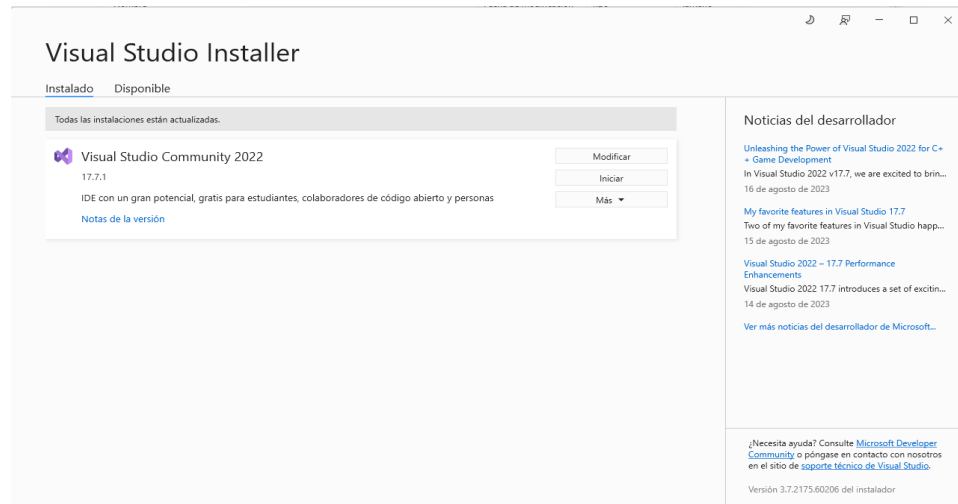


Figura 10. Instalador de Microsoft Visual Studio Community 2022.

Cuando instale el compilador de C++, en el “command window” pegue la siguiente instrucción `mex -setup c++`, esto para comprobar de que se ha instalado correctamente el compilador de C++ en Matlab. Si la instalación es correcta, debe aparecer un mensaje como el de la figura 11.

```
>> mex -setup c++
MEX configured to use 'Microsoft Visual C++ 2022' for C++ language compilation.
```

Figura 11. Comprobación en Matlab de la instalación del compilador de C++.

1.5. Instalación del software libre NCORR.

Una vez haya instalado el compilador de C++, abra Matlab, y en el directorio ubique la ruta donde tiene guardado NCORR, luego, en el “command window” pegue la siguiente instrucción: `handless_ncorr = ncorr`. 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, tal como se muestra en la figura 12. Este comando solo debe ejecutarse una única vez. Al terminar, aparecerá un cuadro de dialogo de OpenMP, ver figura 13, 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 un valor numérico, en mi caso se utilizaron los 8 núcleos del procesador. De clic en “*Finish*” para terminar la instalación.


```

Command Window
C:\> mex (x64_64)
Installing standard_datatypes... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_datatypes... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_lib... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formmask... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formregions... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formboundary... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formthreadaddiagram... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formunion... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_extrapdata... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_adddisp... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_convert... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_displacement... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.

```

Figura 12. Compilación de archivos de Ncorr y MEX.

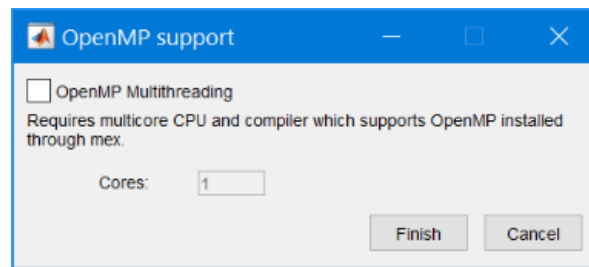


Figura 13. Cuadro de diálogo de OpenMP support.

Si todos los archivos se han compilado correctamente, le aparecerá la interfaz de NCORR, tal y como se muestra en la figura 14. Esto significa que NCORR se ha instalado correctamente y puede iniciar el procesamiento.

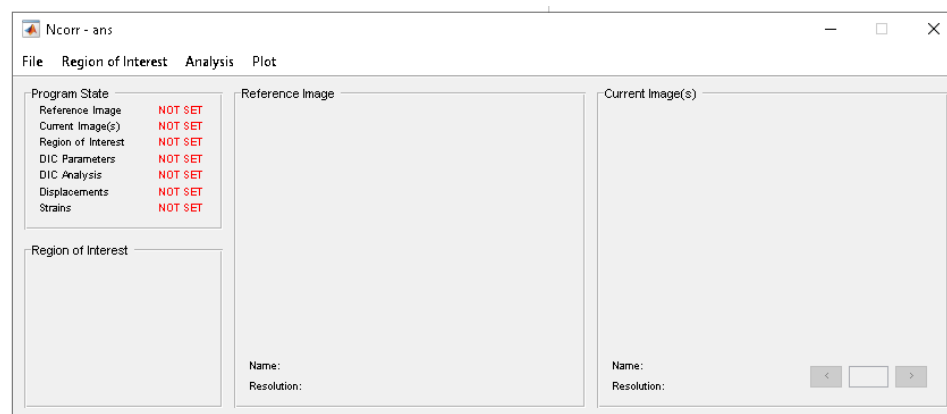


Figura 14. Instalación satisfactoria de NCORR.

2. Procesamiento.

Blaber, ha desarrollado el procesamiento de las imágenes en siete pasos secuenciales, dividiendo el procesamiento de las imágenes en etapas específicas. Esta metodología no solo reduce la carga computacional, sino que también simplifica el flujo de trabajo, haciéndolo más intuitivo. A continuación, se presentan y explican los pasos que debe seguir para analizar imágenes en 2D con el

software NCORR.

2.1. Paso 1, Establezca la imagen de referencia:

El primer paso tiene como nombre “*Set Reference Image*”, inicialmente, debe establecer una imagen de referencia para el procesamiento. Esta imagen debe representar el estado inicial de la probeta, sin ninguna carga aplicada, ya que es la imagen sobre la cual se calcularán y analizarán las imágenes deformadas. Para ello, debe ir la interfaz principal de NCORR, dar clic en “File” y seleccionar la opción “Load Reference Image”, allí, debe seleccionar la imagen de referencia, (Figura 15). Las imágenes cargadas deben tener como formato jpg, tif, png, o bmp.

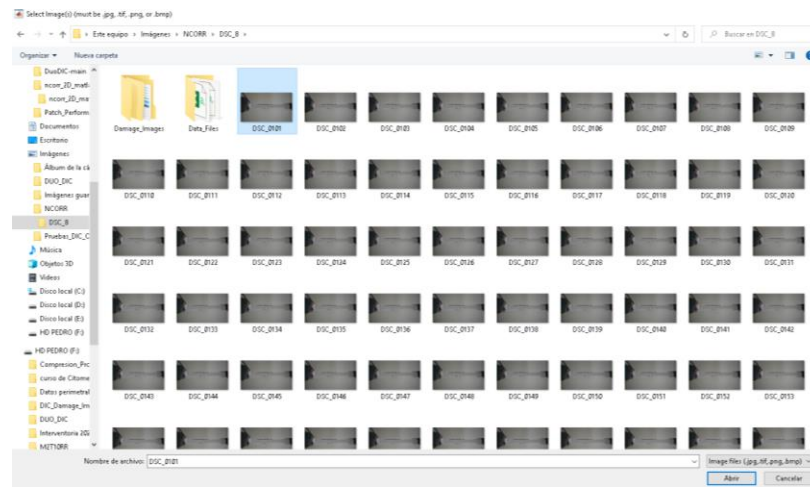


Figura 15. Imagen de referencia, ensayo de tracción en probeta de acero.

2.2. Paso 2, Cargue las imágenes deformadas.

El segundo paso tiene como nombre “*Set Current Images*”, y es allí, donde debe cargar las imágenes deformadas para el procesamiento. Este set de imágenes corresponde con los fotogramas extraídos del video y registran el desarrollo del ensayo hasta la falla. Para ello, debe ir la interfaz principal de NCORR, dar clic en “File” y seleccionar la opción “Load Reference Image”, donde debe seleccionar todas las imágenes deformadas, (Figura 16). Las imágenes cargadas deben tener como formato jpg, tif, png, o bmp.

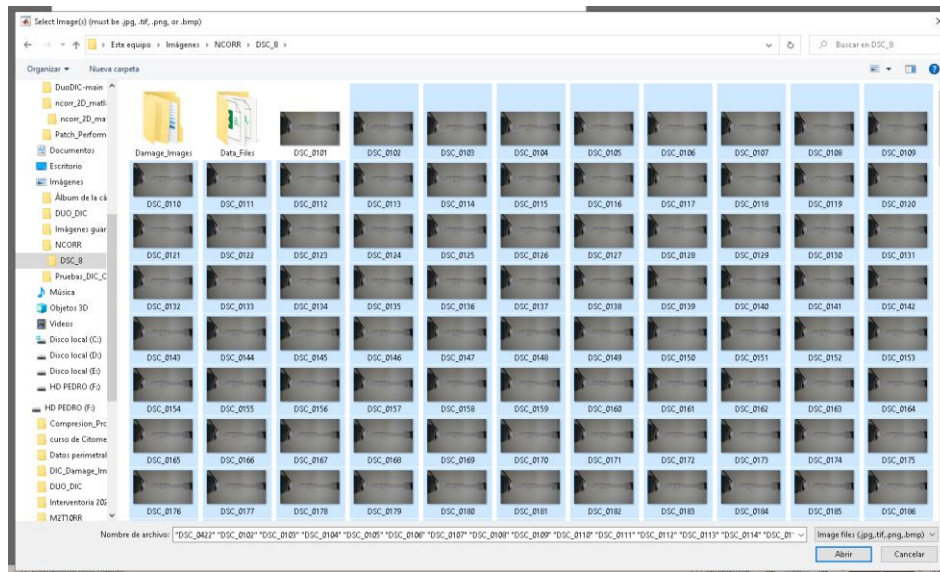


Figura 16. Imágenes deformadas, ensayo de tracción en probeta de acero.

2.3. Paso 3, Establezca la región de interés (ROI)

El tercer paso tiene como nombre “*Set Region of Interest (ROI)*”, en este paso, debe seleccionar en la imagen de referencia la región de interés de la probeta que desea analizar con correlación digital de imágenes. Para ello, el programa cuenta con diversas herramientas de dibujo que le permiten ajustarse a la geometría de las probetas, excluyendo las áreas que no son relevantes para el análisis. Para llevar a cabo este proceso, en la interfaz principal de NCORR, debe dar clic en la pestaña “Region of Interest”, desplegando un menú en el que debe seleccionar “Draw ROI”, esto abrirá una ventana de dibujo donde debe hacer uso de la herramienta “+Poly” para trazar un polígono que englobe completamente la región que desea analizar, (Figura 17). Básicamente, la ROI es una máscara que se aplica sobre la imagen para tomar únicamente los píxeles correspondientes a la región de análisis, disminuyendo la resolución de las imágenes y facilitando la correlación.

Nota: Si al dibujar la ROI en la probeta los bordes quedan muy cercanos al borde de la probeta o a zonas vacías, es probable que el software tenga problemas de correlación en dichos contornos y le genere una advertencia de que puede obtener datos no representativos, es por ello por lo que, debe procurar siempre dejar un pequeño margen entre el borde físico y el que desea analizar con DIC.

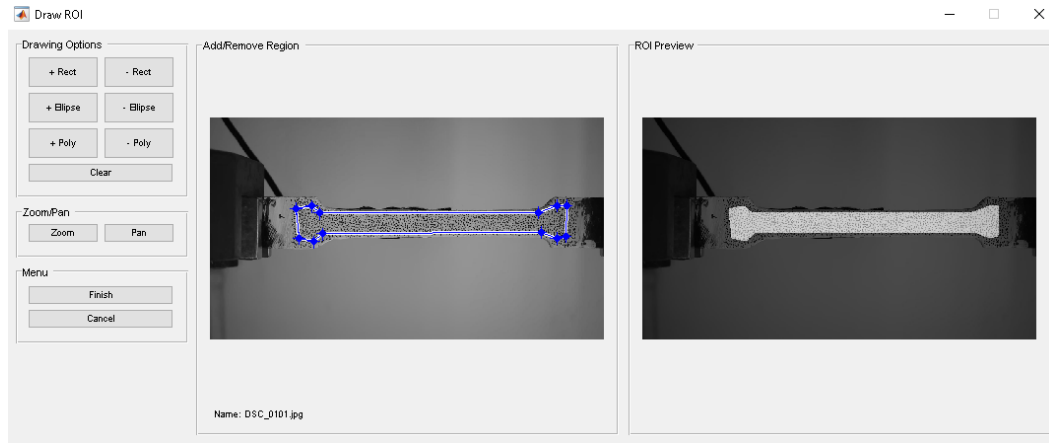


Figura 17. Selección de la ROI sobre la imagen de referencia de la probeta de acero. En la imagen de la izquierda, se encuentra dibujada la ROI con contorno azul, en la imagen de la derecha se previsualiza en blanco la región de la ROI seleccionada y en negro el área de la imagen fuera de la ROI descartada del análisis.

2.4. Paso 4, Establezca los parámetros de DIC para el procesamiento.

El cuarto paso es primordial, ya que de él dependen la calidad y confiabilidad de los resultados que obtenga después del procesamiento, y tiene como nombre “*DIC Parameters*”. En este paso, debe definir todos los parámetros relacionados con el procesamiento de las imágenes, tales como, el tamaño de subset, el tamaño del paso, los criterios de correlación que definen el proceso iterativo hasta encontrar unos valores objetivo, la opción multinúcleo para el procesamiento, el análisis de alta deformación y el análisis discontinuo. Para llevar a cabo este proceso, en la interfaz principal de NCORR, debe dar clic en la pestaña “Set DIC parameters”, desplegando una ventana en el que debe colocar todos los parámetros mencionados de acuerdo con el tipo de ensayo y probeta, finalmente, debe dar clic en “Finish” y luego en “Yes” para continuar con el siguiente paso. En el ensayo de tracción se establecieron los siguientes valores para los diferentes parámetros, (Figura 18), en la parte derecha de la figura se previsualiza la región de interés y el subset seleccionado.

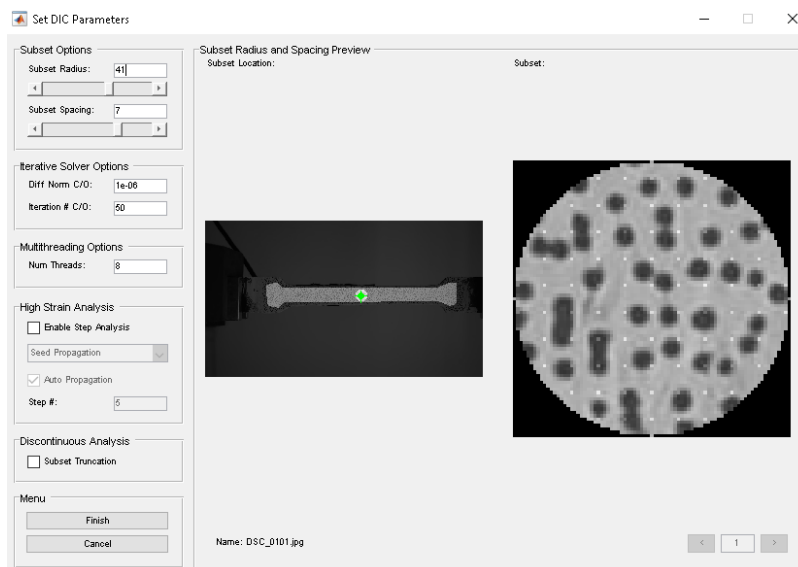


Figura 18. Parámetros de DIC para el procesamiento.

A continuación, se explica detalladamente cada uno de los parámetros y como deben ser definidos.

2.4.1. *Tamaño de subset.*

El tamaño del subset depende directamente de la resolución de las imágenes y de la calidad del patrón de puntos, haciendo referencia al tamaño del punto y la densidad del patrón de puntos. Múltiples estudios y libros como “Digital Image Correlation for Shape and Motion”, de Sutton, apuntan a que se debe seleccionar el subset más pequeño posible que no dé lugar a mediciones con ruido, garantizando que el algoritmo este en la capacidad de correlacionar una imagen de referencia con respecto a la siguiente imagen deformada sin presentar errores. Tamaños de subset grandes implican menor resolución en las mediciones realizadas y tienden a tener un efecto de suavizado en la correlación. La selección de este tamaño por lo general se hace de forma iterativa, revisando si los resultados obtenidos son consistentes y si no se presentan errores. En el caso específico de las probetas de acero sometidas a tensión, se utilizó una herramienta basada en el análisis de los errores de desviación estándar “Standart Deviation Error” para calcular el intervalo de incertidumbre en pixeles del patrón de puntos de puntos a analizar, obteniendo un tamaño de subset óptimo de 41 pixeles en base a la distribución y calidad del patrón de puntos analizados, (Figura 19).

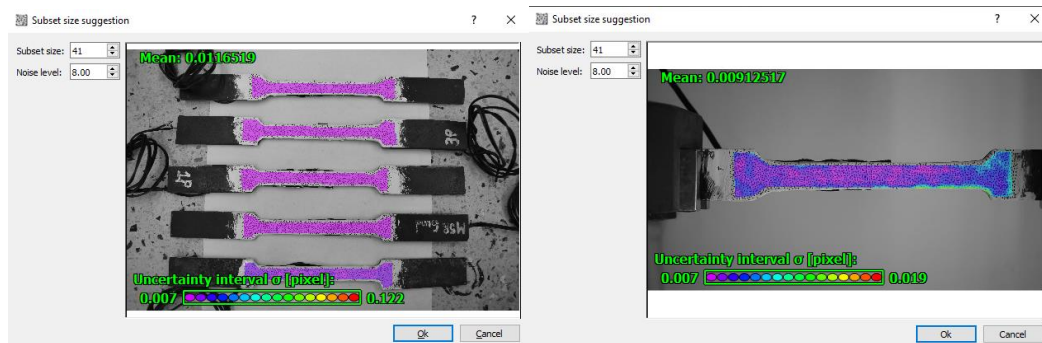


Figura 19. Tamaño de subset sugerido en base a la calidad del patrón de puntos.

Nota: Si el subset seleccionado es muy pequeño y durante el ensayo se presentan agrietamientos o daños significativos en la probeta que alteren las condiciones de superficie del patrón de puntos, o si el desplazamiento relativo entre una imagen y la siguiente es muy grande con respecto al tamaño del subset, es posible que se generen errores de correlación, resultando en zonas con ausencia de datos, teniendo que incrementar el tamaño del subset para solucionar el error. Otro factor que influye en el tamaño del subset son las condiciones superficiales de la probeta, ya que, si la probeta tiene en su superficie elementos que le generen irregularidades fuera del plano como el caso de los muros de concreto reforzado con platinas de acero que quedan salidas de la superficie, es necesario un tamaño mayor de subset para evitar errores de correlación en las zonas de transición entre cambios de profundidad.

2.4.2. *Tamaño del paso.*

El tamaño del paso o “Step Size” hace referencia a la distancia entre subsets, siendo un parámetro que determina la resolución espacial de los datos y la precisión de las mediciones de

desplazamiento y deformación. Un tamaño de paso pequeño resulta en mayor resolución espacial de datos, pero incrementa la capacidad computacional necesaria, en el caso contrario, se disminuye la resolución espacial de los datos, pero se disminuye el tiempo computacional, (Figura 20). El tamaño del paso depende de la aplicación específica (probetas con deformaciones muy grandes o pequeñas), y directamente de la resolución de las imágenes y la calidad del patrón de puntos, haciendo referencia al tamaño del punto y la densidad del patrón de puntos. Para las probetas de acero bajo tracción se utilizó un tamaño de paso de 7 píxeles, este valor se puede dejar por defecto para la mayoría de los ensayos.

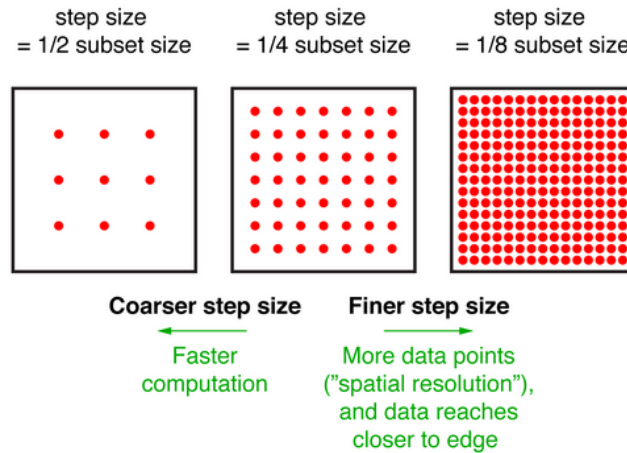


Figura 20. Influencia del tamaño del paso “Step Size” en el análisis con correlación digital de imágenes [2].

2.4.3. Criterios de correlación.

NCORR utiliza como solucionador iterativo la técnica de alineación de imágenes compuestas inversas. Esta técnica ajusta la imagen de referencia a las imágenes deformadas de tal manera que se minimice la diferencia entre ellas, tal y como la diferencia entre los valores de píxeles para las imágenes. Para ello, el algoritmo realiza un análisis exhaustivo que itera hasta encontrar la transformación que mejor alinee la imagen de referencia con respecto a las imágenes deformadas, que en otras palabras es componer inversamente la transformación hasta que se alcance una buena alineación de imágenes. Los valores propuestos por el software son bastante buenos y puede dejarlos establecidos por defecto. Si desea llevar a cabo un análisis más rápido, que requiera menor capacidad computacional puede reducir el número de iteraciones y aumentar el valor de la diferencia.

2.4.4. Opción multinúcleo.

El número de núcleos utilizados para el procesamiento depende de su capacidad computacional, en este análisis se utilizaron 8 núcleos de forma simultánea para el procesamiento.

2.4.5. Análisis de alta deformación.

Para el ensayo de tracción en platinas se desactivo esta opción. Debe activarla cuando los materiales ensayados hayan sido sometidos a condiciones de deformación extrema. En este

caso, el algoritmo puede presentar problemas si la imagen de referencia presenta cambios importantes con respecto a las últimas imágenes deformadas del ensayo, no encontrando adecuadamente las posiciones de los subsets y generando errores de correlación. Al activarla, el software soluciona este error, actualizando la imagen de referencia, la región de interés y sumando los campos de desplazamiento acumulados para diferentes niveles de deformación según sea necesario.

2.4.6. *Análisis discontinuo.*

Para el ensayo de tracción en platinas se desactivo esta opción puesto que no se presentan grietas hasta el momento de la falla. El análisis discontinuo se debe activar para elementos que presenten niveles de agrietamiento importantes, tal y como vigas de concreto sometidas a flexión o los muros de concreto reforzado bajo carga cíclica que presentan grietas por flexión y cortante en toda superficie. Este tipo de análisis hace uso de una función que trunca los subsets evitando que estos se extiendan alrededor de las grietas, ya que, en las zonas adyacentes a estas, se producen errores en la correlación y distorsiones en los desplazamientos, tal y como muestra Blaber [1] en la figura 21.

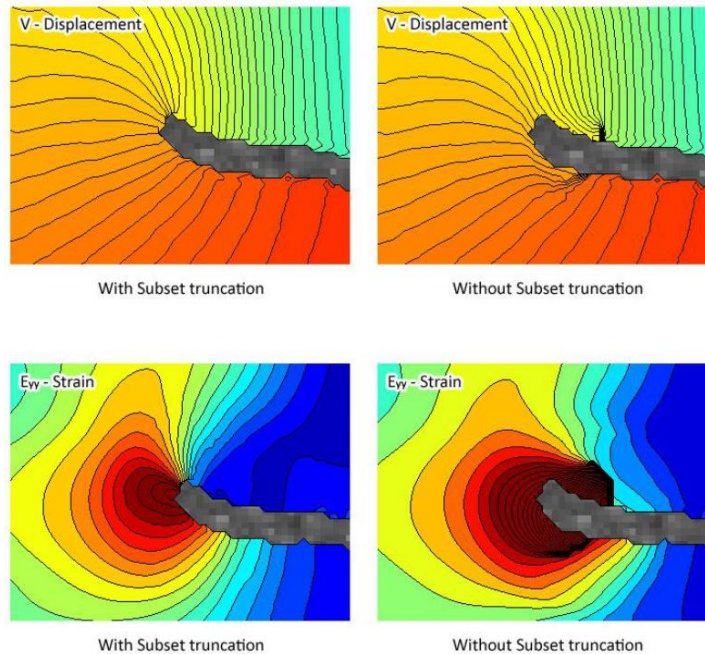


Figura 21. Disminución de errores de correlación en zonas adyacentes a agrietamientos de la probeta mediante la utilización del análisis discontinuo. Al lado izquierdo se muestra el procesamiento con análisis discontinuo y al lado derecho sin análisis discontinuo [1].

2.5. Paso 5, **Análisis DIC.**

Para llevar a cabo el análisis DIC, en la interfaz principal de NCORR, debe dar clic en la pestaña “Analysis” y luego en la opción “Perform DIC Analysis”. Con ello, se iniciará el análisis de las imágenes y deberá seguir los siguientes pasos para ejecutar el procesamiento de forma satisfactoria.

2.5.1. Selección de la región de interés.

Una vez iniciado el análisis se desplegará una ventana donde debe seleccionar la región de interés ROI que desea analizar durante el procesamiento, por lo general, y para el ensayo de tracción en las probetas de acero, se tiene una única región de interés a analizar. Para ello, debe dar clic en “Select Region”, luego seleccione la región de interés (región sombreada en blanco), y, por último, dar clic en “Finish”, (Figura 22).

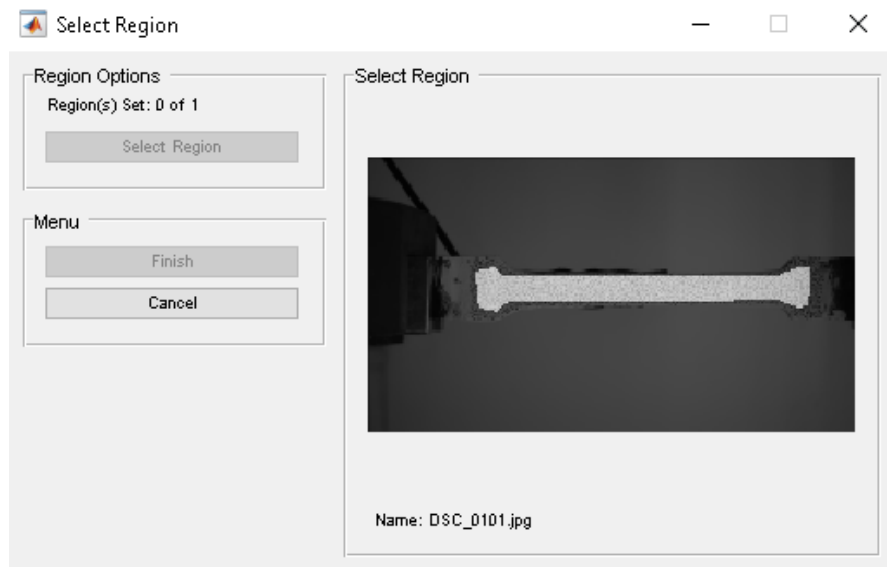


Figura 22. Selección de la región de interés (ROI).

2.5.2. Establecer los “Seeds” o Subregiones de correlación.

Se desplegará una ventana en la que debe establecer la ubicación de las subregiones de correlación para permitir el procesamiento en paralelo, aprovechando al máximo la capacidad del procesador y reduciendo el tiempo de análisis (siempre y cuando haya activado previamente la opción de procesamiento multinúcleo). Para ello, debe dar clic en “Set Seeds”, luego distribuya de forma uniforme los centros de las subregiones procurando que tengan el mismo tamaño y una geometría regular, si el procesamiento se va a desarrollar con un único núcleo solo deberá ubicar el centro de la ROI. Además, debe garantizar que el centro de las subregiones no se salga del campo de visión de las cámaras durante el desarrollo del ensayo, esto generaría graves errores de correlación e implicaría reposicionar las subregiones. En el caso del procesamiento de las probetas de acero a tracción, se activó la opción de procesamiento con multinúcleo ya que el procesador contaba con 8 núcleos, por lo que la ROI se divide en 8 subregiones de procesamiento en paralelo, (Figura 23). Por último, de clic en “Finish” para que el software empiece a calcular la ubicación de las subregiones y los subsets para todas las imágenes del ensayo, este proceso puede ser algo lento.

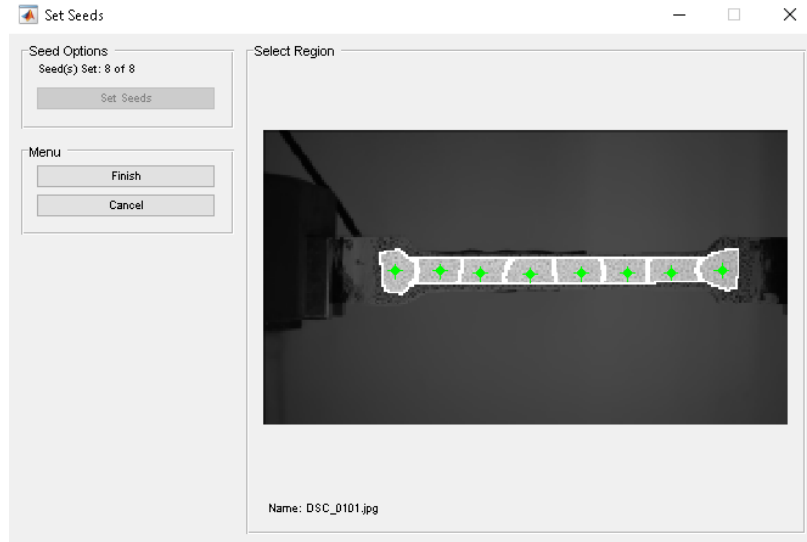


Figura 23. Selección de la región de interés (ROI).

2.5.3. Chequeo de subregiones de correlación.

Una vez terminado este primer procesamiento, se desplegará la vista previa de cada una de las subregiones y subsets de la ROI para cada una de las imágenes con respecto a la imagen de referencia. Se debe chequear entonces para cada una de las subregiones que el subset de referencia coincida con el subset de la última imagen deformada, esto de manera visual, (Figura 24), y finalmente dar clic en “Finish” para continuar con el procesamiento de las imágenes, (Figura 25).

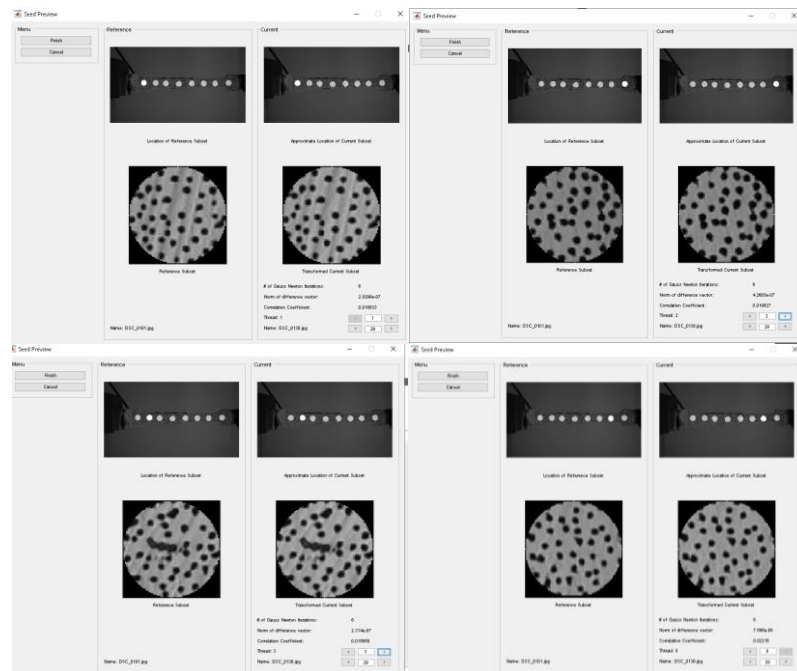


Figura 24. Subregiones y subsets de la ROI para cada una de las imágenes con respecto a la imagen de referencia

Nota: *Sí la probeta ensayada ha sido sometida a condiciones de deformación extremas, es posible que se presenten errores en este paso y no se correlacione de buena manera la posición de los subsets deformados con respecto a los de referencia. En dicho caso, debe volver al paso anterior y modificar los parámetros de DIC, activando el análisis de alta deformación.*

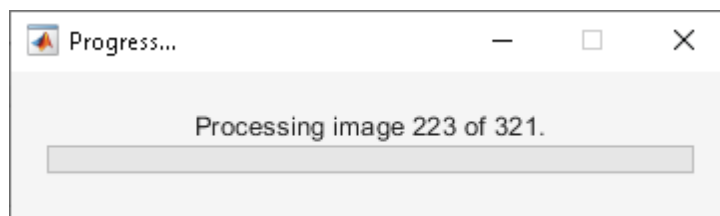


Figura 25. Procesamiento de imágenes.

Hasta este momento el procesamiento esta casi terminado, en la interfaz principal de NCORR se encuentra el estado de cada uno de los pasos del flujo de trabajo del programa. En verde y con la palabra “SET” se encuentran aquellos pasos que ya se han terminado, y en rojo y con la palabra “NO SET” se encuentran los pasos pendientes para terminar el procesamiento. Este tipo de interfaz con lista de chequeo le facilita al usuario el desarrollo del procesamiento de forma intuitiva, (Figura 26).

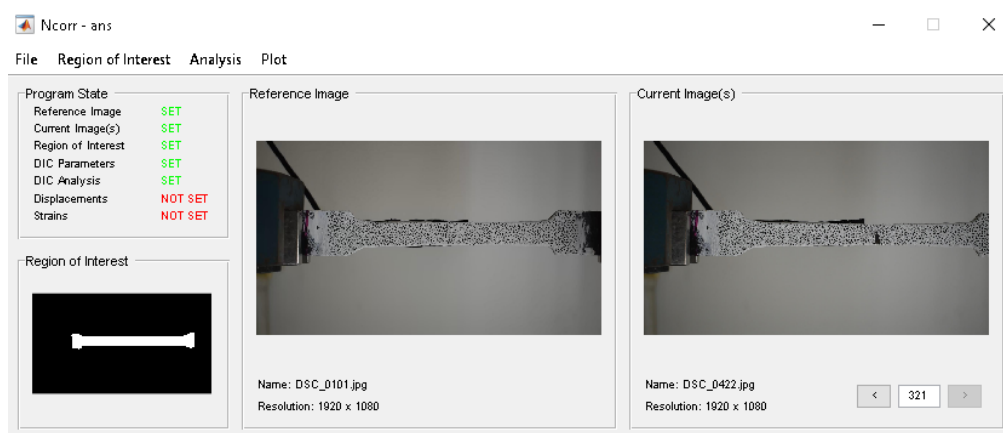


Figura 26. Interfaz principal de NCORR con el estado actual de los pasos del procesamiento.

2.6. Paso 6, Formato de desplazamientos.

En esta etapa, se realiza la conversión entre valores obtenidos en pixeles a unidades de medida reales con sentido físico, específicamente, se hace la conversión de pixeles a milímetros. Para ello, en la interfaz principal de NCORR, haga clic en la pestaña “Analysis” y luego seleccione la opción “Format Displacements”. Al hacerlo, se desplegará una ventana, (Figura 27), donde debe dar clic en la opción “Get Unit Conversion”. Esto desplegara otra ventana en la que debe cargar una imagen de calibración (que puede ser la imagen de referencia), (Figura 28), y sobre la cual debe dibujar una línea con una longitud conocida, (Figura 29), para obtener un factor de conversión de pixeles a milímetros, (Figura 30). Para terminar, de clic en “Finish” para que el software aplique la conversión y les dé formato a los campos de desplazamiento de todas las imágenes.

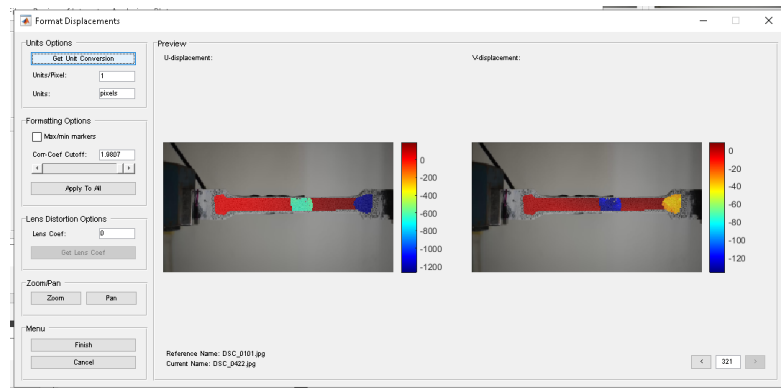


Figura 27. Interfaz principal para darle formato a los desplazamientos.

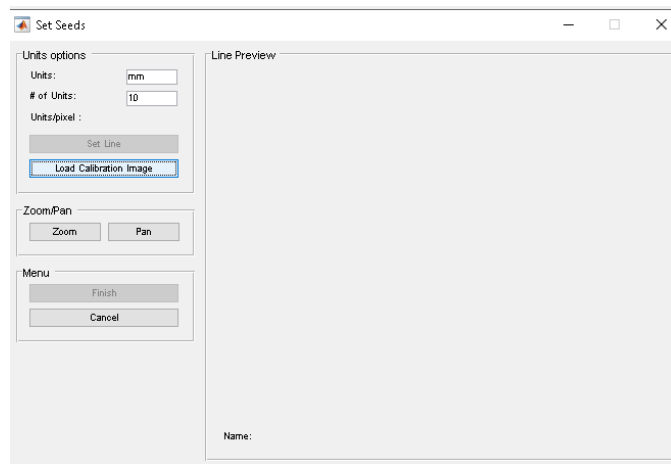


Figura 28. Interfaz para cargar la imagen de referencia.

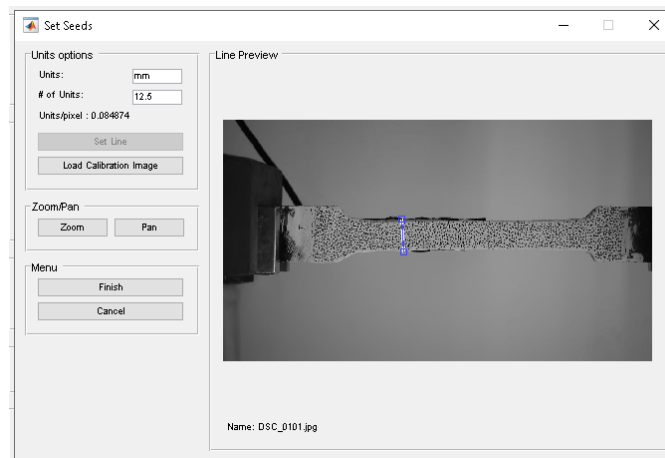


Figura 29. Longitud de referencia para el cálculo del factor de conversión sobre la imagen de referencia.

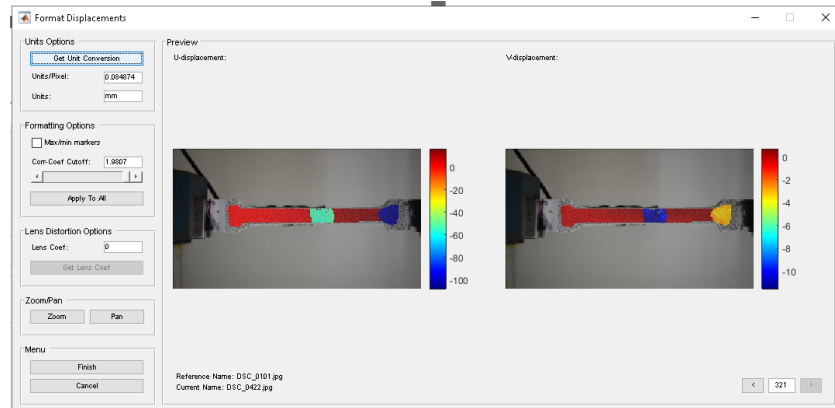


Figura 30. Factor de conversión calculado de pixeles a milímetros. Se obtuvo un valor de 0.084 mm/píxel.

2.7. Paso 7, Cálculo de deformaciones.

En este último paso, NCORR calcula los tensores de deformación de Green-Lagrangian y Euler-Almansi a partir de los datos de desplazamiento utilizando el ajuste del plano por mínimos cuadrados. El cual es basado en el trabajo de Bing Pan sobre el cálculo de deformaciones. Estos campos de deformaciones permiten ver con claridad la progresión de los estados de daño de las probetas, sus patrones de agrietamiento y las zonas de concentración de deformaciones en escala de colores. Esto permite llevar a cabo un análisis de las probetas mucho más completo, y con mayores variables de análisis. Para ello, en la interfaz principal de NCORR, haga clic en la pestaña “Analysis” y luego seleccione la opción “Calculate Strains”. Al hacerlo, se desplegará una ventana, (Figura 31), donde únicamente debe introducir el valor del radio de deformación y dar clic en “Finish” para que se inicie el cálculo de deformaciones.

Nota: Este valor debe ser lo más pequeño posible que no dé lugar a mediciones de deformación con ruido. Por defecto el software sugiere un valor de 15 pixeles, pero para el ensayo de tracción en las probetas de acero se tomó un radio de 2 pixeles.

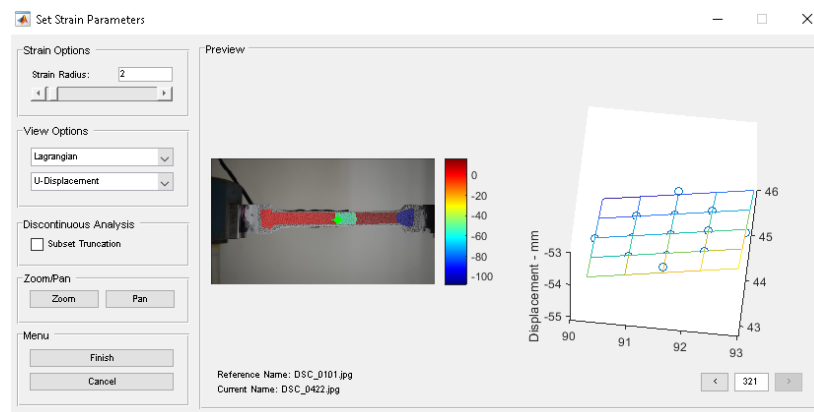


Figura 31. Interfaz de parámetros DIC para el cálculo de los campos de deformaciones.

Cuando termine el cálculo de deformaciones, el procesamiento de las imágenes estará finalizado. En la interfaz principal de NCORR se encuentra el estado de todos los pasos del

flujo de trabajo del programa, resaltados en color verde y con la palabra “SET”, indicando que el usuario ha completado cada uno de ellos, (Figura 32). Para guardar los resultados del procesamiento, en la interfaz principal debe dar clic en la pestaña “File” y luego en la opción “Save Data”, con ello, se exportará un archivo .mat con el resultado de cada uno de los pasos y de la correlación digital de imágenes. Este archivo debe ser postprocesado con Matlab para obtener mediciones de desplazamiento y deformación en cualquier punto que sea de interés, siempre y cuando se encuentre dentro de la ROI seleccionada.

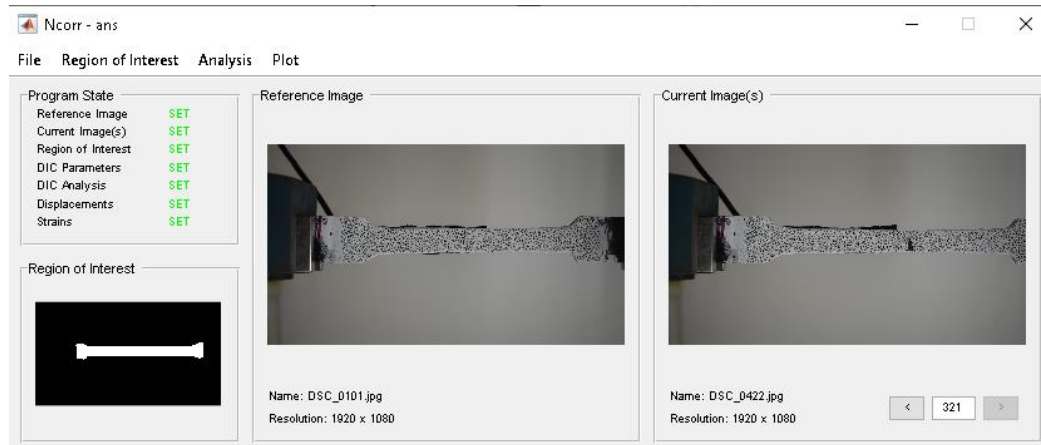


Figura 32. Interfaz principal de NCORR con el análisis terminado.

Desde la interfaz principal de NCORR, únicamente puede plotear los resultados y exportar los frames procesados de forma individual o generar un GIF acumulativo. En la figura 33, se observa la deformación unitaria ϵ_{xx} en la dirección horizontal de la probeta, calculada con el tensor de Green- Lagrangian, resaltando en color rojo la zona donde se concentran las deformaciones durante la tracción. En la figura 34, se observa la deformación unitaria ϵ_{yy} en la dirección vertical de la probeta, mostrando en azul la forma en cómo se reduce la sección a medida que se desarrolla el ensayo.

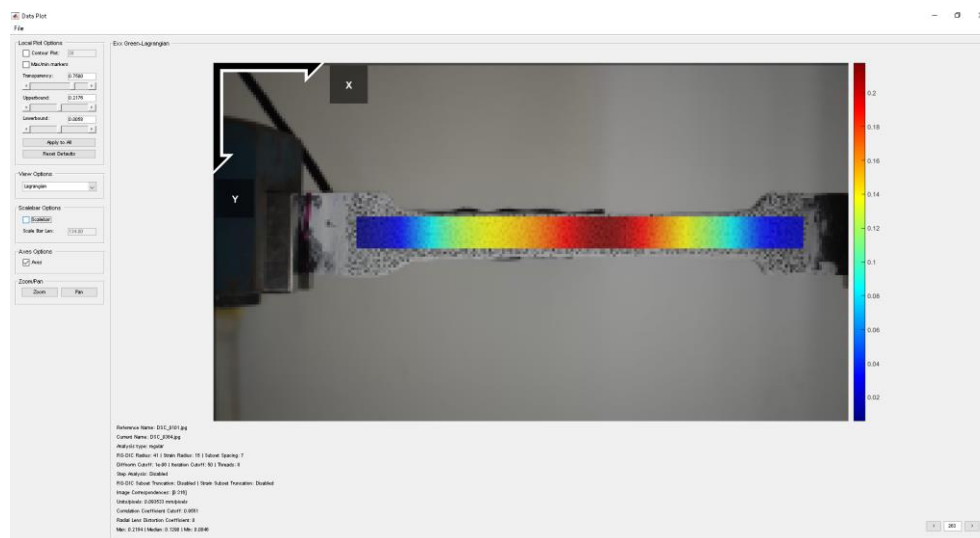


Figura 33. Deformación unitaria ϵ_{xx} calculada con el tensor de Green- Lagrangian.

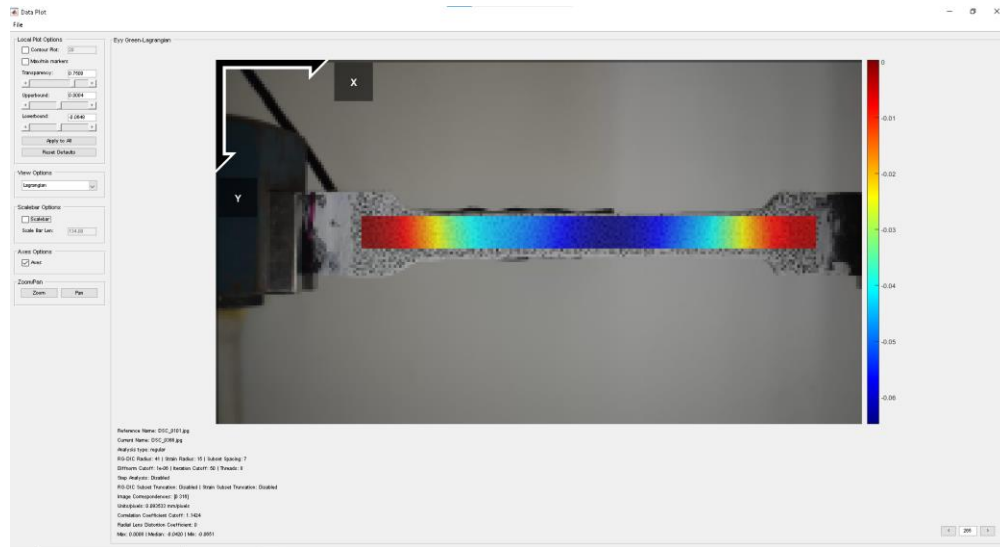


Figura 34. Deformación unitaria ϵ_{yy} calculada con el tensor de Green- Lagrangian.

3. 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.
- [2] M. A. Sutton, “Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements,” *Springer Handb. Exp. Solid Mech.*, pp. 565–600, 2008, doi: 10.1007/SpringerReference_61945.

**10.2. ANEXO 2: MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D
USANDO EL SOFTWARE LIBRE DuoDIC**

**IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ESTÉREO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE
IMÁGENES PARA MEDICIÓN DE CAMPOS DE DESPLAZAMIENTO EN 3D A BAJO
COSTO.**

SEBASTIÁN SUÁREZ AGUDELO.

Tutor:

PETER THOMSON Ph.D.

Asesor:

ROGER ORTEGA CARABALLO Ph.D.



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2023

Tabla de contenido

1. Pre-Procesamiento.	99
1.1.Rotación de imágenes	100
1.2.Organización:	101
1.3.Software libre DuoDIC.	101
1.4.Requerimientos del software libre DuoDIC.....	102
1.4.1. Requerimientos de hardware.....	102
1.4.2. Requerimientos de sistema operativo.....	102
1.4.3. Requerimientos de Matlab	102
1.4.4. Configuración MEX.....	103
1.5.Instalación del software libre DuoDIC.	104
2. Procesamiento.	105
2.1.Paso 1, calibración estéreo:.....	106
2.2. Paso 2: 2D-DIC utilizando Ncorr.....	113
2.3. Paso 3: DuoDIC reconstrucción 3D.....	123
2.4. Paso 4: DuoDIC Post procesamiento.....	125

MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D USANDO EL SOFTWARE LIBRE DuoDIC

Este manual es una integración del manual de DuoDIC (Duo Digital Image Correlation) desarrollado por la Dra. Dana Solav, del Technion- Israel Institute of Technology, aplicado al procesamiento de las imágenes de un ensayo de muros de concreto reforzado bajo carga cíclica. Se recopilan mis recomendaciones, instrucciones y experiencias para que el procesamiento de las imágenes sea satisfactorio y se obtengan resultados confiables, implementando de forma integral el sistema estéreo de correlación digital de imágenes de bajo costo que he desarrollado junto al grupo de investigación G7 de la Universidad del Valle, aplicable a cualquier ensayo.

1. Pre-Procesamiento.

Una vez terminado el ensayo, guarde las imágenes de cada cámara en carpetas separadas, como convención utilice configuraciones binarias, la carpeta 0 para las imágenes capturadas con la cámara izquierda, y carpeta 1 para las imágenes capturadas con la cámara derecha, ver figura 1.

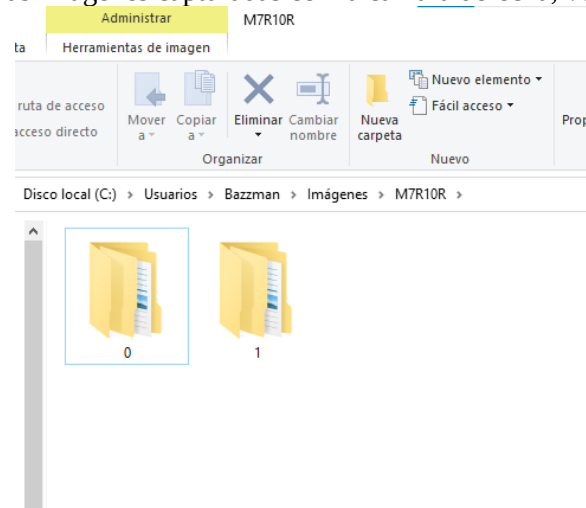


Figura 1. Imágenes del ensayo separadas en carpetas.

Por lo general, las imágenes capturadas se encuentran rotadas con respecto al eje vertical (ver figura 2), esto debido a que la orientación de las cámaras esta ajustado para que el campo de visión de estas abarque la mayor cantidad de pixeles sobre la región de interés, por lo que previo al procesamiento en el software es necesario realizar ajustes para dejar las imágenes de ambas cámaras orientadas en el mismo sentido y verticales, tal y como se evidencia a continuación.

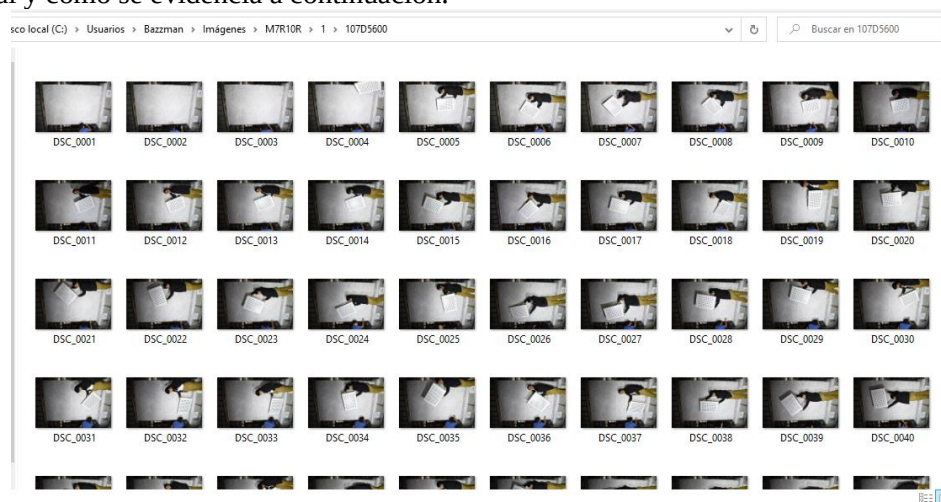


Figura 2. Imágenes brutas del ensayo, rotadas con respecto a la vertical.

1.1. Rotación de imágenes.

El script RotateBatch está diseñado para facilitar la rotación de las imágenes de forma sencilla y automatizada (Figura 3). Únicamente el usuario debe introducir el ángulo de rotación de las imágenes con respecto al eje vertical, tenga en cuenta que una rotación positiva en Matlab va en contra de las manecillas del reloj. Para comenzar con el proceso realice los siguientes pasos.

Instrucciones:

- 1.1.7. Ubique una copia del script dentro de la carpeta donde se encuentran los pares de imágenes de la cámara 0 y la cámara 1.
- 1.1.8. Modifique la línea 14 del script “RotateBatch”, dentro del comando “imrotate” el ángulo de rotación de las imágenes con respecto al eje vertical para que los pares de imágenes queden con la misma orientación (Figura 4).

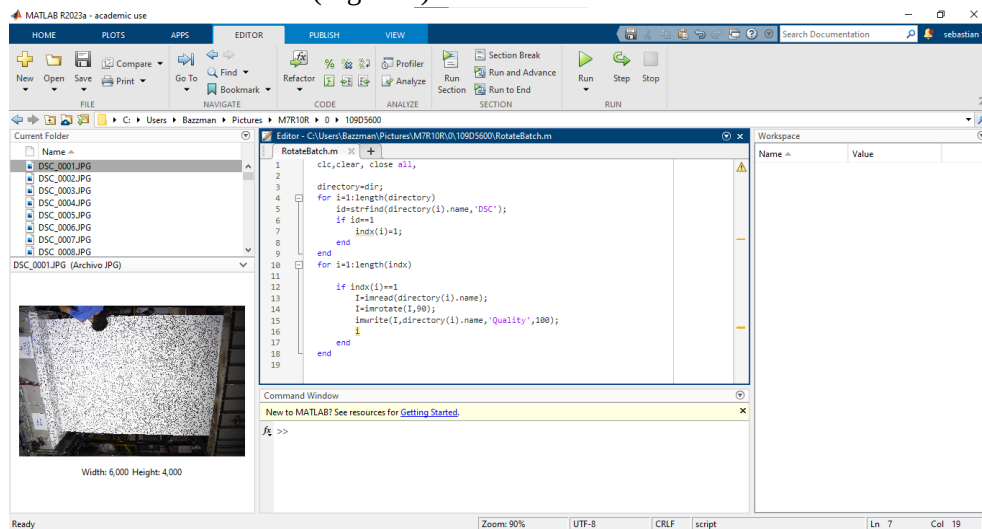


Figura 3. Script “RotateBatch” para rotación de imágenes.

- 1.1.9. Ejecute el script para iniciar el proceso.

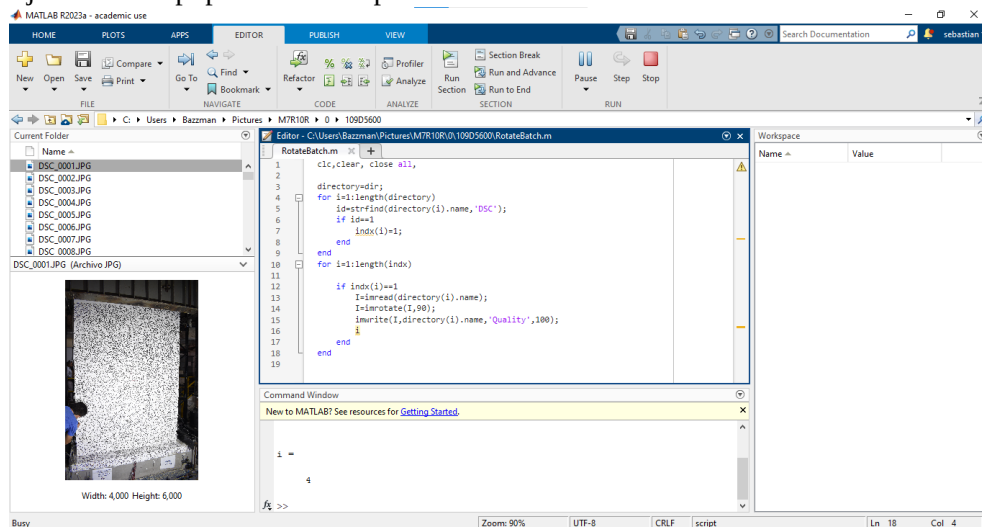


Figura 4. Imágenes rotadas después de ejecutado el script “RotateBatch”.

Nota: Por lo general, las imágenes tomadas con la cámara derecha deben rotarse 90 grados negativos y las imágenes tomadas con la cámara izquierda deben rotarse 90 grados positivos.

1.2. Organización de imágenes.

Una vez rotadas las imágenes, separe las imágenes de speckle de las de calibración. Estas últimas y para ambas cámaras deben ubicarse en subcarpetas dentro de una nueva carpeta denominada “Step1_Calibration_Images” (Figura 6). Mientras que las de speckle en la carpeta “Step2_Speckle_Images” (Figura 7). Tendrá como resultado un conjunto de imágenes de calibración y un conjunto de imágenes de speckle.

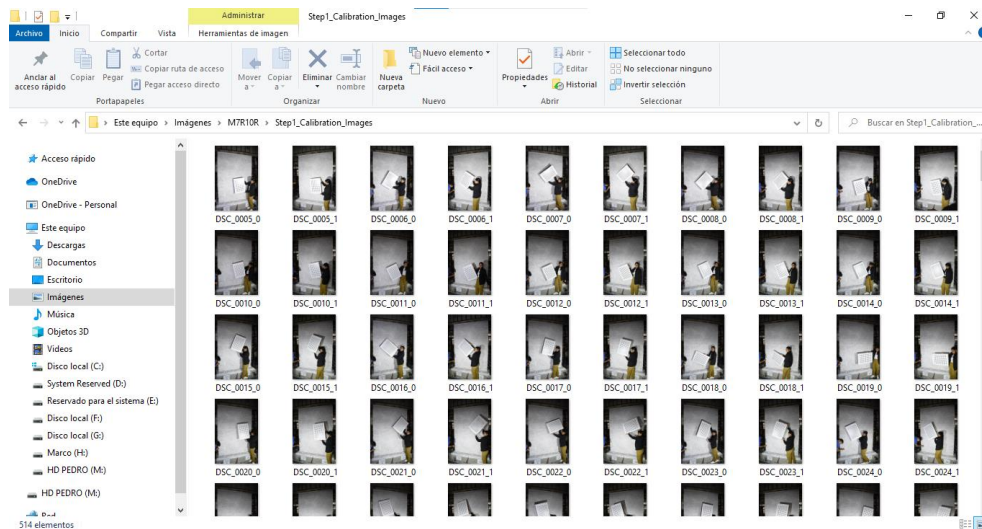


Figura 5. Imágenes de calibración orientadas en el mismo sentido y con la nomenclatura requerida por el software.

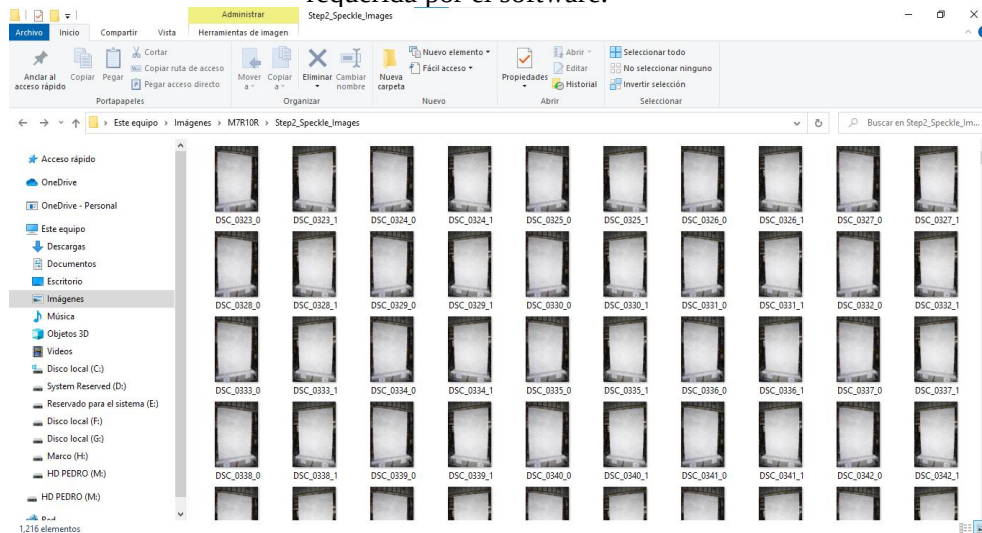


Figura 6. Imágenes de speckle orientadas en el mismo sentido y con la nomenclatura requerida por el software.

1.3. Software libre DuoDIC.

La correlación digital de imágenes en 3d “3D DIC”, se lleva a cabo en Matlab haciendo uso del software de código abierto DuoDIC (Duo Digital Image Correlation) desarrollado por la Dra.

Dana Solav, del Technion- Israel Institute of Technology. Este software abierto, permite la implementación total del sistema de 3D DIC de bajo costo que se ha venido desarrollando en la Universidad del Valle con el grupo de investigación G7. DuoDIC tiene cualidades que lo destacan de otros softwares de código abierto, ya que permite llevar a cabo el procesamiento DIC de forma fácil e intuitiva, con una interacción mínima con la sintaxis de Matlab que pueda generar errores importantes, y utilizando algoritmos de alto nivel. DuoDIC integra el software Ncorr con los algoritmos de calibración de Matlab para reconstruir superficies tridimensionales a partir de pares de imágenes estéreo. Además, contiene algoritmos que permiten exportar medidas de desplazamiento, deformación, e imágenes de progresión del daño, con herramientas equiparables a softwares pagos como VIC-3D9.

Este manual es entonces, la integración entre el manual de base propuesto por Solav, y la recopilación de mi experiencia con el procesamiento de muros de concreto reforzado sometidos a carga cíclica.

1.4. Requerimientos del software libre DuoDIC.

1.4.1. *Requerimientos de hardware*

Debido a la gran cantidad de pares de imágenes de speckle de los ensayos (alrededor de 600 pares) y a la alta resolución de estas (6000x4000 pixeles), es necesario un buen equipo de procesamiento que cumpla por lo menos con las siguientes especificaciones:

- Procesador: AMD Ryzen 7 3700x (8 núcleos, 16 hilos, hasta 4.4 GHz) o superior.
- Memoria RAM: 64GB DDR3 o superior.

1.4.2. *Requerimientos de sistema operativo*

S.O.: Windows 10 64 Bit, Windows 11 64 Bit.

1.4.3. *Requerimientos de Matlab*

DuoDIC fue desarrollado en Matlab, versión R2019b, y se ha testeado en la versión R2022a y R2023a.

Para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes con DuoDIC, es necesario instalar los siguientes Toolbox de Matlab, ellos contienen diferentes funciones que serán utilizadas durante el flujo de trabajo:

- Image Processing Toolbox

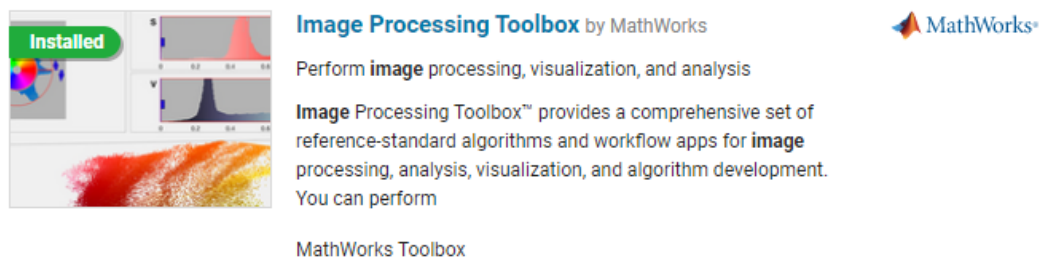
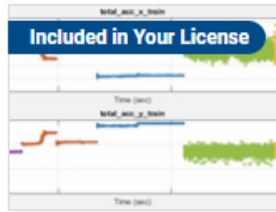


Figura 7. Image Processing Toolbox.

- Statistics and Machine Learning Toolbox



Statistics and Machine Learning Toolbox by MathWorks



Analyze and model data using **statistics** and machine learning

Statistics and Machine Learning Toolbox™ provides functions and apps to describe, analyze, and model data. You can use descriptive **statistics**, visualizations, and clustering for exploratory data

MathWorks Toolbox

Figura 8. Statistics and Machine Learning Toolbox.

- Computer Vision Toolbox



Computer Vision Toolbox by MathWorks



Design and test **computer** vision, 3D vision, and video processing systems

Computer Vision Toolbox™ provides algorithms, functions, and apps for designing and testing **computer** vision, 3D vision, and video processing systems. You can perform object detection and tracking, as

MathWorks Toolbox

Figura 9. Computer Vision Toolbox.

1.4.4. Configuración MEX.

Debido a que DuoDIC es una integración del software de 2D-DIC Ncorr, es necesario instalar un compilador de C++, ya que parte del código de Ncorr utiliza funciones programadas en dicho lenguaje. Mayores detalles pueden encontrarse en el manual de instrucciones de Ncorr, que está incluido en DuoDIC\lib_ext\ncorr_2D_matlab-master y también en los siguientes enlaces: <http://www.ncorr.com/> and https://github.com/justinblaber/ncorr_2D_matlab. Se recomienda instalar el software Microsoft Visual Studio C++, ver figura 10, ya que fue testado para el procesamiento de los muros y 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: <https://visualstudio.microsoft.com/es/>. Por el contrario, no se recomienda instalar el compilador sugerido por Matlab “MinGW64 Compiler (C++)”, ya que únicamente permite llevar a cabo el procesamiento con un núcleo, desaprovechando la capacidad del procesador.

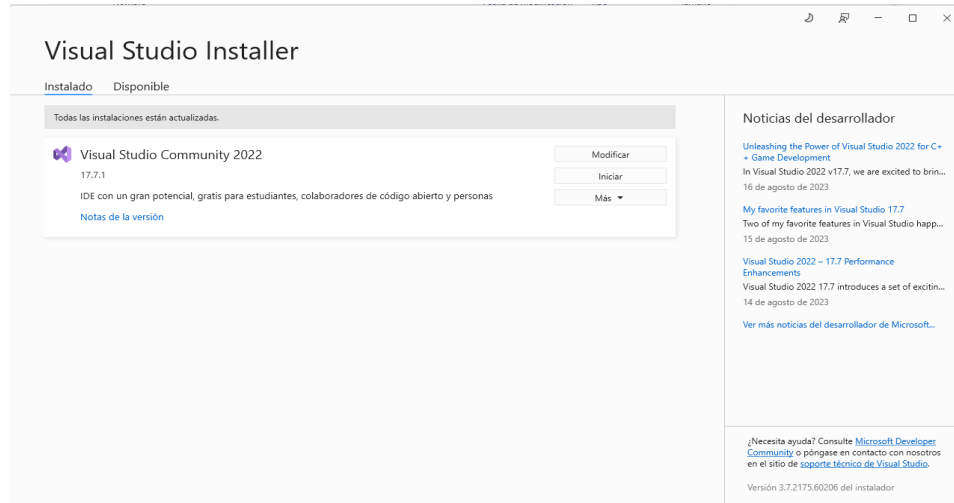


Figura 10. Instalador de Microsoft Visual Studio Community 2022.

Cuando instale el compilador de C++, en el “command window” pegue la siguiente instrucción `mex -setup c++`, esto para comprobar de que se ha instalado correctamente el compilador de C++ en Matlab. Si la instalación es correcta, debe aparecer un mensaje como el de la figura 11.

```
>> mex -setup c++
MEX configured to use 'Microsoft Visual C++ 2022' for C++ language compilation.
```

Figura 11. Comprobación en Matlab de la instalación del compilador de C++.

1.5. Instalación del software libre DuoDIC.

Una vez haya instalado el compilador de C++, abra Matlab, y en el directorio ubique la ruta donde tiene guardado DuoDIC, luego, en el “command window” pegue la siguiente instrucción: `install_DuoDIC`. 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, tal como se muestra en la figura 12. Este comando solo debe ejecutarse una única vez. Al terminar, aparecerá un cuadro de dialogo advirtiendole que faltan archivos compilados, de clic en OK para continuar. Aparecerá un segundo cuadro de dialogo de OpenMP, ver figura 13, 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 un valor numérico, en mi caso se utilizarán los 8 núcleos del procesador. De clic en *Finish* para terminar la instalación

```

Command Window
>> mex -x64 -O3
Installing standard_datatypes... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_datatypes... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_lib... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formmask... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formregions... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formboundary... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formthreaddiagram... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_formunion... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_extrapdata... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_adddisp... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_convert... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.
Installing ncorr_alg_display... Please wait
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'.
MEX completed successfully.

```

Figura 12. Compilación de archivos de Ncorr y MEX.

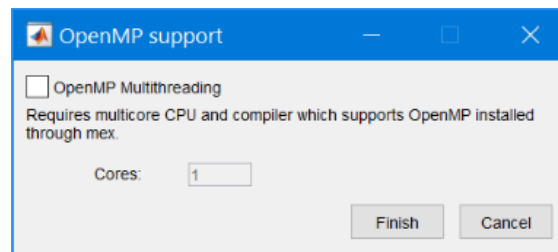


Figura 13. Cuadro de diálogo de OpenMP support.

Si todos los archivos se han compilado correctamente, le aparecerá la interfaz de Ncorr, tal y como se muestra en la figura 14. Esto significa que Ncorr y DuoDIC se han instalado correctamente y se puede iniciar el procesamiento.

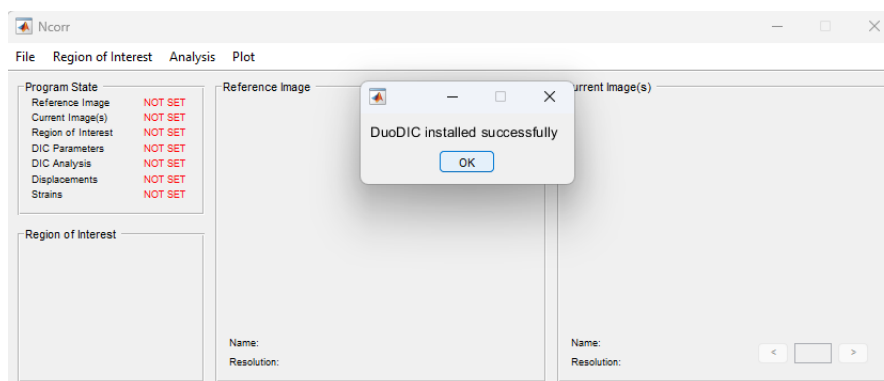


Figura 14. Instalación satisfactoria de DuoDIC.

2. Procesamiento.

Solav, ha desarrollado el software en cuatro scripts principales, dividiendo el procesamiento de las imágenes por pasos. Con ello, se disminuye la demanda computacional y se vuelve intuitivo el flujo de trabajo, ver figura 15.

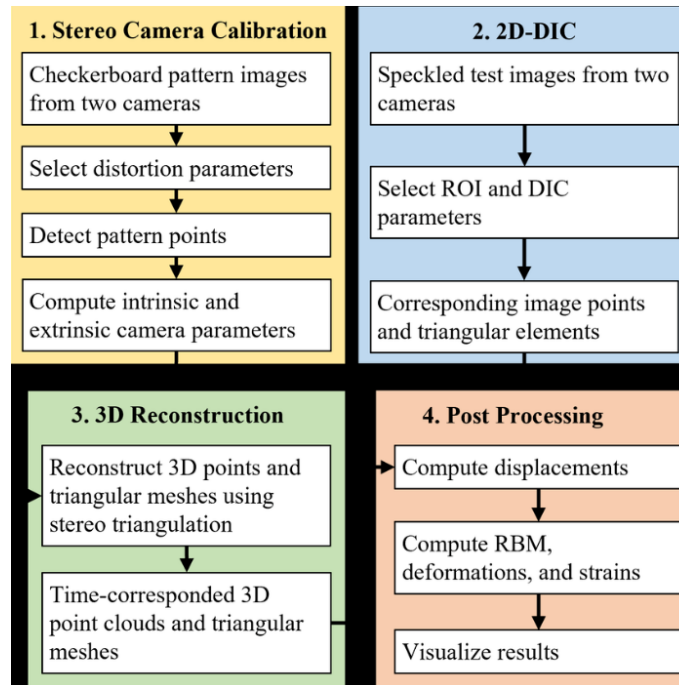


Figura 15. Flujo de trabajo del software DuoDIC.

2.1. Paso 1: calibración estéreo.

El primer paso tiene como nombre *DuoDIC_STEP1_Stereo_calibration*, y es el script principal para llevar a cabo la calibración estéreo de ambas cámaras, calculando los parámetros extrínsecos e intrínsecos de las cámaras necesarios para desarrollar la reconstrucción 3d del elemento ensayado. La calibración permite encontrar en base a la geometría epipolar, las distancias focales y los puntos principales de las cámaras, además, determina la transformación de coordenadas de las cámaras a partir de la obtención de la matriz de rotación y el vector de traslación que relaciona el sistema coordenado de una cámara con el de la otra. Este paso utiliza los pares de imágenes del patrón de calibración de ajedrez para calcular los parámetros de las cámaras.

Nota: Los resultados de la calibración y sus respectivos errores de reproyección dependerán de la calidad del patrón de calibración, las condiciones de iluminación, la sincronización entre cámaras al momento de hacer capturas, y la configuración propia de las cámaras que debe ser la misma para ambas. Si se presentan movimientos en el sistema, hay variaciones en el zoom o enfoque de las cámaras luego de terminada la fase de calibración, debe repetirse dicha fase ya que los parámetros varían y se invalida la reconstrucción 3d.

A continuación, se presentan los pasos que debe seguir para llevar a cabo la calibración estéreo:

- 2.1.1. En el “Current Folder” de Matlab ubique la carpeta donde tiene descargado el software DuoDIC y jale el script *DuoDIC_STEP1_Stereo_calibration* al Editor, ver figura 15. Luego, de clic en Run para ejecutar el script e iniciar con el procesamiento.

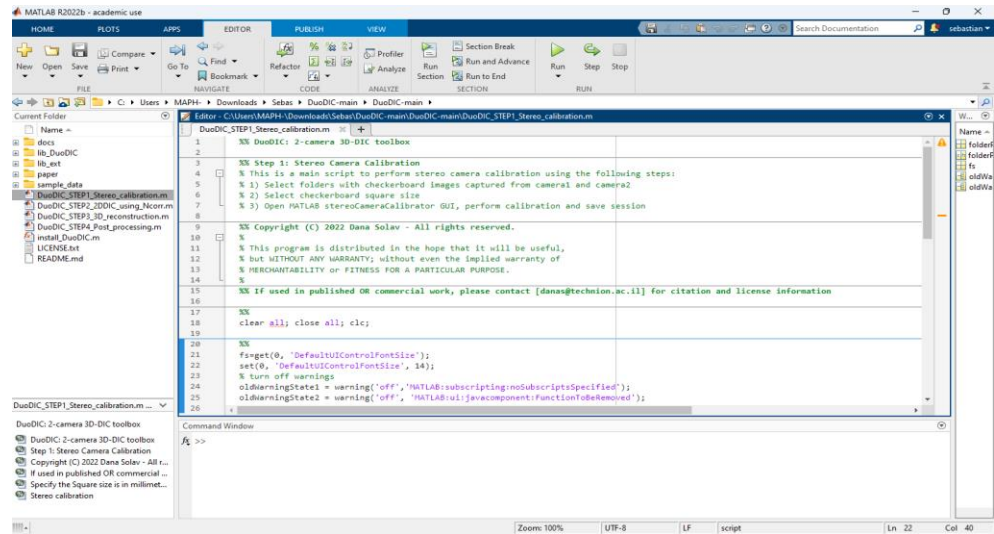


Figura 15. Script *DuoDIC_STEP1_Stereo_calibration*.

- 2.1.2.** Se desplegará un menú donde debe seleccionar la carpeta correspondiente a las imágenes de calibración de la cámara derecha “1”, (Figura 16). El orden en el que seleccione las imágenes para la fase de calibración debe ser el mismo para la fase de speckle, es decir, si primero selecciono la cámara 1 y luego la 0, debe seleccionarlal del mismo modo en el segundo paso.

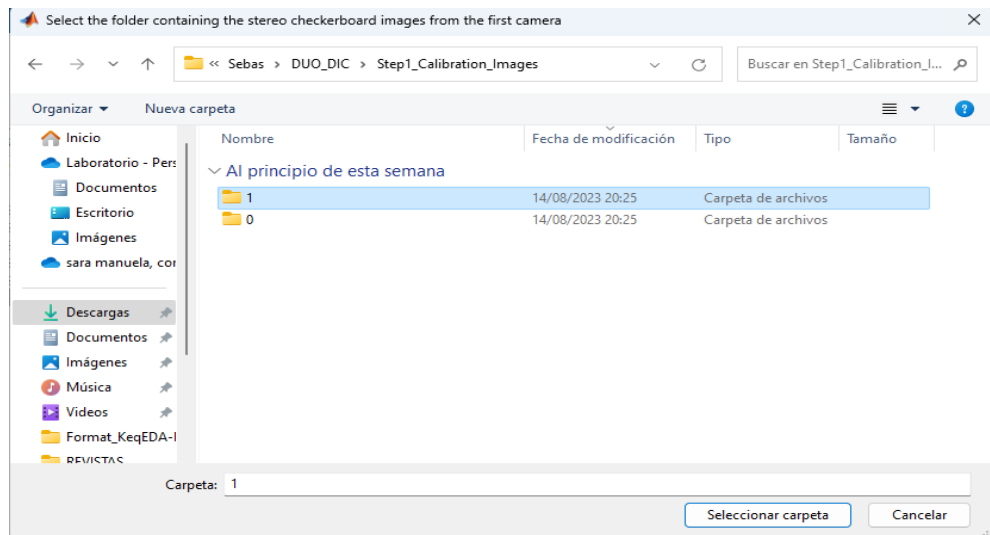


Figura 16. Imágenes de calibración, cámara derecha “1”.

- 2.1.3.** Seleccione la carpeta correspondiente a las imágenes de calibración de la cámara izquierda “0”, (Figura 17).

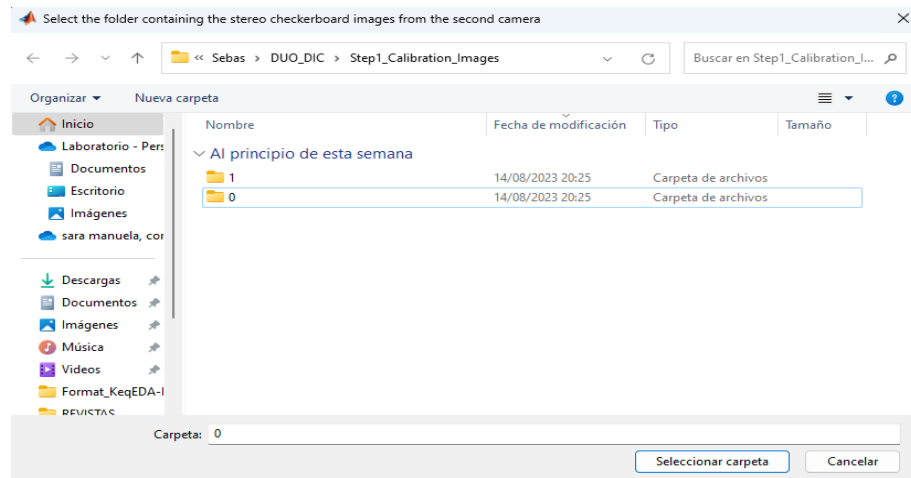


Figura 17. Imágenes de calibración, cámara izquierda “0”.

- 2.1.4. Ingrese la longitud del lado de los cuadrados en mm del patrón de calibración de ajedrez que haya utilizado. El patrón utilizado en los ensayos de muros de concreto reforzado tiene una longitud de lado de 35mm, (Figura 18).

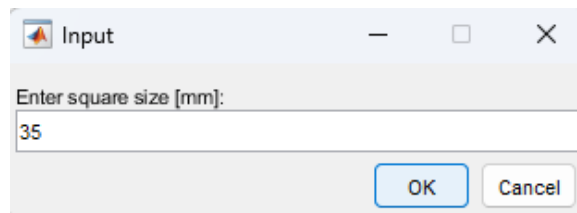


Figura 18. Longitud del lado de los cuadrados en mm.

- 2.1.5. Después de dar clic en OK, aparecerá la interfaz del “Stereo Camera Calibrator o Calibrador Estéreo de Cámaras”. Debe esperar hasta que se carguen y analicen los pares de imágenes de calibración, (Figura 19). Cuando finalice, aparecerá una ventana con los resultados de la detección de las imágenes, que muestra el número de pares de imágenes de calibración procesados y el correspondiente número de pares de imágenes aceptados y rechazados por el software, (Figura 19).

Nota: Los pares de imágenes rechazados hacen referencia a aquellos pares donde alguna de las dos imágenes presenta reflejo y/o no se logra capturar la totalidad del patrón de calibración dentro del campo de visión de las cámaras, impidiendo la detección de la totalidad de puntos del patrón de calibración.

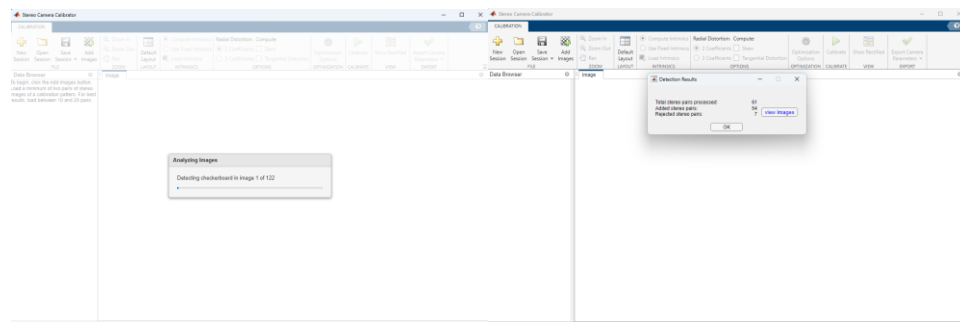


Figura 19. Análisis de imágenes de calibración.

Se detectarán entonces los puntos de referencia del patrón de calibración y el origen de este para cada par de imágenes, (Figura 20). Debe asegurarse de que se hayan extraído correctamente los puntos y que coincidan con las esquinas de los cuadrados del patrón, asimismo, que el punto de origen y la orientación del patrón sea el adecuado, (Figura 21).

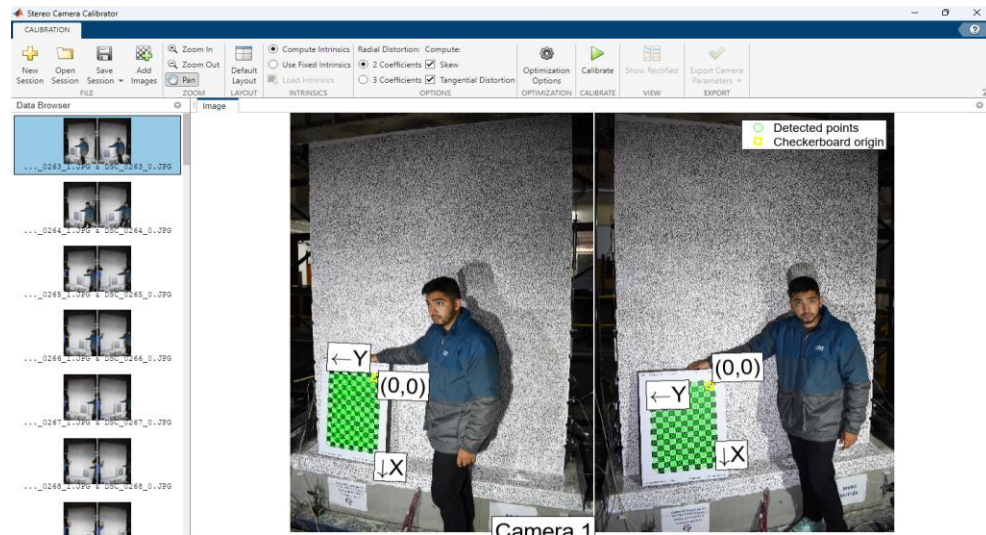


Figura 20. Detección de puntos de control sobre el patrón de calibración.

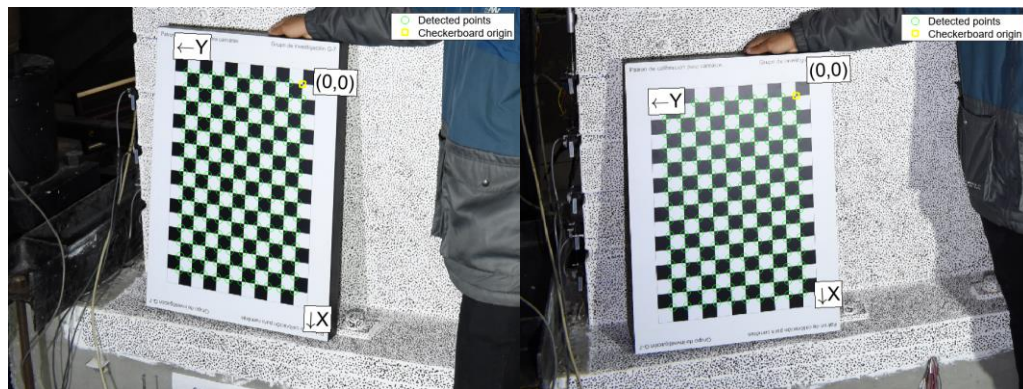


Figura 21. Puntos de referencia de un par de imágenes detectados correctamente.

- 2.1.6.** Debe seleccionar la distorsión radial, tangencial y el skew de las imágenes. Estas distorsiones dependen del tipo de lente que se utilice, entre más curvatura presente, mayor son los coeficientes de distorsión de las cámaras que debe considerar. La distorsión radial hace referencia a la deformación en forma de "barril" o "almohadilla" que afecta las imágenes capturadas por las cámaras, entre más alejada sea la región con respecto al eje focal de las imágenes, mayor curvatura presentara. La distorsión tangencial se relaciona con la inclinación o el desplazamiento de la imagen, que ocurre cuando las cámaras no están perfectamente alineadas con respecto al plano de la imagen. Esta distorsión puede causar que las líneas rectas aparezcan inclinadas en las imágenes, afectando la precisión de la calibración estéreo, (Figura 22).

Nota: lentes con amplios campos de visión, como los de gran angular, presentan unas

distorsiones radiales y tangenciales muy elevados.

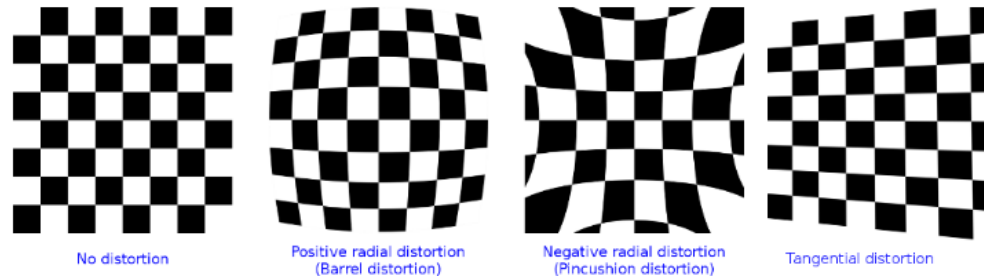


Figura 22. Distorsión radial y tangencial en imágenes, [4].

2.1.7. De clic en “Calibrate” para que se inicie la calibración. Una vez terminada, le aparecerá una ventana con los resultados de la calibración estéreo, ver figura 23. En la parte superior, se encuentran los puntos detectados “en verde” y los puntos reproyectados “en rojo” sobre el patrón de calibración, (Figura 24). En la parte inferior derecha, se muestra la posición y orientación de cada cámara con respecto al patrón de calibración. En la parte inferior izquierda se muestran los errores de reproyección para cada par de imágenes y su respectivo error promedio, en el caso del procesamiento del muro M7RR se tiene inicialmente un error promedio de 0.44 pixeles. Este error representa la distancia entre los puntos detectados y los reproyectados en pixeles.

Nota: En la mayoría de los casos, cuando se observan errores significativos de reproyección en los pares de imágenes, estos suelen ser el resultado de reflejos generados en los patrones de calibración. Esto sugiere que el patrón utilizado no ha sido construido con un material ideal, en el cual tanto la impresión como el fondo sean completamente mates. En dicho caso es recomendable reemplazar el patrón.

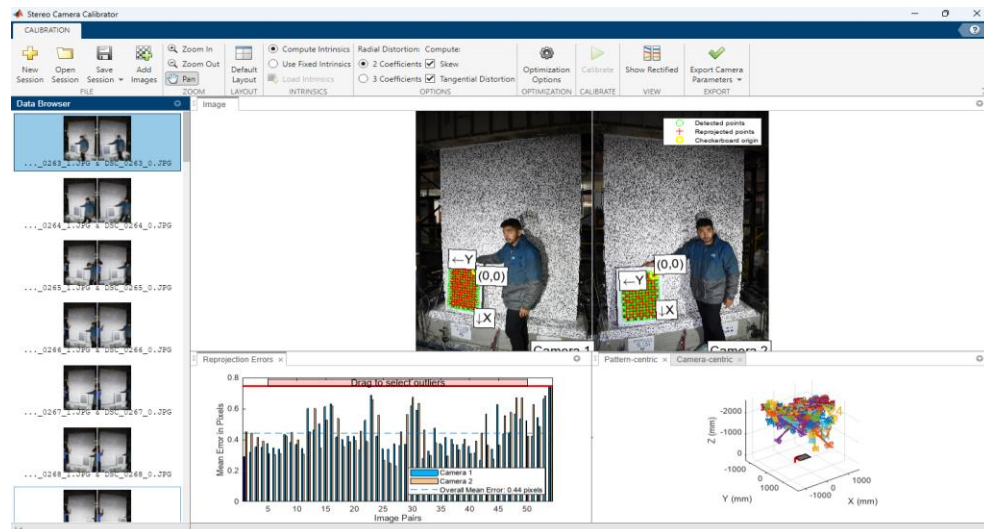


Figura 23. Ventana de resultados de la calibración estéreo.

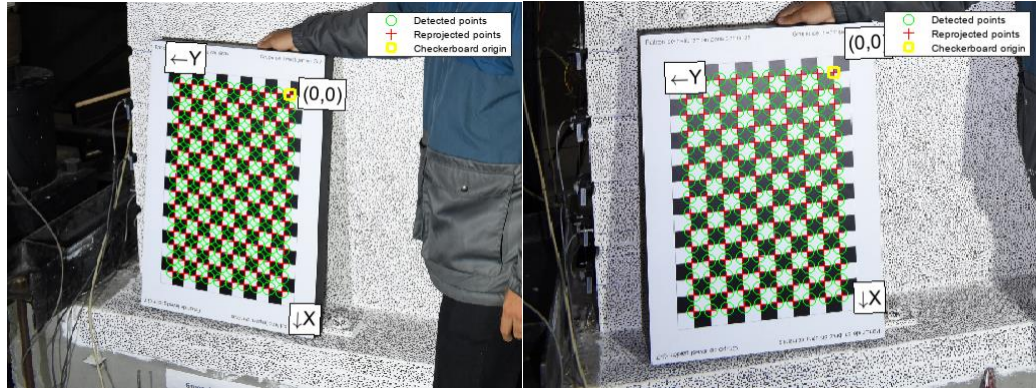


Figura 24. Puntos detectados y reproyectados en el patrón de calibración para un par de imágenes.

- 2.1.8.** Para disminuir este error y mejorar la precisión de la calibración, el software cuenta con una herramienta denominada “Drag to select outliers” con la que puede seleccionar todos aquellos pares de imágenes que tengan errores por encima de un valor determinado, removiéndolas y recalibrando, (Figura 25). En el procesamiento del muro M7RR, se estableció un límite de error de reproyección de 0.60 píxeles, disminuyendo el error promedio hasta un valor de 0.37 píxeles, (Figura 26). Un valor bastante bajo que indica que la calibración ha sido exitosa, validando además de que el patrón de calibración funciona correctamente y puede ser utilizado para el desarrollo de más ensayos.

Nota: Este procedimiento de calibración se llevó a cabo para múltiples patrones de calibración de ajedrez de diferentes tamaños, obteniéndose errores de reproyección bajos, por debajo de 0.50 píxeles, validándolos para ser usados en diversas aplicaciones.

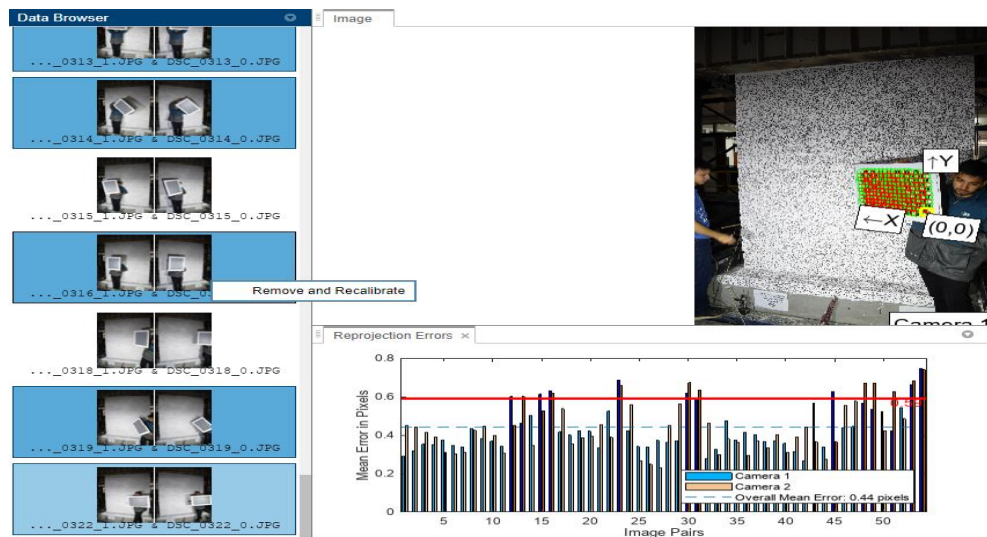


Figura 25. Herramienta “Drag to select outliers” seleccionando y removiendo todos los pares de imágenes con errores promedio por encima de 0.60 píxeles.

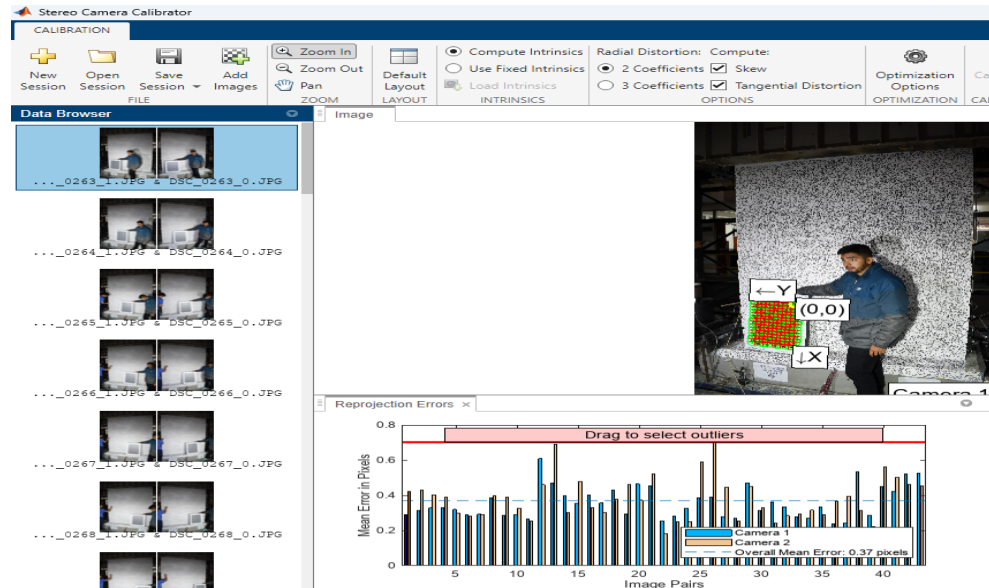


Figura 26. Recalibración de los pares de imágenes, obteniéndose un error promedio de 0.37 píxeles.

- 2.1.9. Para dar por terminada la calibración guarde los resultados dando clic en “Save Session”, con ello exportara un archivo .mat con los parámetros estéreo de calibración y los errores calculados, (Figura 27, 28).

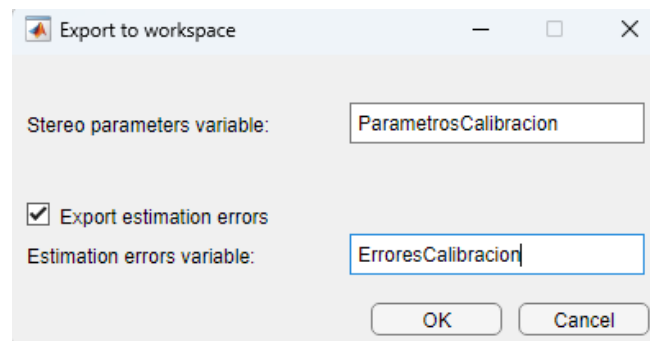


Figura 27. Guardado de resultados de calibración.

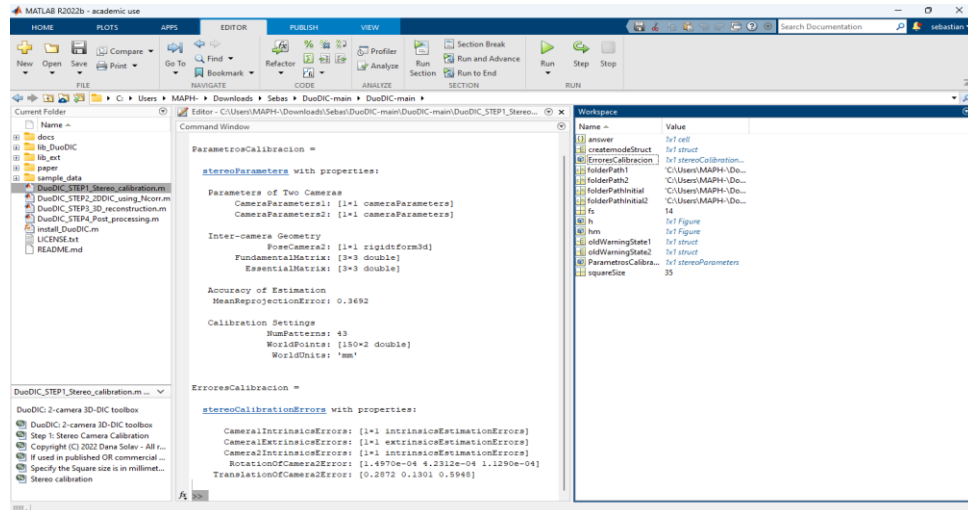


Figura 28. Resultados de calibración.

2.1.10. En el “Command Window” de Matlab presione cualquier tecla para finalizar el paso 1 del procesamiento *DuoDIC_STEP1_Stereo_calibration*.

2.2. Paso 2: 2D-DIC utilizando Ncorr.

El script *DuoDIC_STEP2_2DDIC_using_Ncorr* es el script principal para analizar las imágenes estéreo de una probeta sometida a un ensayo específico utilizando correlación digital de imágenes en 2D. Este script utiliza el software de código abierto NCORR desarrollado por Justin Blaber y Antonia Antoniou, del Georgia Institute of Technology [2]. Este paso puede llevarse a cabo antes o después de la calibración estéreo y debe ser ejecutado antes de reconstruir espacialmente las superficies y sus respectivos campos de desplazamiento.

Para el par de cámaras, el algoritmo considera la primera cámara como la cámara de referencia y la segunda cámara como la cámara deformada. Esto significa que las imágenes tomadas por la segunda cámara son analizadas como versiones deformadas de las imágenes tomadas por la primera cámara. A continuación, se numeran los pasos necesarios para llevar a cabo de forma satisfactoria esta parte del procesamiento.

2.2.1. En el “Current Folder” de Matlab ubique la carpeta donde tiene descargado el software DuoDIC y jale el script *DuoDIC_STEP2_2DDIC_using_Ncorr* al Editor, (Figura 29). Luego, de clic en Run para ejecutar el script e iniciar con el procesamiento.

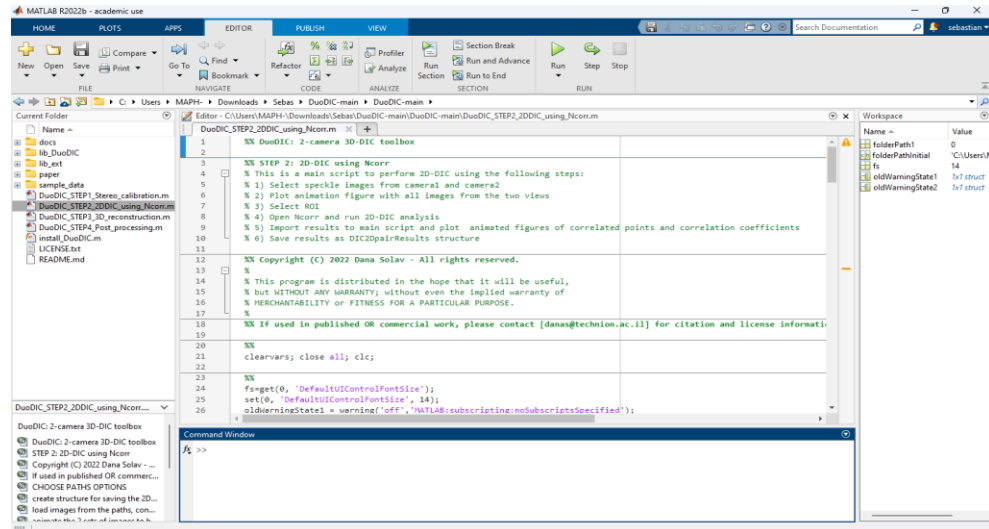


Figura 29. Script *DuoDIC_STEP2_2DDIC_using_Ncorr*.

2.2.2. Se desplegará un menú donde debe seleccionar la carpeta correspondiente a las imágenes de speckle de la cámara derecha “1”, (Figura 30). El orden en el que selecciono las imágenes para la fase de calibración debe ser el mismo para la fase de speckle, es decir, si primero selecciono la cámara 1 y luego la 0, debe seleccionarlal del mismo modo en este paso.

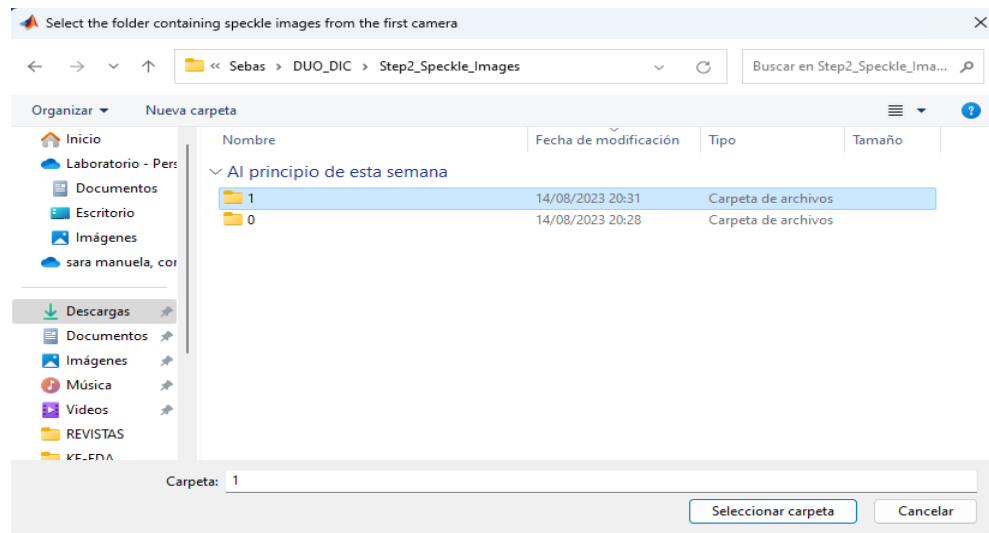


Figura 30. Imágenes de speckle, cámara derecha “1”.

2.2.3. Seleccione la carpeta correspondiente a las imágenes de speckle de la cámara izquierda “0”, (Figura 31).

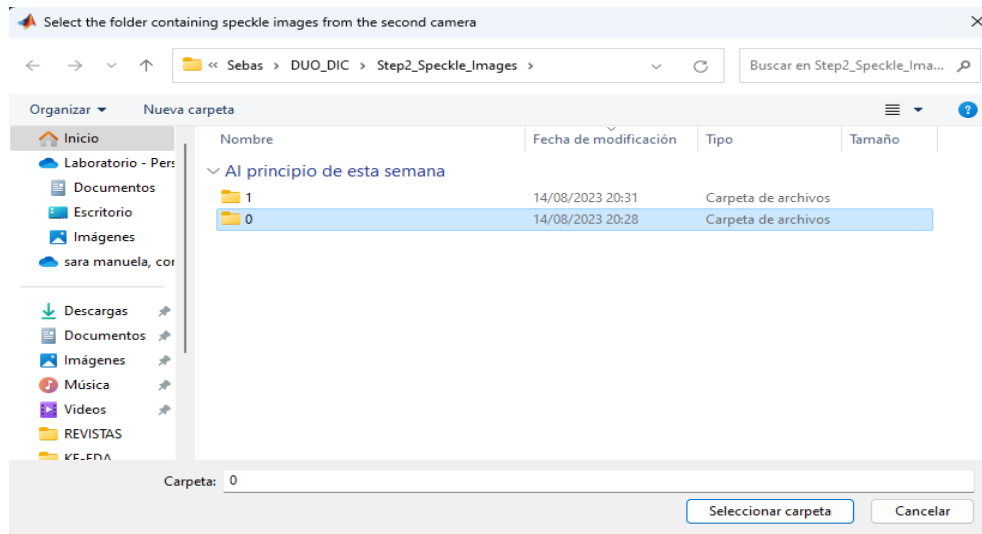


Figura 31. Imágenes de speckle, cámara izquierda “0”.

- 2.2.4. Se desplegará una ventana preguntando si desea guardar los resultados del 2D-DIC, de clic en “Yes” y seleccione la carpeta donde irán guardados, (Figura 32). Debe esperar a que se carguen las imágenes.

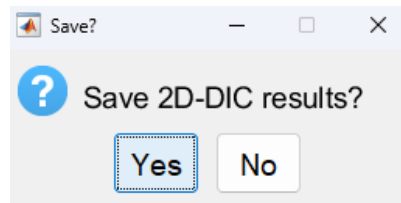


Figura 32. Imágenes de speckle, cámara izquierda “0”.

Nota: Debido a la forma en cómo se cargan las imágenes en DuoDIC, utilizando la función de NCORR “Load all”, y a la alta resolución y numero de pares de imágenes de cada ensayo de muros, se requiere para el procesamiento una gran cantidad de memoria RAM, ver figura 33, por lo que como mínimo requiere de 128gb de RAM para evitar que Matlab y el computador crashee en este paso. Se sugiere para efectos prácticos modificar el script de DuoDIC para que cargue las imágenes utilizando la segunda función de carga de imágenes de NCORR “Load Lazy”, disminuyendo los requerimientos computacionales. Otra opción, que es la que lleve a cabo es dividir el procesamiento de cada muro por fases.

- 2.2.5. Cuando se hayan cargado las imágenes, aparecerá la siguiente ventana que muestra el set de pares de imágenes que se van a procesar, (Figura 33). Al dar clic en el icono de “play” se mostrará de forma animada la secuencia de imágenes cargadas, donde debe comprobar que las imágenes estén ordenadas correctamente, si es así, de clic en el icono de “Stop” y luego presione cualquier tecla en el “Command Window” de Matlab.

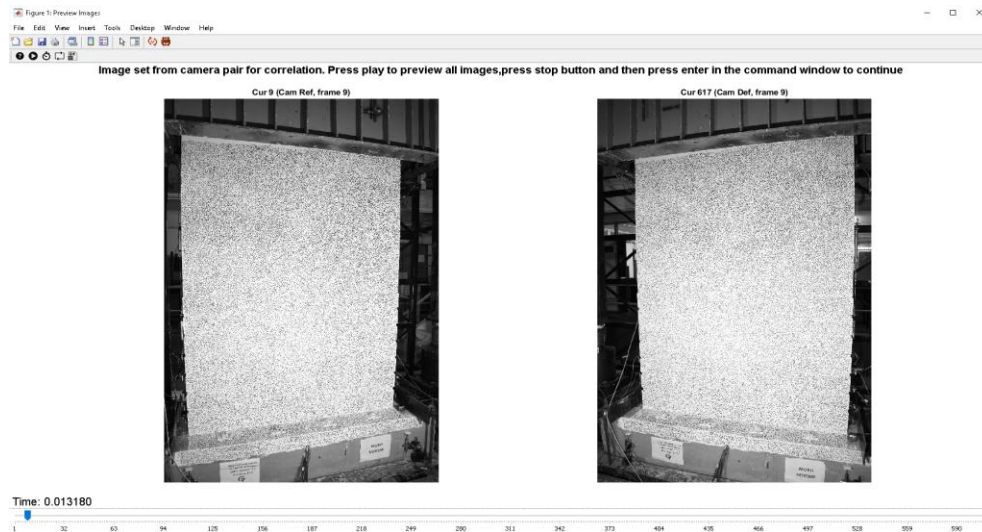


Figura 33. Set de pares de imágenes a procesar.

- 2.2.6. Se desplegará una nueva ventana donde debe seleccionar si desea crear la máscara correspondiente a la región de interés, usar una que haya creado antes o utilizar la interfaz del software NCORR para crear dicha región, (Figura 34). En el caso en el que haya seleccionado crear una nueva mascara para la correlación, debe seleccionar en la imagen de referencia la región de interés de la probeta que desea analizar con correlación digital de imágenes. Para ello, el programa cuenta con diversas herramientas de dibujo que le permiten ajustarse a la geometría de las probetas, excluyendo las áreas que no son relevantes para el análisis. Para el procesamiento de los muros se seleccionó la ROI colocando múltiples puntos alrededor de la probeta, ver figura 35, cubriendo toda la superficie que cuenta con el patrón aleatorio de puntos y tomando cierta distancia desde el borde de la probeta para reducir posibles errores de correlación. Cuando haya seleccionado la ROI de forma correcta de clic en “Yes” para continuar con el siguiente paso del procesamiento.

Nota: Si al dibujar la ROI en la probeta los bordes quedan muy cercanos al borde de la probeta o a zonas vacías, es probable que el software tenga problemas de correlación en dichos contornos y le genere una advertencia de que puede obtener datos no representativos, es por ello por lo que, debe procurar siempre dejar un pequeño margen entre el borde físico y el que desea analizar con DIC.



Figura 34. Ventana de opciones para selección de región de interés.

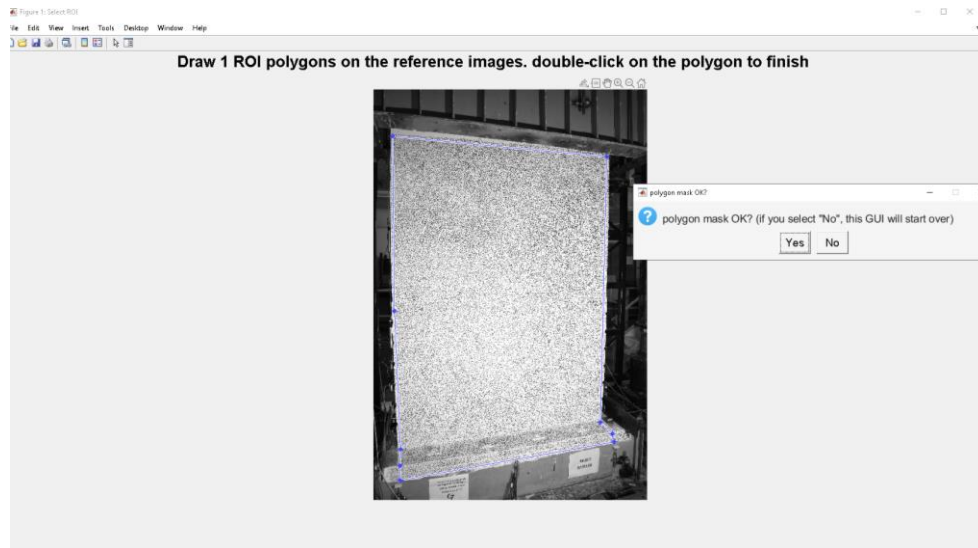


Figura 35. Selección de la región de interés de un muro de concreto reforzado.

2.2.7. Posteriormente, se abrirá la interfaz principal del software NCORR donde debe continuar con el procesamiento, (Figura 37).

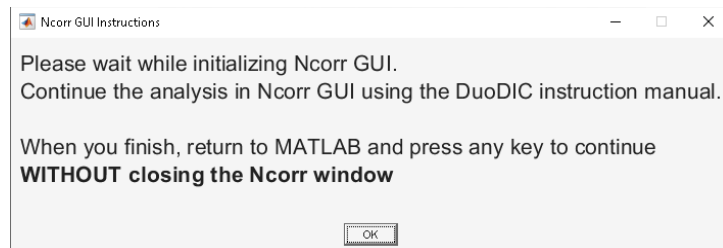


Figura 36. Instrucciones de análisis en NCORR.



Figura 37. Interfaz principal de NCORR.

2.2.8. Establezca los parámetros de DIC para el procesamiento.

Este paso es primordial, ya que de él dependen la calidad y confiabilidad de los resultados que obtenga después del procesamiento, y tiene como nombre “*DIC Parameters*”. En este paso, debe definir todos los parámetros relacionados con el procesamiento de las imágenes, tales como, el tamaño de subset, el tamaño del paso, los criterios de correlación que definen el proceso iterativo

hasta encontrar unos valores objetivo, la opción multinúcleo para el procesamiento, el análisis de alta deformación y el análisis discontinuo. Para llevar a cabo este proceso, en la interfaz principal de NCORR, debe dar clic en la pestaña “Set DIC parameters”, desplegando una ventana en el que debe colocar todos los parámetros mencionados de acuerdo con el tipo de ensayo y probeta, finalmente, debe dar clic en “Finish” y luego en “Yes” para continuar con el siguiente paso. En el ensayo cíclico sobre muros de concreto reforzado se establecieron los siguientes valores para los diferentes parámetros, (Figura 38), en la parte derecha de la figura se previsualiza la región de interés y el subset seleccionado. La descripción detallada para la selección de estos parámetros de correlación se encuentra en el “**ANEXO 1: MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D**, Paso 4, Establezca los parámetros de DIC para el procesamiento”

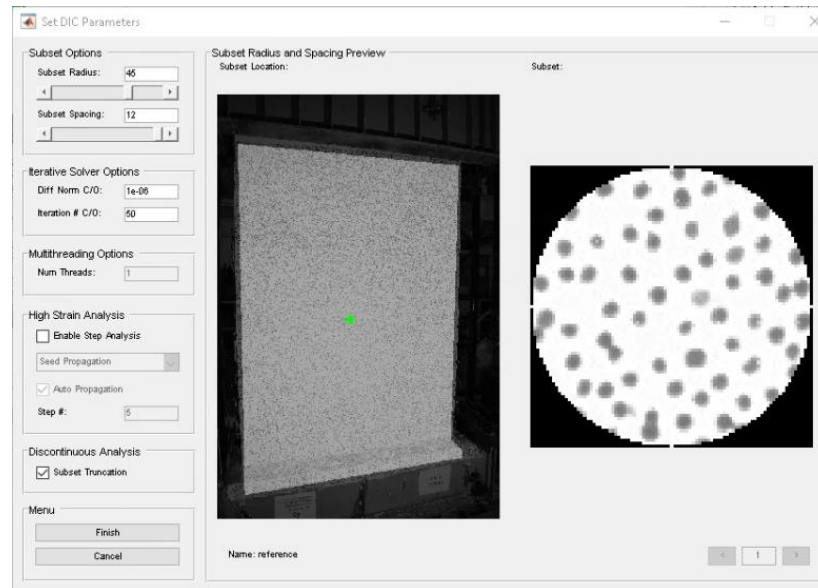


Figura 38. Parámetros de DIC para el procesamiento.

2.2.9. Análisis DIC.

Para llevar a cabo el análisis DIC, en la interfaz principal de NCORR, debe dar clic en la pestaña “Analysis” y luego en la opción “Perform DIC Analysis”. Con ello, se iniciará el análisis de las imágenes y deberá seguir los siguientes pasos para ejecutar el procesamiento se forma satisfactoria.

2.2.10. Selección de la región de interés a analizar.

Una vez iniciado el análisis se desplegará una ventana donde debe seleccionar la región de interés ROI que desea analizar durante el procesamiento, por lo general, y para el ensayo de muros de concreto reforzados, se tiene una única región de interés a analizar. Para ello, debe dar clic en “Select Region”, luego seleccione la región de interés (región sombreada en blanco), y, por último, dar clic en “Finish”, (Figura 39).

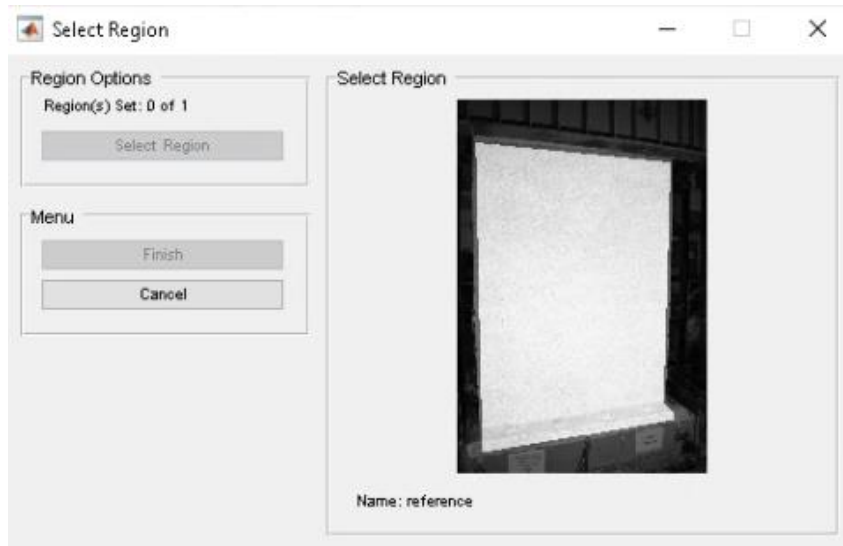


Figura 39. Selección de la región de interés (ROI).

2.2.11. Establecer los “Seeds” o Subregiones de correlación.

Se desplegará una ventana en la que debe establecer la ubicación de las subregiones de correlación para permitir el procesamiento en paralelo, aprovechando al máximo la capacidad del procesador y reduciendo el tiempo de análisis (siempre y cuando haya activado previamente la opción de procesamiento multinúcleo). Para ello, debe dar clic en “Set Seeds”, luego distribuya de forma uniforme los centros de las subregiones procurando que tengan el mismo tamaño y una geometría regular, si el procesamiento se va a desarrollar con un único núcleo solo deberá ubicar el centro de la ROI. Además, debe garantizar que el centro de las subregiones no se salga del campo de visión de las cámaras durante el desarrollo del ensayo, esto generaría graves errores de correlación e implicaría reposicionar las subregiones. En el caso de los muros de concreto reforzado, se utilizó un solo núcleo para el procesamiento, se sugiere activar la opción de procesamiento con multinúcleo para aprovechar la totalidad del procesador, dividiendo la ROI en subregiones de procesamiento en paralelo, (Figura 40). Por último, de clic en “Finish” para que el software empiece a calcular la ubicación de las subregiones y los subsets para todas las imágenes del ensayo, este proceso puede ser algo lento.



Figura 40. Establecimiento de las subregiones de correlación.

2.2.12. Chequeo de subregiones de correlación.

Una vez terminado este primer procesamiento, se desplegará la vista previa de cada una de las subregiones y subsets de la ROI para cada una de las imágenes con respecto a la imagen de referencia. Se debe chequear entonces para cada una de las subregiones y para cada imagen que el subset de referencia coincida con el subset de la última imagen deformada, esto de manera visual, (Figura 41), de igual forma se deben chequear los coeficientes de correlación ya que si el centro de la subregión está colocado en una región de la superficie que presenta altos niveles de distorsión debido al ángulo de visión se presentarían errores de correlación. Finalmente, de clic en “Finish” para continuar con el procesamiento de las imágenes, (Figura 42).

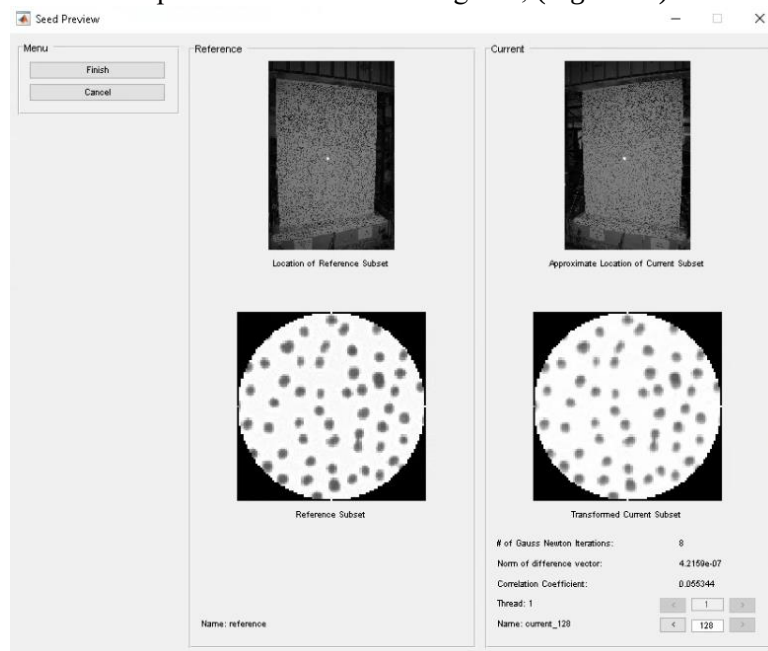


Figura 41. Subregiones y subsets de la ROI para cada una de las imágenes con respecto a la imagen de referencia

Nota: Sí la probeta ensayada ha sido sometida a condiciones de deformación extremas, es

posible que se presenten errores en este paso y no se correlacione de buena manera la posición de los subsets deformados con respecto a los de referencia. En dicho caso, debe volver al paso anterior y modificar los parámetros de DIC, activando el análisis de alta deformación.

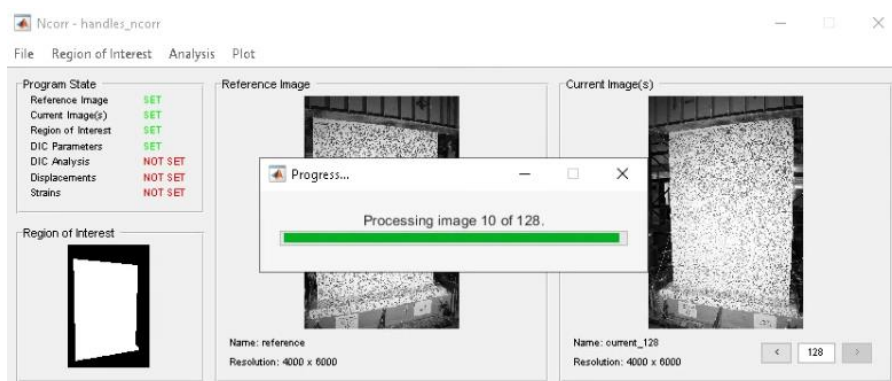


Figura 42. Procesamiento de imágenes.

Hasta este momento el procesamiento de las imágenes en 2D está casi terminado, en la interfaz principal de NCORR se encuentra el estado de cada uno de los pasos del flujo de trabajo del programa. En verde y con la palabra “SET” se encuentran aquellos pasos que ya se han terminado, y en rojo y con la palabra “NO SET” se encuentran los pasos pendientes para terminar el procesamiento. Este tipo de interfaz con lista de chequeo le facilita al usuario el desarrollo del procesamiento de forma intuitiva, (Figura 43)

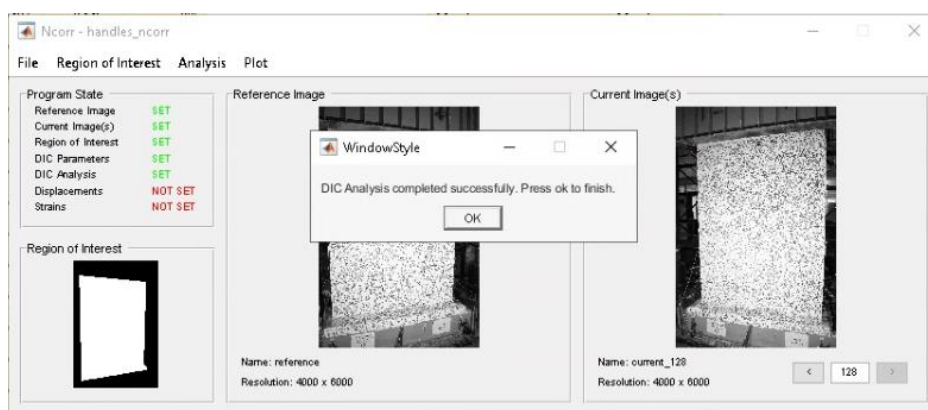


Figura 43. Interfaz principal de NCORR con el estado actual de los pasos del procesamiento.

2.2.13. Paso 6, Formato de desplazamientos.

En esta etapa, en la interfaz principal de NCORR, haga clic en la pestaña “Analysis” y luego seleccione la opción “Format Displacements”. Al hacerlo, se desplegará una ventana, (Figura 44), donde debe dar clic en “Finish” y luego en “Yes” para que el software aplique la conversión y les dé formato a los campos de desplazamiento de todas las imágenes. Sin embargo, los desplazamientos aquí no tienen directamente un sentido físico, por lo que solo después de la reconstrucción tridimensional del tercer script de DuoDIC podrá ver el campo de desplazamientos.

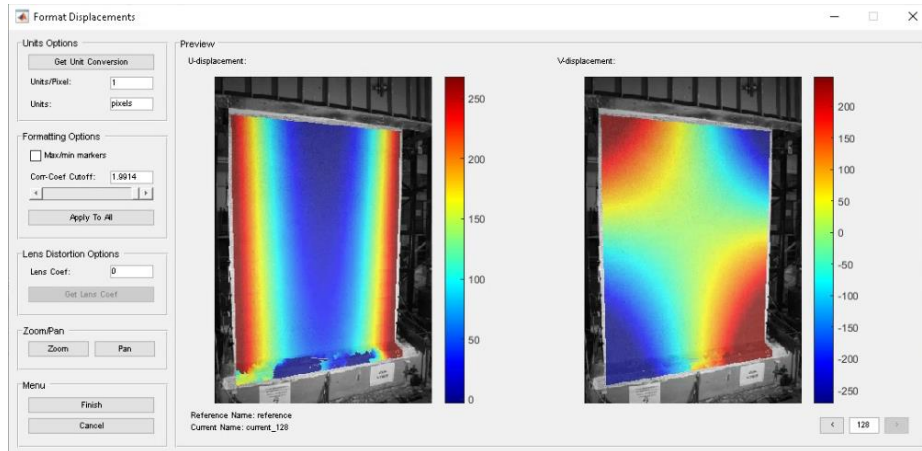


Figura 44. Interfaz principal de NCORR con el estado actual de los pasos del procesamiento.

2.2.14. Paso 7, guardado de datos de DIC 2D.

Hasta este punto se completó el análisis 2D de las imágenes estéreo con NCORR, ver figura 45, no es necesario que ejecute el cálculo los “strains” o deformaciones, únicamente debe volver a la interfaz principal de Matlab y en el “command window” presionar cualquier tecla. Con ello, los resultados de NCORR serán guardados en un archivo llamado DIC2DpairResults.mat en la carpeta que seleccionamos al inicio. Recibirá una alerta de Ncorr de que se borrarán los resultados obtenidos en el procesamiento. De clic en “Yes” para dar por terminado el paso 2 del procesamiento *DuoDIC_STEP2_2D-DIC Using NCORR*, (Figura 46).



Figura 45. Interfaz principal de NCORR con el estado actual de los pasos del procesamiento.

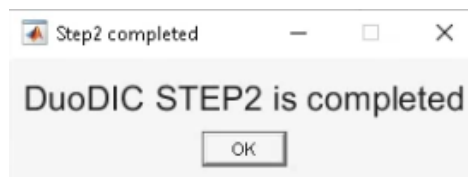


Figura 46. DuoDIC STEP2 se ha completado.

Se desplegará otra interfaz donde debe seleccionar si desea plotear los resultados ahora, si da clic en “Yes”, se desplegará un menú donde puede cambiar los límites de los coeficientes de correlación de los datos que se van a plotear (puede dejarlo en blanco para usar los valores por defecto, que van entre 0 y el máximo valor del coeficiente de correlación encontrado en el

análisis). A continuación, se presentan los resultados del análisis, (Figura 47, 48). En esta fase, ya es posible detectar los patrones de agrietamiento del elemento.

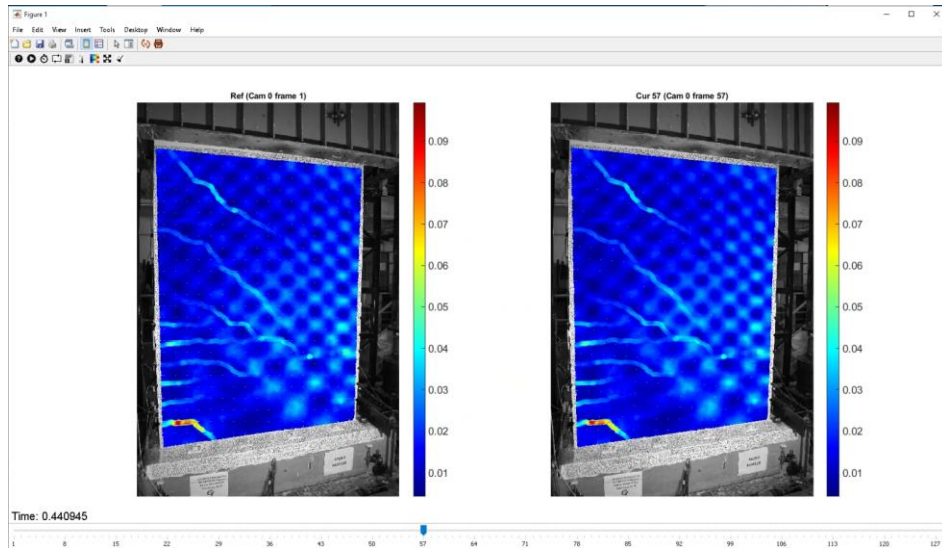


Figura 47. Resultados STEP2 DuoDIC.

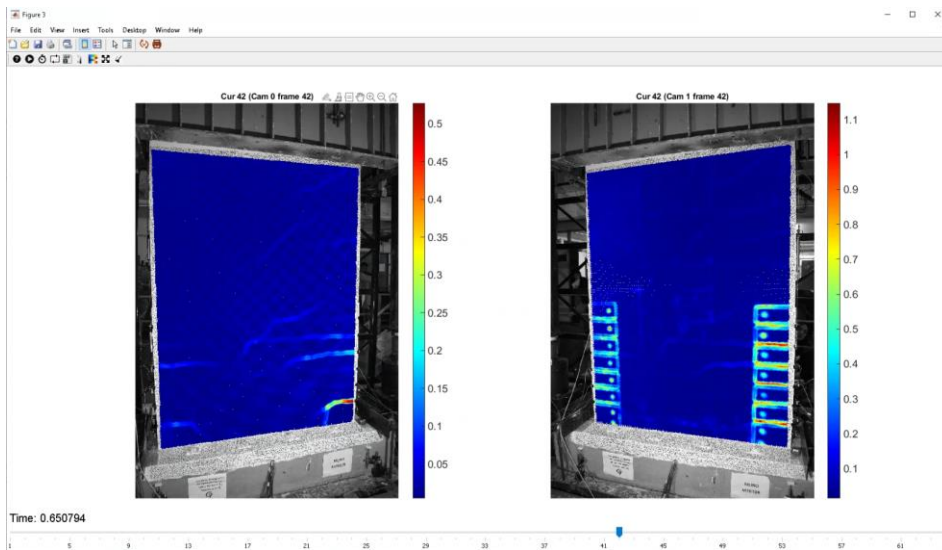


Figura 47. Resultados STEP2 DuoDIC.

2.3. Paso 3: DuoDIC reconstrucción 3D.

El script *DuoDIC_STEP3_3D_reconstruction* es el script principal para transformar los datos en 2D del par de imágenes obtenidos en el paso anterior, en superficies 3D. Este script utiliza los parámetros de calibración obtenidos en el Paso1: Calibración Estéreo para reconstruir las posiciones de 3D de las nubes de puntos encontradas del análisis de las imágenes deformadas. Se numeran los pasos necesarios para llevar a cabo de forma satisfactoria esta parte del procesamiento.

- 2.3.1.** En el “Current Folder” de Matlab ubique la carpeta donde tiene descargado el software DuoDIC y jale el script *DuoDIC_STEP3_3D_reconstruction* al Editor, (Figura 50). Luego, de clic en Run para ejecutar el script e iniciar con el procesamiento.

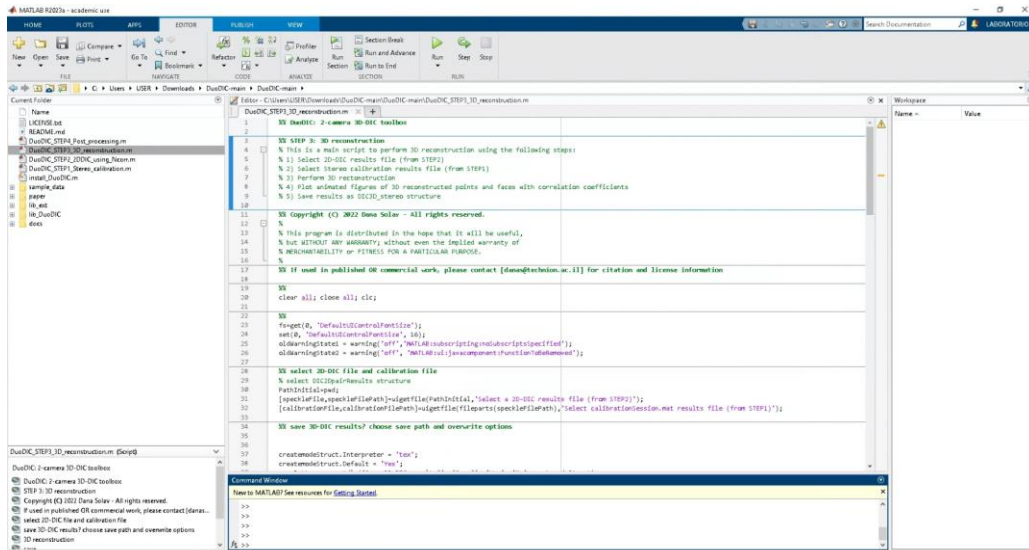


Figura 50. Script *DuoDIC_STEP3_3D_reconstruction*.

- 2.3.2.** Seleccione el archivo con los resultados del 2D-DIC obtenidos en el Paso 2:2D-DIC utilizando Ncorr, (Figura 51).

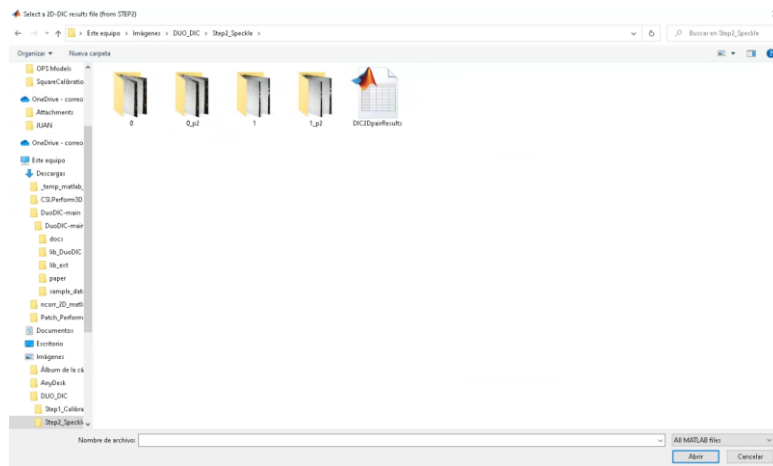


Figura 51. Selección de resultados del 2D-DIC.

- 2.3.3.** Seleccione el archivo con los resultados de la calibración obtenidos en el Paso 2: Calibración Estéreo, (Figura 52).

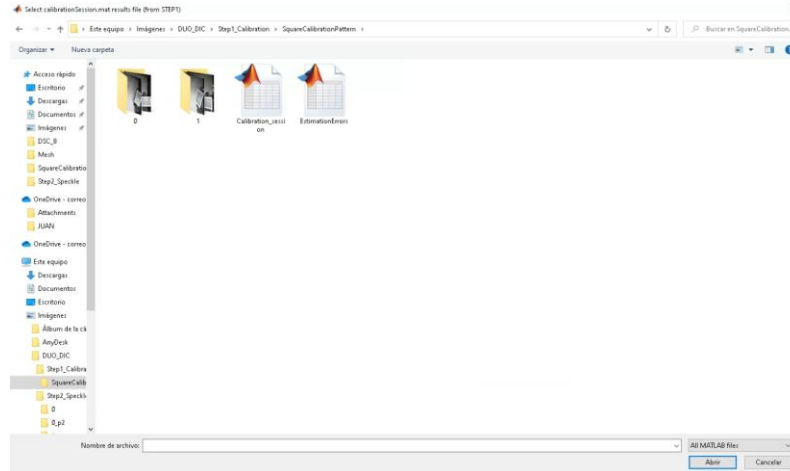


Figura 52. Selección de resultados de calibración.

2.3.4. Seleccione la ruta donde desea guardar los datos del 3D-DIC.

2.3.5. Se llevará a cabo la reconstrucción 3D, (Figura 53), y se guardará un archivo llamado DIC3D_stereo en la ubicación especificada. Aparecerá una figura animada que muestra la reconstrucción de los puntos 3d y la superficie. Los colores representan los valores de los coeficientes de correlación encontrados en el paso 2.

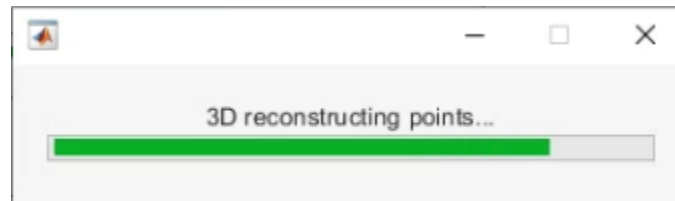


Figura 53. Barra de progreso de reconstrucción 3D.

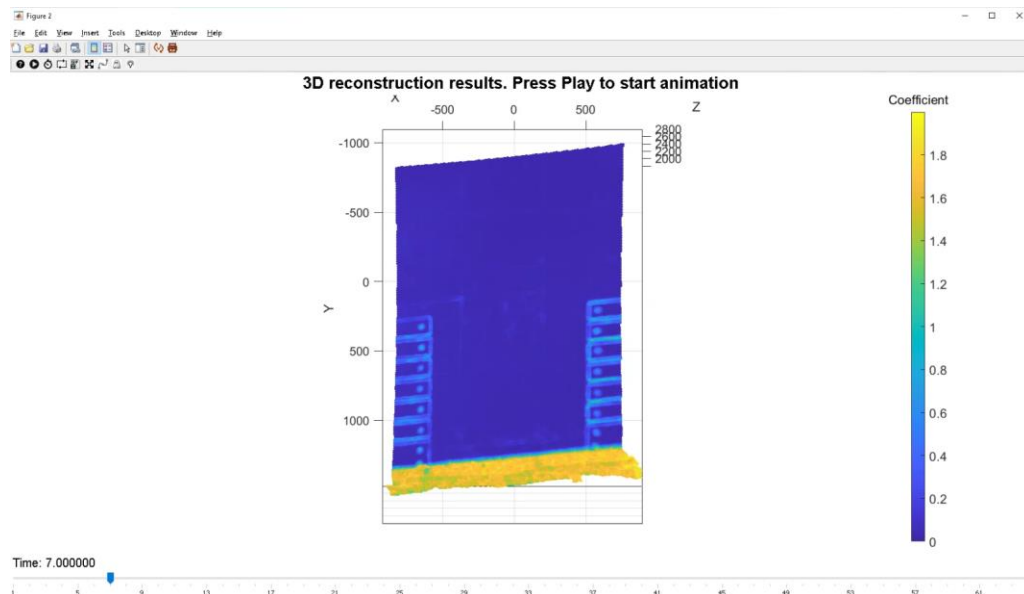


Figura 53. Resultado reconstrucción 3D.

2.4. Paso 4: Post procesamiento.

El script *DuoDIC_STEP4_Post_processing* es el script principal para calcular y plotear los campos tridimensionales de desplazamientos, deformaciones y deformaciones unitarias. Se numeran los pasos necesarios para llevar a cabo de forma satisfactoria esta parte del procesamiento.

2.4.1. En el “Current Folder” de Matlab ubique la carpeta donde tiene descargado el software DuoDIC y jale el script *DuoDIC_STEP4_3D_Post_processing* al Editor, (Figura 55). Luego, de clic en Run para ejecutar el script e iniciar con el procesamiento.

2.4.2. Selecciona la ruta donde desea guardar los resultados de este paso.

2.4.3. Se calcularán los desplazamientos, movimiento de cuerpo rígido, deformaciones y deformaciones unitarias.

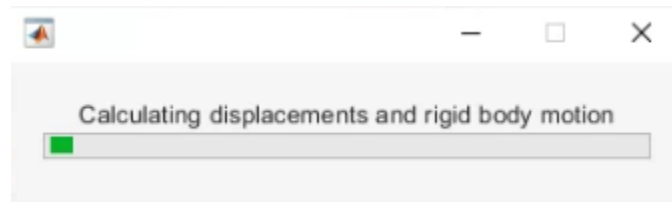


Figura 54. Cálculo de desplazamiento y movimiento de cuerpo rígido.

2.4.4. Se desplegará un menú en el que debe seleccionar si desea plotear los resultados obtenidos, si da clic en “Yes” le preguntará como desea plotear los resultados, si como superficies 3D o como una superposición de los resultados 2D encima de las imágenes procesadas.

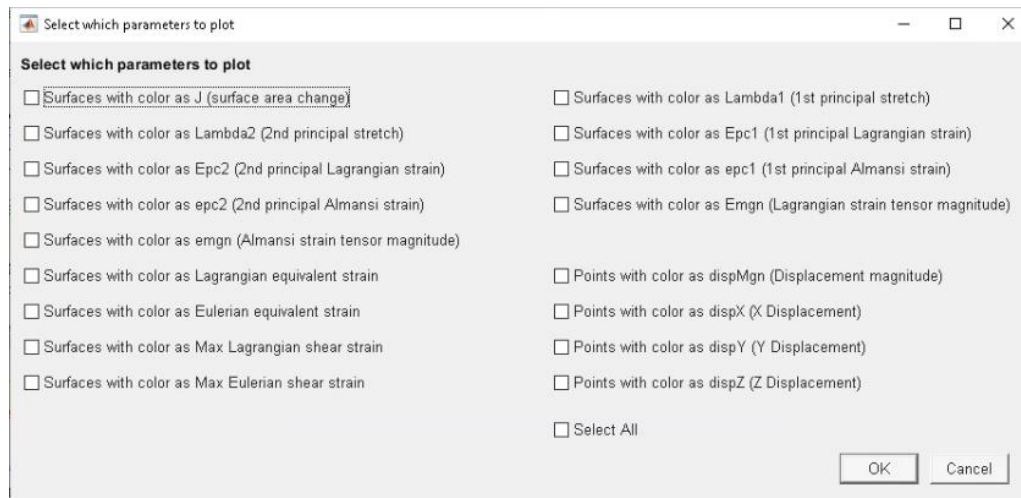


Figura 55. Interfaz de selección para visualización de resultados.

2.4.5. Cada tipo de plot tiene un menú propio donde debe seleccionar el parámetro que desea exportar (campo de desplazamiento en X, Y, Z, deformación unitaria en X exx, en Y eyy, por cortante exy, y sus principales deformaciones). Para remover el movimiento de cuerpo rígido de los plots de clic en “Remove rigid body motion”.

2.4.6. Cada parámetro seleccionado es plotado en una figura animada independiente, donde puede

examinar como estos parámetros cambian a lo largo del ensayo para los diferentes pares de imágenes. Para una explicación más detallada sobre como cada parámetro es calculado, diríjase al paper de MultiDIC [1] de Solav.

- 2.4.7.** Los resultados del post procesamiento son guardados en una estructura llamada DIC3D_PPresults.mat.

3. Bibliografía

- [1] D. Solav, K. M. Moerman, A. M. Jaeger, K. Genovese, and H. M. Herr, “MultiDIC: an Open-Source Toolbox for Multi-View 3D Digital Image Correlation,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30520–30535, May 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843725.
- [2] 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.
- [3] M. A. Sutton, “Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements,” *Springer Handb. Exp. Solid Mech.*, pp. 565–600, 2008, doi: 10.1007/SpringerReference_61945.
- [4] J.-Y. Bougue, “Camera Calibration Toolbox for Matlab: Calibration examples,” 2013. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/example.html (accessed Jan. 25, 2018).

**10.3. ANEXO 3. MANUAL DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 3D
USANDO EL SOFTWARE DE CORRELATED SOLUTIONS VIC 3D-9**

**IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ESTÉREO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE
IMÁGENES PARA MEDICIÓN DE CAMPOS DE DESPLAZAMIENTO EN 3D A BAJO
COSTO.**

SEBASTIÁN SUÁREZ AGUDELO.

Tutor:

PETER THOMSON Ph.D.

Asesor:

ROGER ORTEGA CARABALLO Ph.D.



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2023

Tabla de contenido

1. Pre-Procesamiento.	131
1.1.Rotación de imágenes.....	131
1.2.Renombrado de imágenes.	133
2. Procesamiento de imágenes.	134
2.1. Calibración estéreo de imágenes.	135
2.2. Correlación digital de imágenes.	140
3. Post procesamiento.	144
3.1.Extracción imágenes de daño:.....	144
3.2.Extracción datos perimetrales.	147

MANUAL DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES USANDO EL SOFTWARE DE CORRELATED SOLUTIONS VIC 3D-9

1. Pre-Procesamiento.

Una vez terminado el ensayo, guarde las imágenes de cada cámara en carpetas separadas, como convención utilice configuraciones binarias, la carpeta 0 para las imágenes capturadas con la cámara izquierda, y carpeta 1 para las imágenes capturadas con la cámara derecha, (Figura 1).

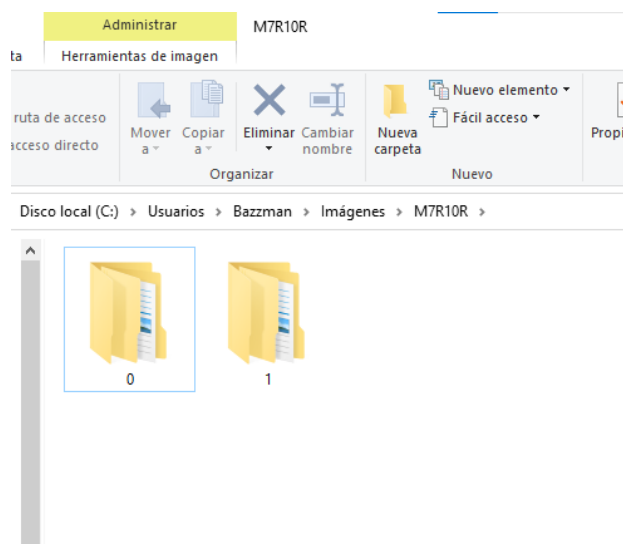


Figura 1. Imágenes del ensayo separadas en carpetas.

Por lo general, las imágenes capturadas se encuentran rotadas con respecto al eje vertical, (Figura 2), esto debido a que la orientación de las cámaras esta ajustado para que el campo de visión de estas abarque la mayor cantidad de pixeles sobre la región de interés, por lo que previo al procesamiento en el software es necesario realizar ajustes para dejar las imágenes de ambas cámaras orientadas en el mismo sentido y verticales, tal y como se evidencia a continuación.

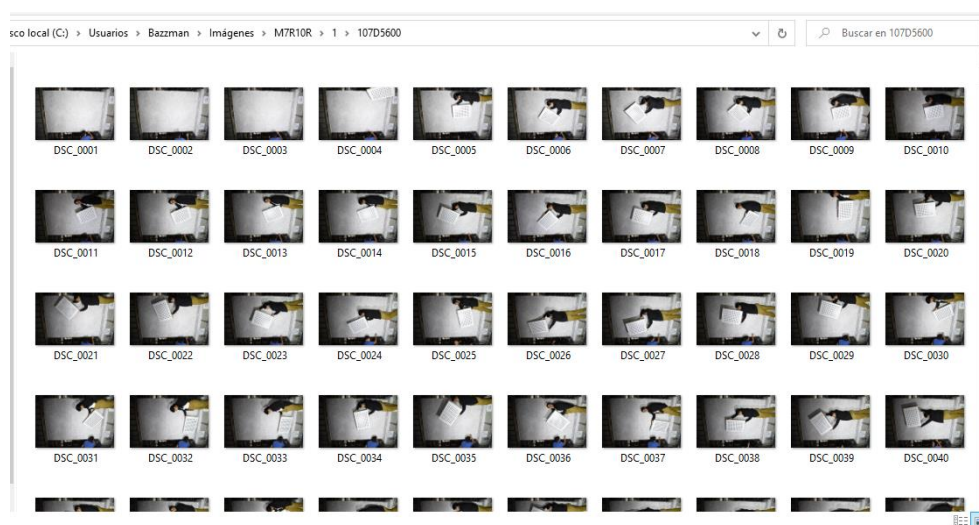


Figura 2. Imágenes brutas del ensayo, rotadas con respecto a la vertical.

1.1. Rotación de imágenes. El script RotateBatch está diseñado para facilitar la rotación de las imágenes de forma sencilla y automatizada, (Figura 3). Únicamente el usuario debe

introducir el ángulo de rotación de las imágenes con respecto al eje vertical, tenga en cuenta que una rotación positiva en Matlab va en contra de las manecillas del reloj. Para comenzar con el proceso realice los siguientes pasos.

Instrucciones:

- 1.1.1. Ubique una copia del script dentro de la carpeta donde se encuentran los pares de imágenes de la cámara 0 y la cámara 1.
- 1.1.2. Modifique la línea 14 del script “RotateBatch”, dentro del comando “imrotate” el ángulo de rotación de las imágenes con respecto al eje vertical para que los pares de imágenes queden con la misma orientación, (Figura 4).

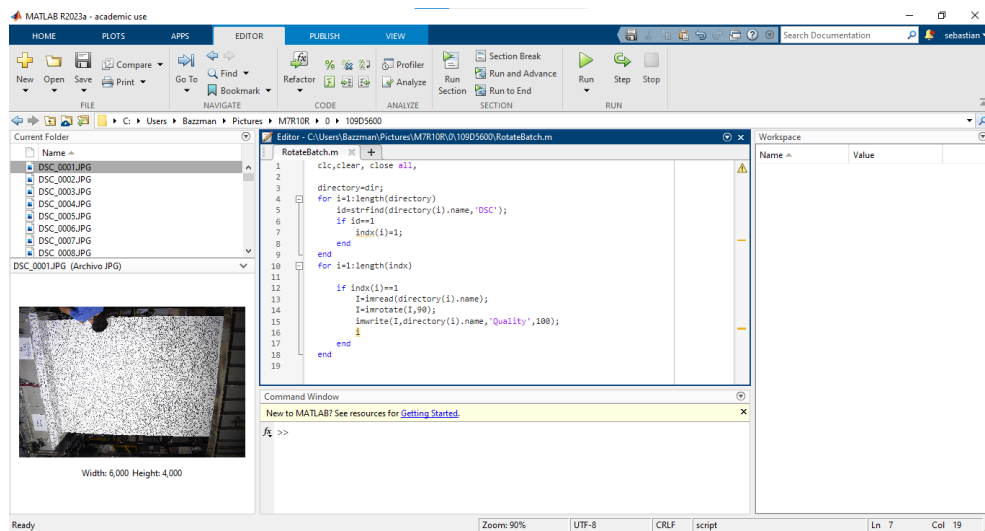


Figura 3. Script “RotateBatch” para rotación de imágenes.

- 1.1.3. Ejecute el script para iniciar el proceso.

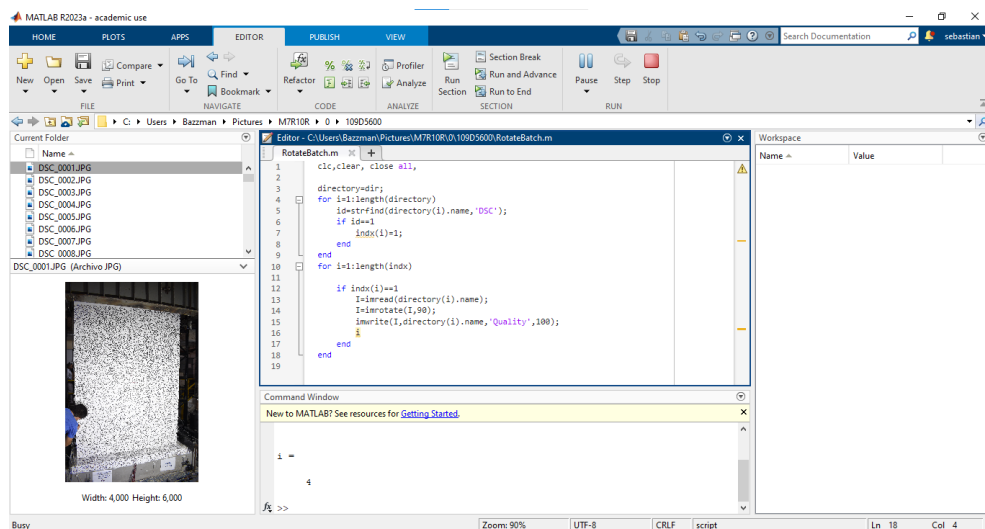


Figura 4. Imágenes rotadas después de ejecutado el script “RotateBatch”.

Nota: Por lo general, las imágenes tomadas con la cámara derecha deben rotarse 90 grados negativos y las imágenes tomadas con la cámara izquierda deben rotarse 90 grados positivos.

1.2. Renombrado de imágenes.

El Script “RenamePhotos” está diseñado para que el usuario pueda modificar de forma rápida y automatizada los nombres de las imágenes que se quieren procesar. Esto debido a que el software VIC3D y en general, cualquier software de correlación de imágenes, requiere de una nomenclatura específica para identificar a que cámara del sistema estéreo corresponde cada una de las capturas, es por ello por lo que, a las imágenes capturadas con la cámara izquierda y derecha se les debe agregar al final de su nombre un “_0” y un “_1” respectivamente. Para comenzar con el proceso realice los siguientes pasos.

Instrucciones:

- 1.2.1. Ubique una copia del script dentro de la carpeta donde se encuentran los pares de imágenes de la cámara 0 y la cámara 1.
- 1.2.2. Modifique la línea 12 del script para agregar al final del nombre de las imágenes capturadas con la cámara izquierda un “_0” y de las imágenes capturas con la cámara derecha un “_1”, tal como se muestra en la figura 5.

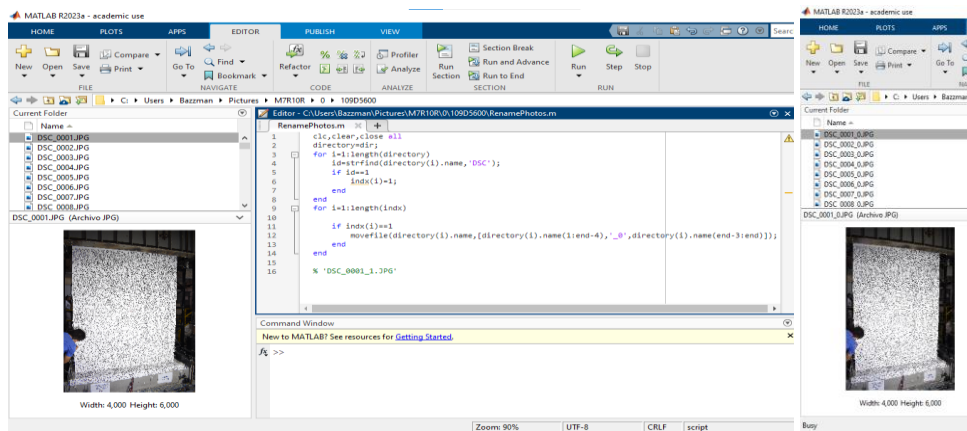


Figura 5. Script “RenamePhotos” para renombrar las imágenes.

- 1.2.3. Ejecute el script para iniciar el proceso.

Nota: únicamente modifique los parámetros indicados en los pasos anteriores, de querer modificar más contenido del script se debe realizar una copia de seguridad ya que puede borrar las imágenes de forma permanente si la ruta colocada dentro de la línea 15 no corresponde con algo lógico.

- 1.2.4. Una vez rotadas y renombradas las imágenes, separe las imágenes de speckle de las de calibración. Estas últimas y para ambas cámaras deben ubicarse juntas en una nueva carpeta denominada “Step1_Calibration_Images”, (Figura 6). Mientras que las de speckle en la carpeta “Step2_Speckle_Images”, (Figura 7).

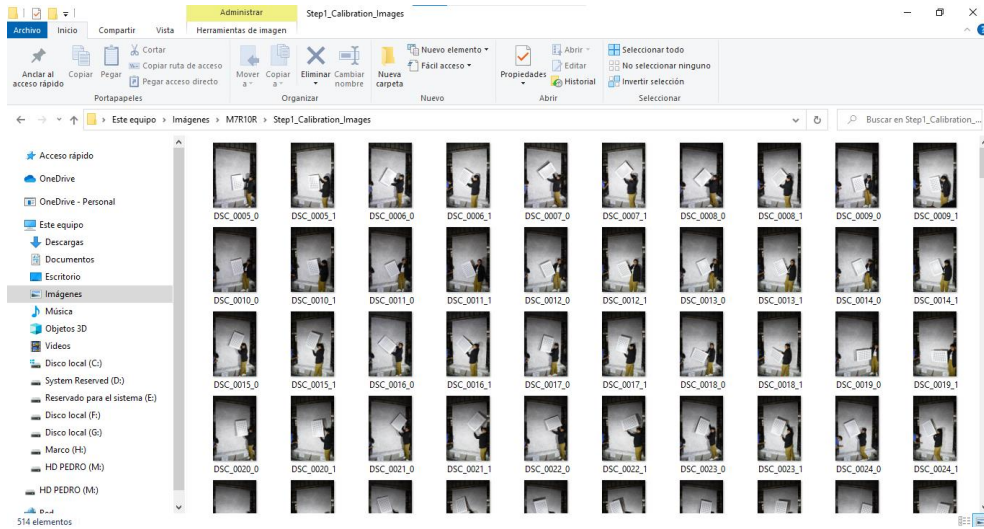


Figura 6. Imágenes de calibración orientadas en el mismo sentido y con la nomenclatura requerida por el software.

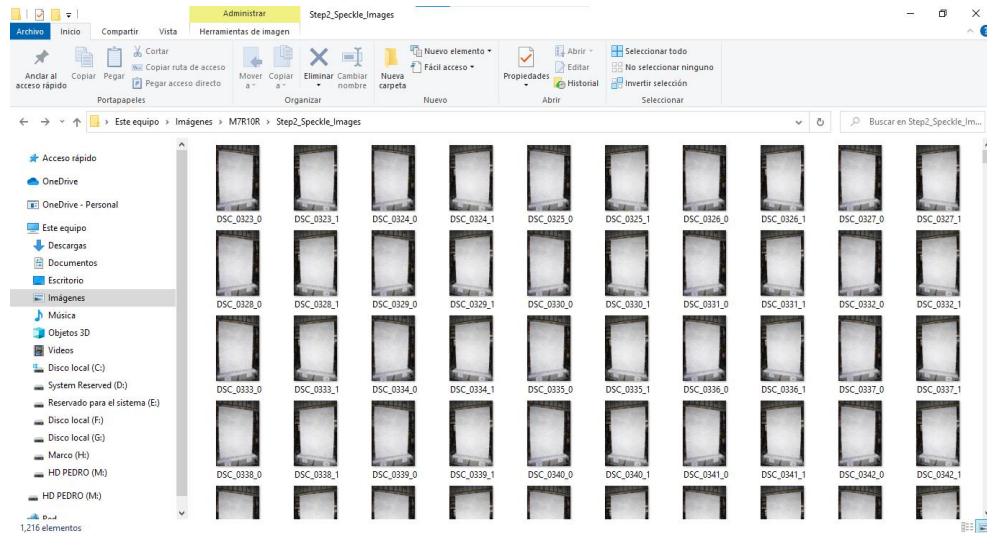


Figura 7. Imágenes de speckle orientadas en el mismo sentido y con la nomenclatura requerida por el software.

2. Procesamiento de imágenes.

A continuación, se muestra la interfaz del software de la empresa Correlated Solutions, VIC-3D 9, (Figura 8), este software comercial permite procesar de forma intuitiva una serie de pares de imágenes obteniendo campos de desplazamiento en cualquier zona de la superficie de la probeta ensayada donde haya puntos. En dicha interfaz se encuentran los “Common Tasks” que son las herramientas básicas que se van a utilizar para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes. El primero, “Open Z3D”, permite abrir proyectos que se hayan procesado previamente. El segundo, “Speckle Images” permite adjuntar los pares de imágenes de speckle a procesar. El tercero, “Calibration Images” permite adjuntar los pares de imágenes de calibración para encontrar los parámetros extrínsecos e intrínsecos del modelo de cámara pinole. Y, por último, el manual de usuario donde se describe de forma específica la funcionalidad de cada de una de las herramientas del software.

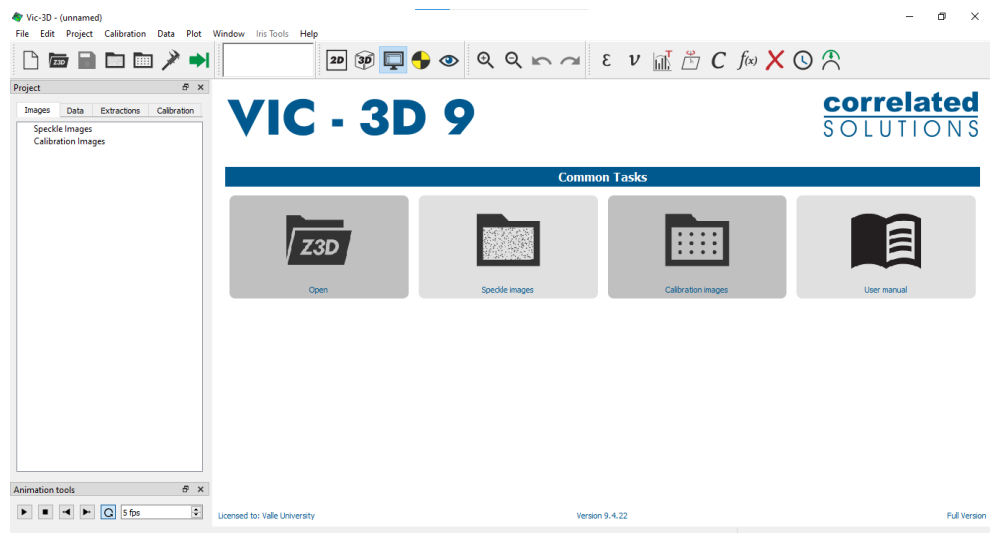


Figura 8. Interfaz general del software VIC 3D-9.

2.1. Calibración estéreo de imágenes.

La calibración es el primer paso dentro del procesamiento digital de imágenes siguiendo el flujo de trabajo del software, es necesario encontrar la geometría del modelo de cámara pinhole para darle sentido físico a los desplazamientos y un sistema coordenado al campo tridimensional de píxeles.

Instrucciones:

- 2.1.1. Abra el “Common Task” correspondiente a “Calibration Images”, con ello se abrirá una pestaña donde debe seleccionar todas las imágenes de calibración del ensayo para cargarlas en el software, ver figura 9.

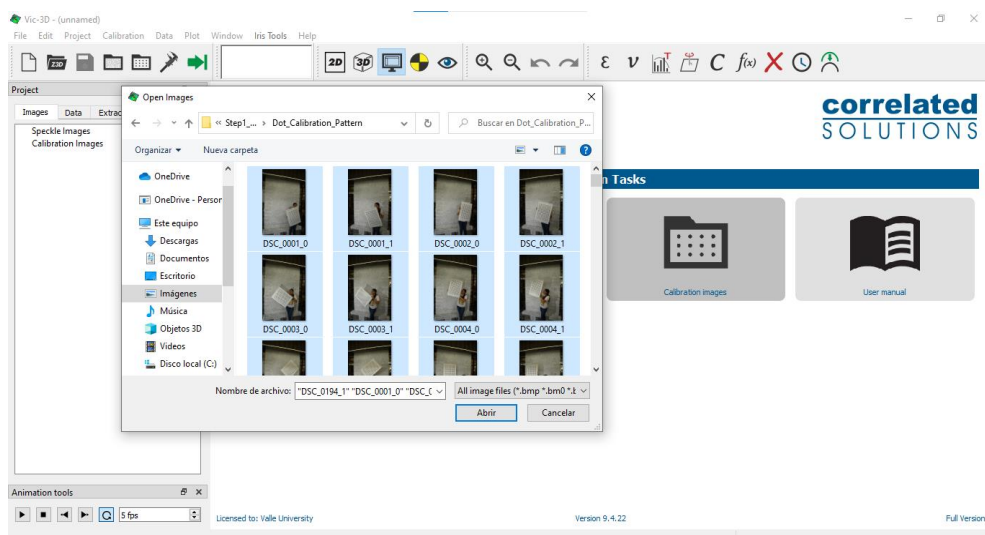


Figura 9. Selección de imágenes de calibración para cargarlas en el software.

- 2.1.2. Con las imágenes cargadas, de clic al icono del pie de rey para abrir la interfaz de “Stereo System Calibration”. Luego, de clic en la pestaña “Target”, donde debe definir

las propiedades geométricas del patrón de calibración utilizado en el ensayo, es decir, el número de puntos en X y Y, el desfase en X y Y, y el espaciamento entre centros de los puntos de calibración, que en este caso son 45.45mm. Adicional, debe seleccionar el tipo de distorsión del lente de la cámara, que, en este caso, utilizando las cámaras DSLR Nikon D5600 se sugiere utilizar la distorsión estándar radial de tipo 2, (Figura 10).

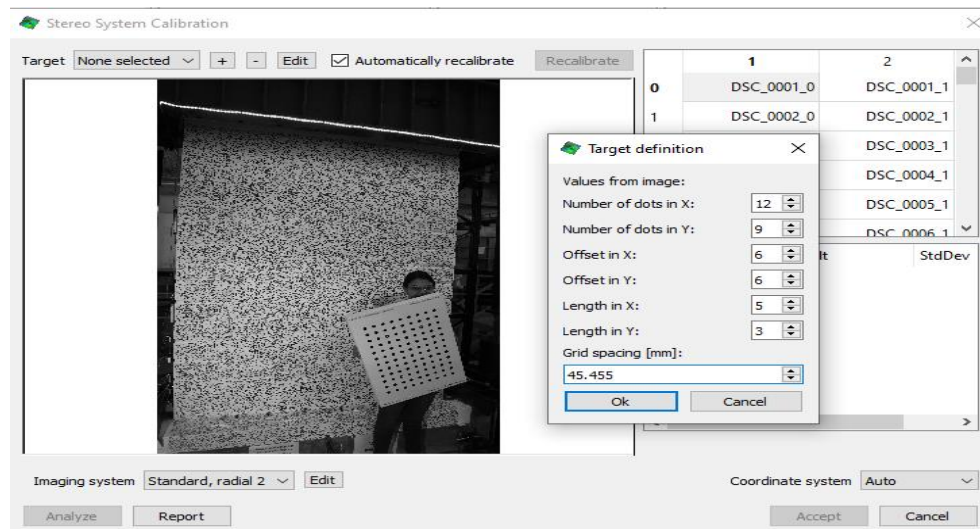


Figura 10. Interfaz de calibración y definición del patrón de calibración utilizado.

Para generar los patrones de calibración personalizados puede utilizar el software libre de Correlated Solutions denominado “Target Generator”, con el puede generar todo tipo de patrones que se ajusten a las necesidades de su ensayo y exportarlos a pdf para imprimirlos. La interfaz del programa se muestra en la figura 11.

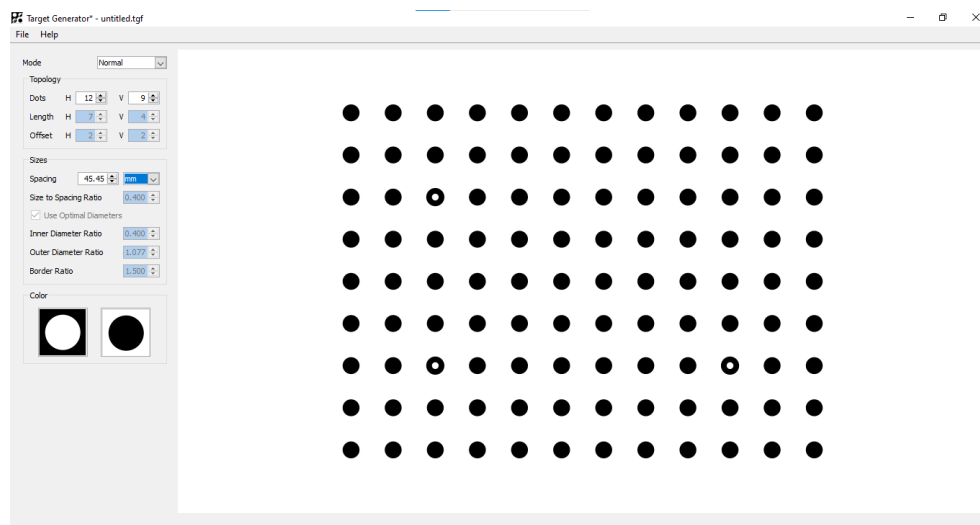


Figura 11. Interfaz del software libre Target Generator.

2.1.3. De clic en “Analyze” para iniciar el procesamiento de las imágenes de calibración, el software identificara los 108 puntos del patrón de calibración para ambas cámaras y

calculara un error de proyección al estimar los parámetros del modelo de cámara pinole, (Figura 12).

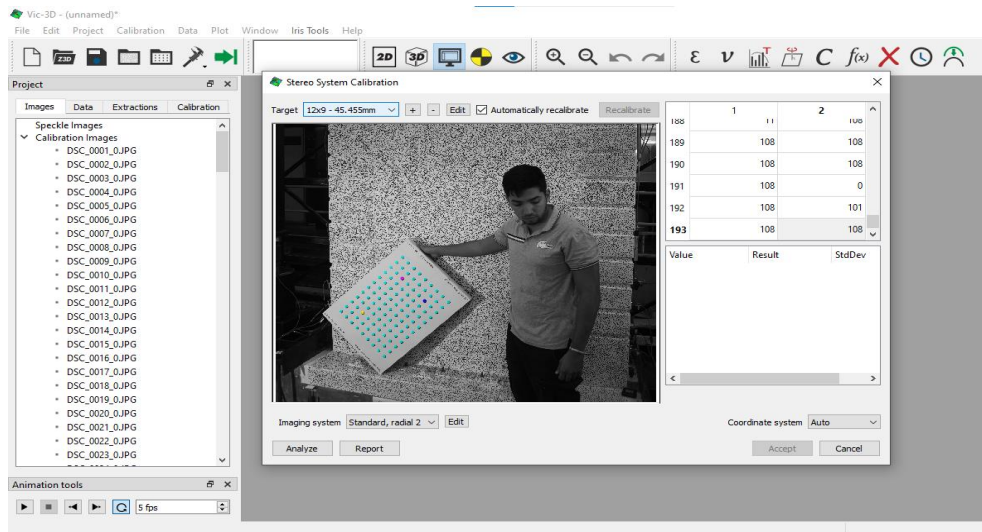


Figura 12. Procesamiento de imágenes de calibración.

En algunas ocasiones y por efectos del reflejo en los patrones de calibración no se detectan la totalidad de los puntos, como se muestra en la figura 13, generando errores en la calibración lineal de alguna de las cámaras, por ello, debe seleccionar todas las imágenes en las cuales no se hayan detectado la totalidad de los puntos y eliminarlas removiendo las filas correspondientes. Para ello, de clic derecho sobre las imágenes seleccionadas y seleccione remover filas, (Figura 14).

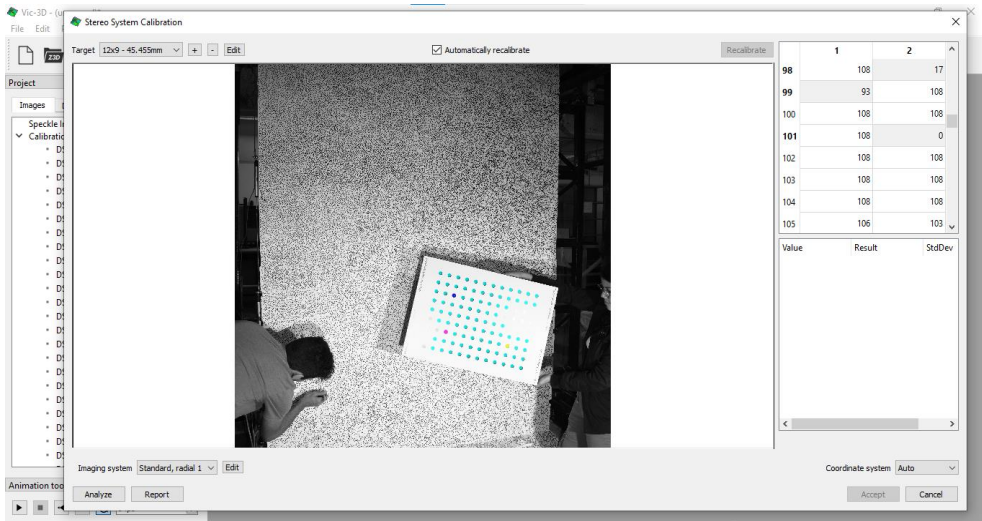


Figura 13. Problemas de reflejo en el patrón de calibración, no se detectan la totalidad de los puntos de referencia.

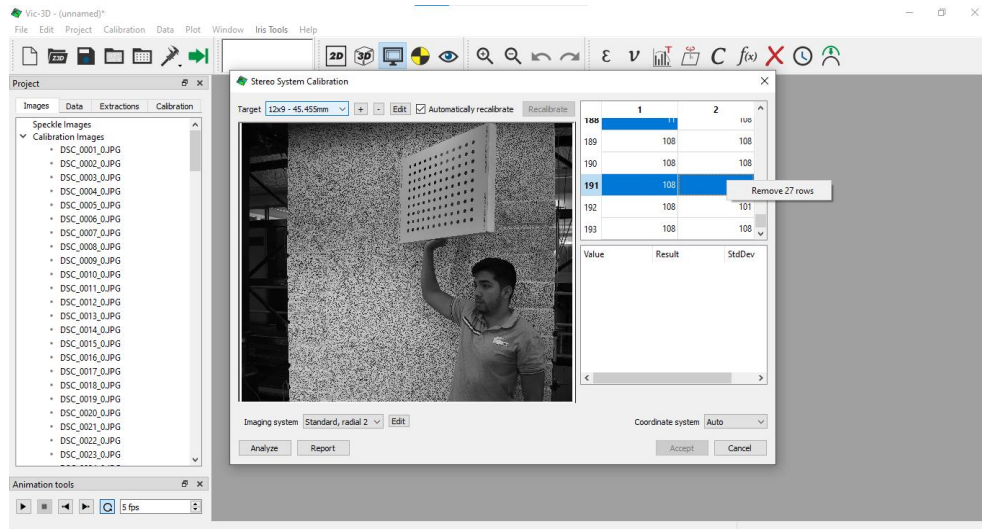


Figura 14. Eliminación de imágenes de calibración que presentan problemas en la detección de los puntos de referencia.

Al removerlas, el software automáticamente recalibrará las imágenes obteniendo los coeficientes de error de proyección para cada imagen en píxeles y su respectivo promedio, cuyos valores recomendablemente deben estar por debajo de 0.300. Sin embargo, estos valores pueden llegar a ser más altos, (Figura 15), por lo que se debe eliminar todas aquellas imágenes que arrojen errores de proyección muy grandes, disminuyendo dicho error hasta un valor admisible. Antes de eliminar las imágenes se tenía un error promedio de 0.291 píxeles y se disminuye hasta 0.148 píxeles, (Figura 16).



Figura 15. Resultados de la calibración y su respectivo error medio previo a eliminar las imágenes con errores muy altos.



Figura 16. Resultados de la calibración y su respectivo error medio después de eliminar las imágenes con errores muy altos.

2.1.4. Cuando se obtenga un valor relativamente bajo de clic en aceptar para obtener los respectivos parámetros intrínsecos y extrínsecos del modelo de cámara Pinhole y la transformación de coordenadas, (Figura 17), y dar por terminada la fase de calibración.

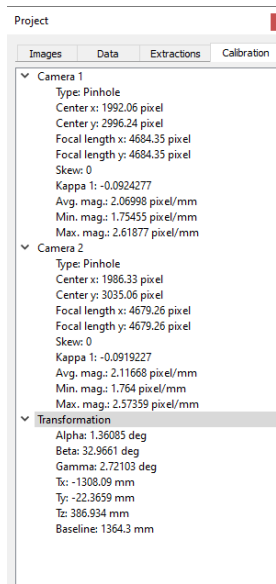


Figura 17. Parámetros intrínsecos y extrínsecos del modelo de cámara pinhole y sus respectivos coeficientes de transformación.

Nota: la mayoría de los errores de calibración están relacionados con el reflejo generado sobre los patrones de calibración, esto sucede debido al tipo de papel y tinta con el que esta impreso el patrón, por ello, si se garantiza un patrón de calibración con poco reflejo y una tinta bastante negra, se obtendrán coeficientes de calibración bajos incluso por debajo de 0.100. Estos valores son los que se obtienen con los patrones de calibración comerciales de Correlated Solutions que son impresos con altos estándares de calidad. Adicionalmente, la iluminación juega un papel muy importante, malas condiciones de iluminación pueden generar sombras o reflejos en parte del

patrón generando errores de proyección.

2.2. Correlación digital de imágenes.

La correlación de imágenes es el segundo paso dentro del procesamiento digital de imágenes siguiendo el flujo de trabajo del software, es necesario encontrar la geometría del modelo de cámara Pinhole para darle sentido físico a los desplazamientos y un sistema coordinado al campo tridimensional de píxeles.

Instrucciones:

- 2.2.1. Abra el “Common Task” correspondiente a “Speckle Images”, con ello se abrirá una pestaña donde debe seleccionar todas las imágenes de speckle del ensayo para cargarlas en el software, (Figura 18).

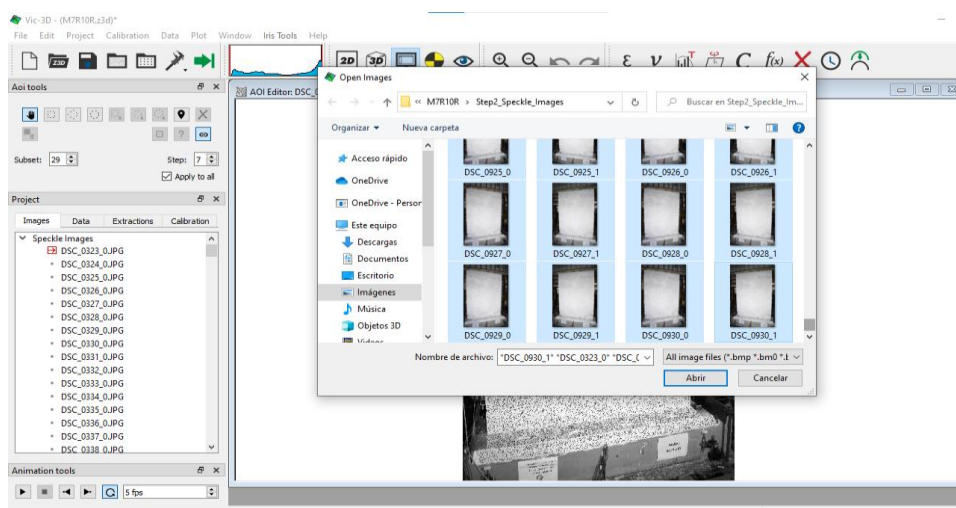


Figura 18. Selección de imágenes de speckle para cargarlas en el software.

- 2.2.2. Una vez cargadas las imágenes, se habilitará una interfaz denominada “AOI, área de interés”, donde como usuario debe hacer uso de las herramientas del editor para seleccionar la región que desea analizar con correlación digital de imágenes, debe seleccionar únicamente las zonas donde tenga el patrón de puntos. Para el caso específico de los muros se utilizó la herramienta de polígono para lograr seleccionar todos los contornos, (Figura 18).

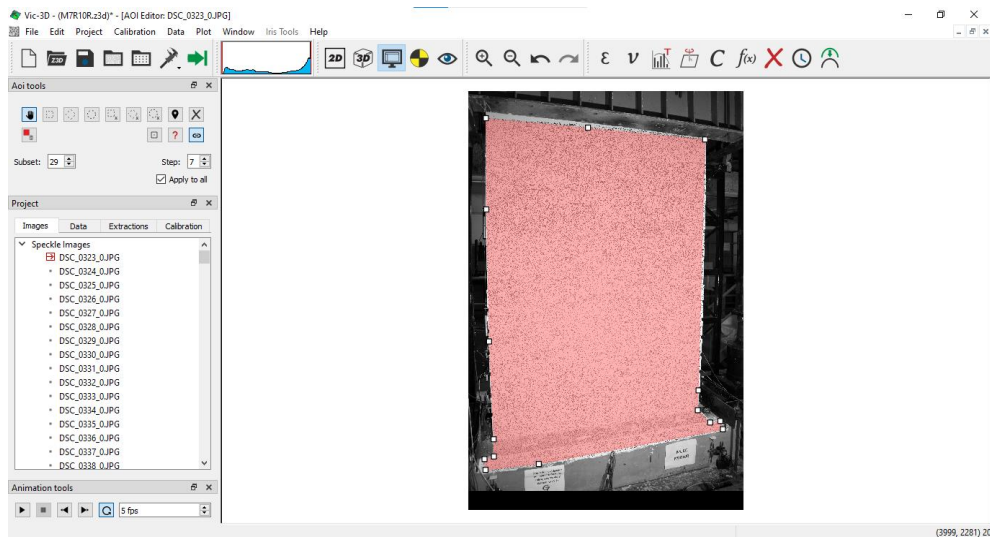


Figura 18. Selección del área de interés AOI del elemento ensayado.

Dentro de los “AOI Tools” se encuentra una herramienta que permite en base a la distribución, uniformidad, y densidad del patrón puntos, sugerir un tamaño de subset y el nivel de ruido correspondiente de la imagen. Las zonas con mayores intervalos de incertidumbre en pixeles tienen patrones de puntos de menor calidad, esta herramienta sirve para evaluar previo a un ensayo la calidad del patrón desarrollado y sugerir que zonas deben corregirse antes de iniciar. En el caso específico del muro procesado, se tiene un intervalo de incertidumbre muy bajo cercano a 0.0079 pixeles y uniforme en toda la superficie, lo que indica que el patrón de puntos desarrollado tiene muy buenas características, (Figura 19).

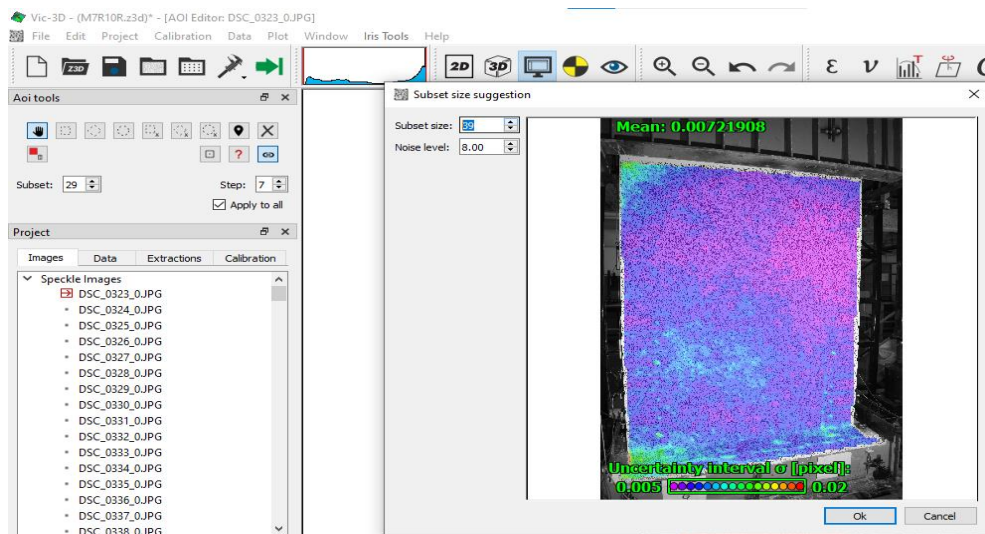


Figura 19. Tamaño de subset sugerido e intervalos de incertidumbre medidos de la probeta.

Nota: El tamaño de subset sugerido por el software es de 29 pixeles y un nivel de ruido de 8 pixeles. Sin embargo, este tamaño es únicamente una sugerencia y se deben analizar otras variables como la presencia de irregularidades en la probeta, como el caso de las platinas adheridas a la superficie de los muros, donde si se utiliza un tamaño de subset muy pequeño se pueden presentar problemas durante la correlación, generando zonas vacías sin datos, ya que en dichas zonas la distribución y densidad de puntos no es la más

adecuada debido a la dificultad de aplicación, (Figura 20). Otro problema radica en que, si el desplazamiento relativo entre dos regiones de la superficie de la probeta se separan una distancia muy grande debido a agrietamientos, se tendrán problemas de correlación y ausencia de datos en algunas regiones y para algunos tiempos específicos. Se recomienda en muros para evitar problemas, incrementar el tamaño del subset hasta valores superiores a 38 pixeles y no mayores a 55 pixeles para disminuir los errores de correlación y vacíos de datos, (Figura 21).

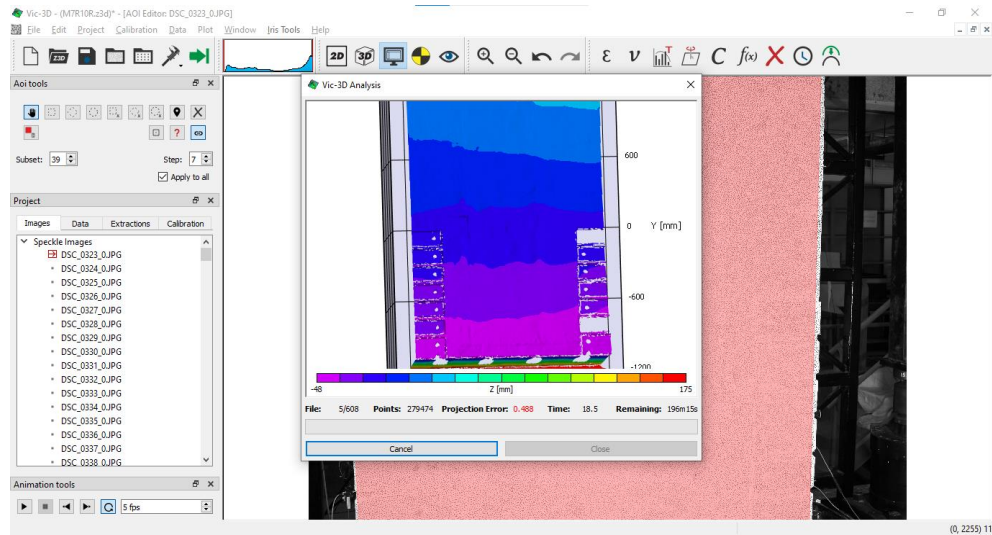


Figura 20. Problemas de correlación en la zona de platinas debido a la selección de un tamaño de subset muy pequeño.

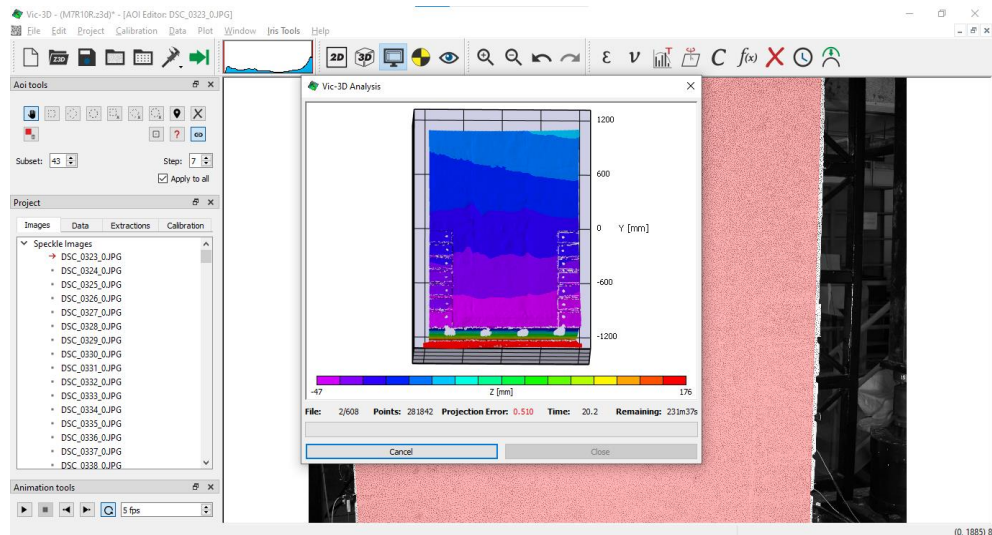


Figura 21. Corrección de los problemas de correlación al aumentar el tamaño de subset.

- 2.2.3. Con estos parámetros definidos, de clic en el botón verde para desplegar la interfaz de análisis, (Figura 21).; en ella debe definir los criterios de correlación, el método de análisis, los límites de confianza y las opciones del postprocesamiento de su análisis. En el caso de los muros se debe activar el cálculo de la deformación unitaria o “strain” mediante el tensor de Lagrange, además, cuando sus imágenes tengan mucho ruido debe activar el filtro pasa bajo de imágenes. Todos los otros parámetros se dejan por

defecto, (Figura 22). Finalmente, y para iniciar el procesamiento de clic en “Run” para iniciar la correlación digital de imágenes.

Nota: El tiempo de procesamiento de los pares de imágenes depende en gran medida del procesador del equipo, variando el tiempo de procesamiento por par de imágenes entre 5 a 30 segundos.

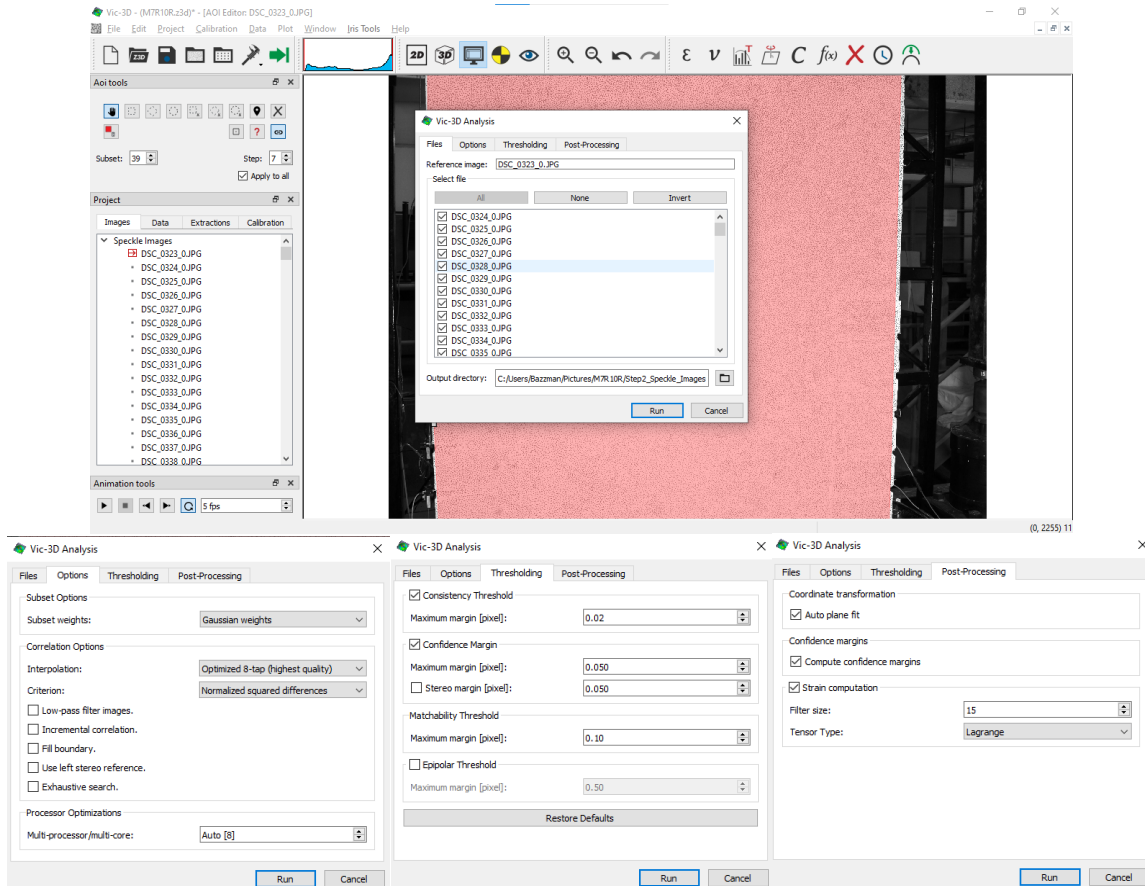


Figura 22. Parámetros definidos para ejecutar el análisis en los muros de concreto reforzado.

2.2.4. Finalizado el procesamiento, aparece la siguiente interfaz con los resultados del análisis, (Figura 23). Esta interfaz incluye un reporte con los errores de proyección para cada par de imágenes, en nuestro caso no es de interés, se debe cerrar y continuar con el postprocesamiento.

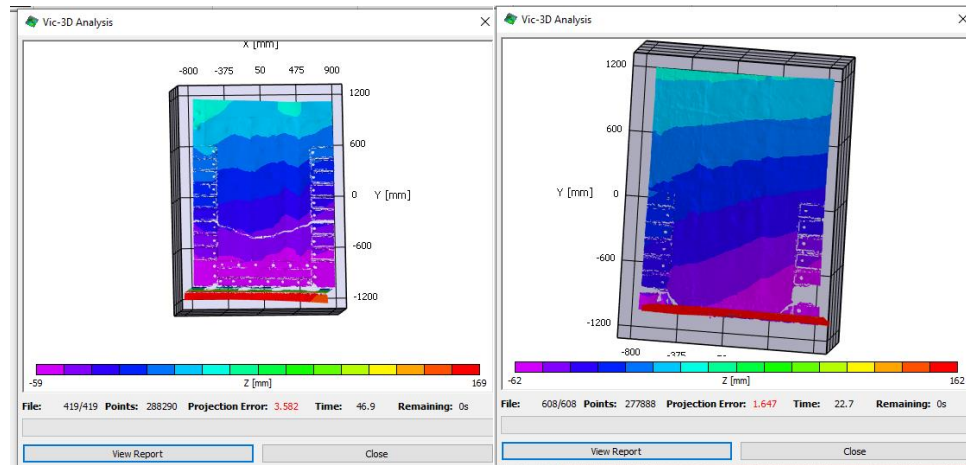


Figura 23. Finalización de la fase de procesamiento, se muestran los errores de proyección y la cantidad de imágenes procesadas.

3. Post procesamiento.

El post procesamiento hace referencia a todas aquellas actividades que se deben llevar a cabo para la extracción de datos de interés e imágenes de los estados de daño a lo largo del ensayo, necesarios para analizar el comportamiento mecánico de los elementos a partir del análisis de los campos de desplazamiento y deformaciones. A continuación, se explica el uso de las más relevantes y de mayor interés.

3.1. Extracción imágenes de daño:

El software permite visualizar en escala de colores, múltiples variables para cada uno de los pares de imágenes procesados, (Figura 24), que se almacenan como archivos “.out”, por lo que se pueden extraer los frames individuales para evaluar evolución de estados de daño, entre otros. El usuario puede escoger la variable que le sea de interés y van desde las coordenadas de la superficie X, Y, y Z, el desplazamiento en X “U”, Y “V” y Z “W”, hasta las deformaciones unitarias en x “exx”, en Y “eyy”, por cortante “exy” y las principales de Lagrange “e1”.

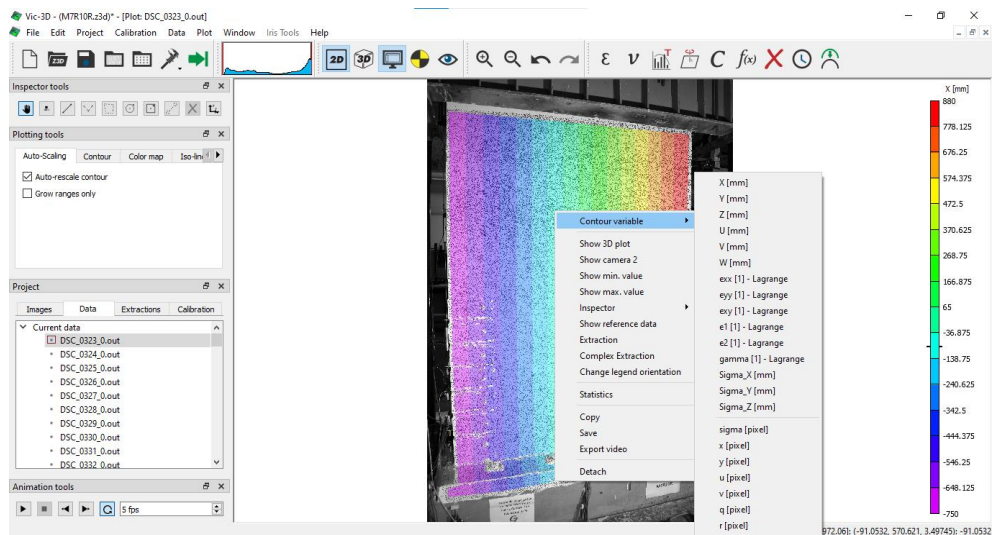


Figura 24. Interfaz de visualización de diferentes variables de contorno.

- 3.1.1.** Seleccione en “Contour variable” la variable de interés en el análisis. Para evolución de estados de daño y agrietamientos se utilizan las deformaciones unitarias en x “ e_{xx} ”, en Y “ e_{yy} ”, por cortante “ e_{xy} ” y las principales de Lagrange “ e_1 ”. Estas últimas, son en las que mejor se aprecia el daño, (Figura 25).

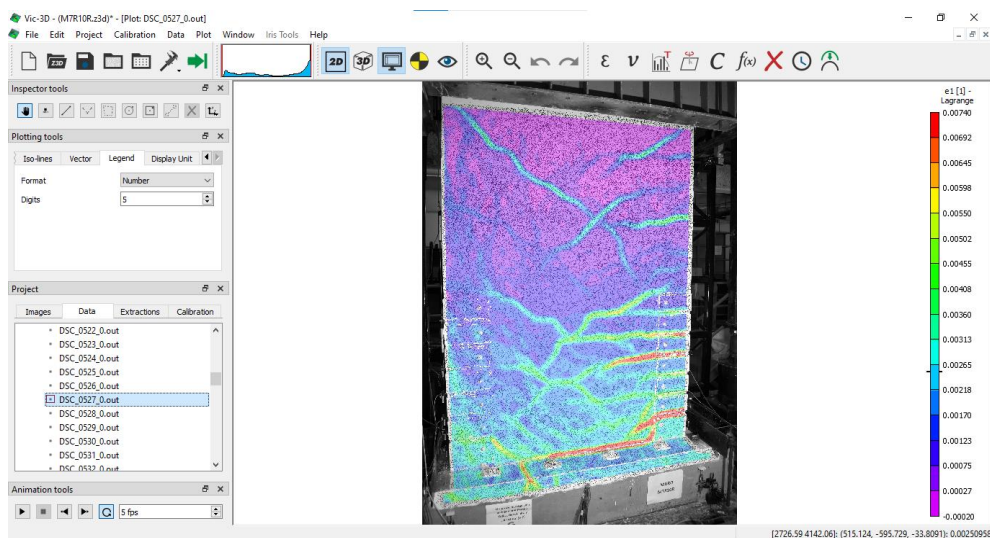


Figura 25. Deformación unitaria principal calculada con el tensor de Lagrange e_1 .

- 3.1.2.** En “Plotting tools” de clic en “legend” para ajustar en un valor fijo el número de cifras decimales que la barra de la derecha muestra para cada imagen, (Figura 25). Si no se hace esto la imagen se moverá lateralmente generando un efecto visual adverso. Además, debe establecer si desea que las imágenes se auto escalen durante todo el ensayo o si va a mantener una escala estándar para todo el desarrollo de este.
- 3.1.3.** En la interfaz “Export video” debe exportar los frames individuales o un video de todo el ensayo a la tasa de frames que desee y luego dar clic en “Export”, (Figura 26). Se empezarán a extraer los frames individuales guardándose en la carpeta especificada por el usuario, (Figura 27, 28). Para el análisis de los muros siempre se extraen los frames individuales ya que estos se post procesan en Matlab sincronizándolos con fuerza y desplazamiento.

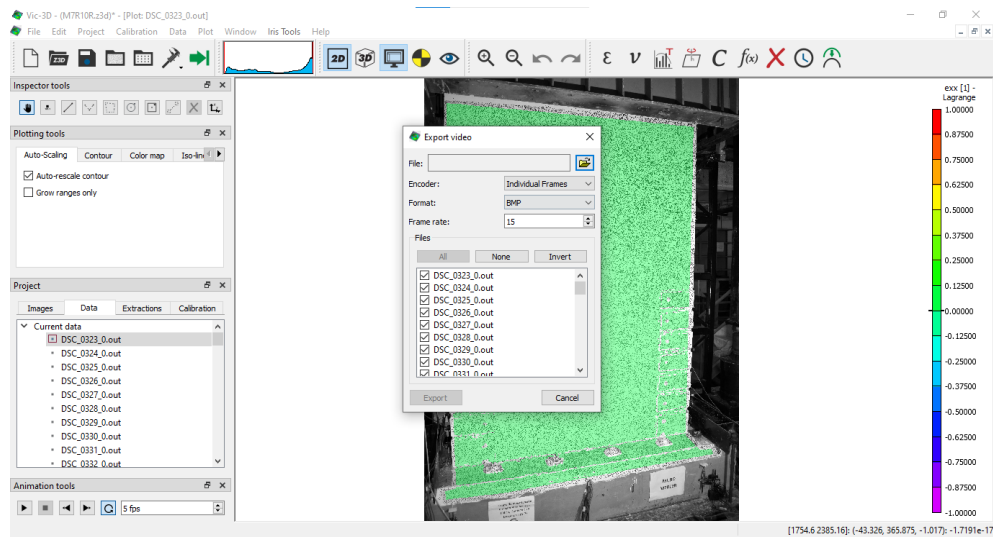


Figura 26. Interfaz para exportar imágenes correspondientes a los estados de daño.

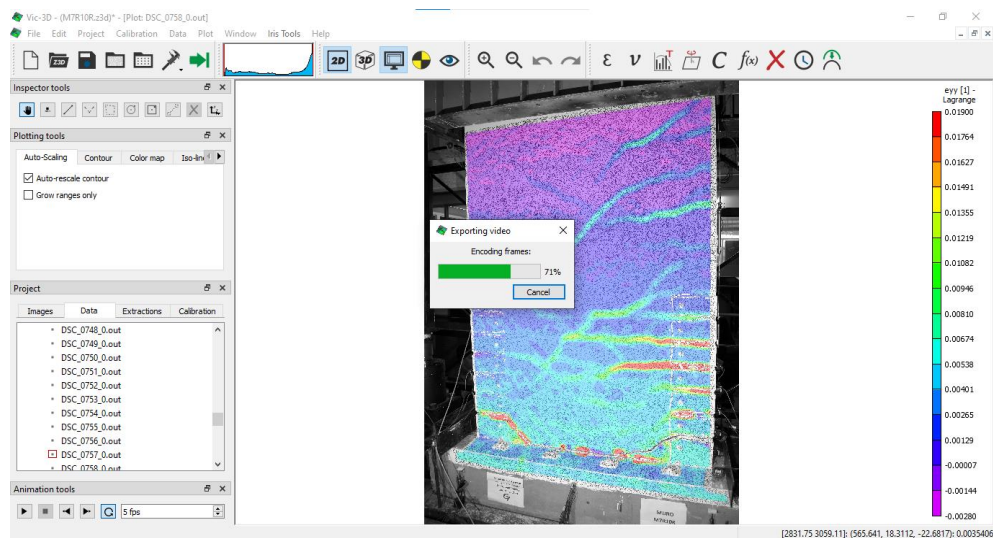


Figura 27. Extracción de frames individuales con los estados de daño.

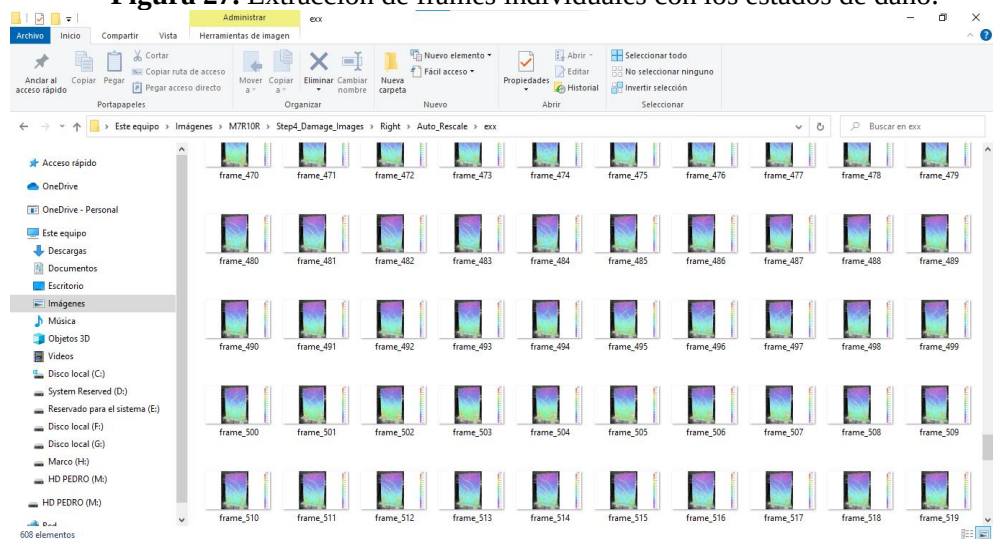


Figura 28. Resultado de la extracción de frames individuales

3.2. Extracción datos perimetrales.

El software y el DIC en general permite extraer puntos con información tridimensional en cualquier lugar de la región de interés analizada, esto representa una ventaja con respecto a los sensores tradicionales que solo proporcionan información en el lugar donde se coloquen y limitado a la cantidad que se tengan de los mismos. En el caso específico de los muros, es necesario extraer perfiles de datos con las mismas alturas desde la base cada 50mm en altura a ambos lados del muro, además de datos cada 50mm horizontalmente en la parte alta del muro. Con esto, se hacen los análisis respectivos del comportamiento del elemento bajo las cargas aplicadas. Para extraer estos datos, el software cuenta con una herramienta para extraer datos nodales en las coordenadas que proporcione el usuario, tal y como se describe a continuación:

- 3.2.1. Obtenga manualmente las coordenadas de las esquinas de la región analizada colocando el cursor en dichos lugares, debe anotar los valores en X y Y, ya que le servirán para saber cuáles son los límites dentro de los cuales puede extraer datos y definir las coordenadas desde las cuales se extraerán datos.
- 3.2.2. Con esto definido, de clic en “Data” y luego en “Extract node data” para desplegar la siguiente interfaz que le permitirá extraer puntos, líneas, o grillas de datos según lo requiera. Debe definir además las variables de interés que va a extraer, en este caso particular se extraen los valores de X, Y y Z en mm para luego postprocesar la información.
- 3.2.3. Para extraer los datos perimetrales seleccione la herramienta “Line” y defina las coordenadas del punto de inicio y final de la extracción de datos y el número de puntos que desea extraer dentro de esas coordenadas. Las coordenadas en X para los datos perimetrales permanecen fijas, como se muestra en la figura que tienen un valor de -735mm. El punto de inicio tiene como coordenadas en Y -1060mm y el punto de fin tiene como coordenadas en Y 1140mm, lo que da como resultado una longitud de análisis de 2200mm, por lo que, si requerimos datos cada 50mm, al hacer la división da como resultado 45 datos en el tramo de análisis. Se repite el mismo análisis para lado derecho y superior del elemento, (Figura 29, 30, 31, 32).

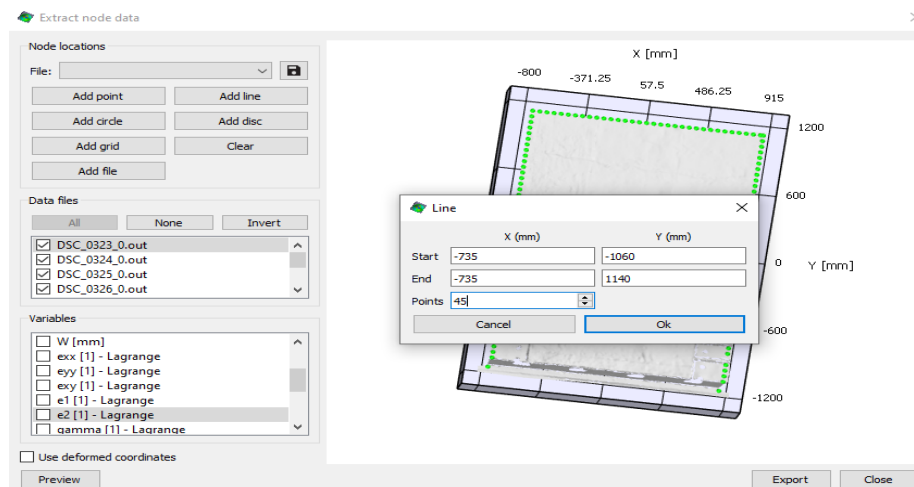


Figura 29. Coordenadas del punto de inicio y final de la extracción de datos y el número de puntos a extraer dentro de esas coordenadas, lado izquierdo o linse.

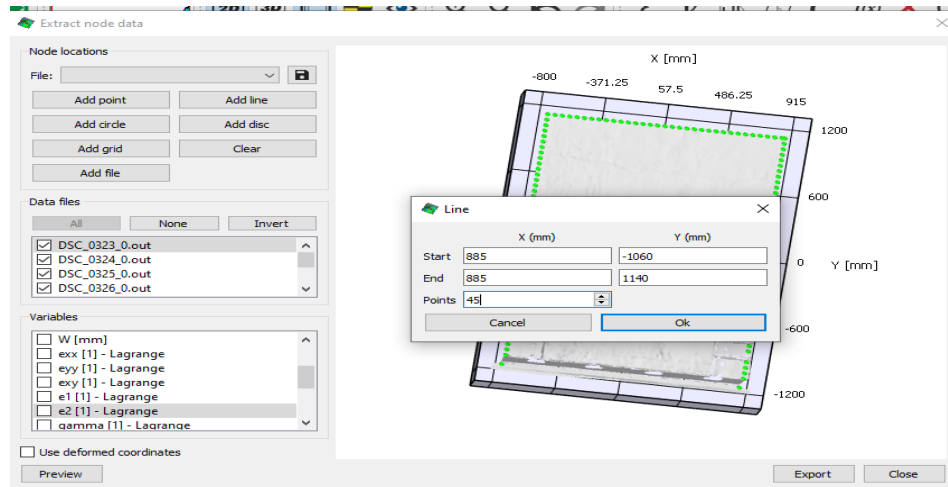


Figura 30. Coordenadas del punto de inicio y final de la extracción de datos y el número de puntos a extraer dentro de esas coordenadas, lado derecho o patio.

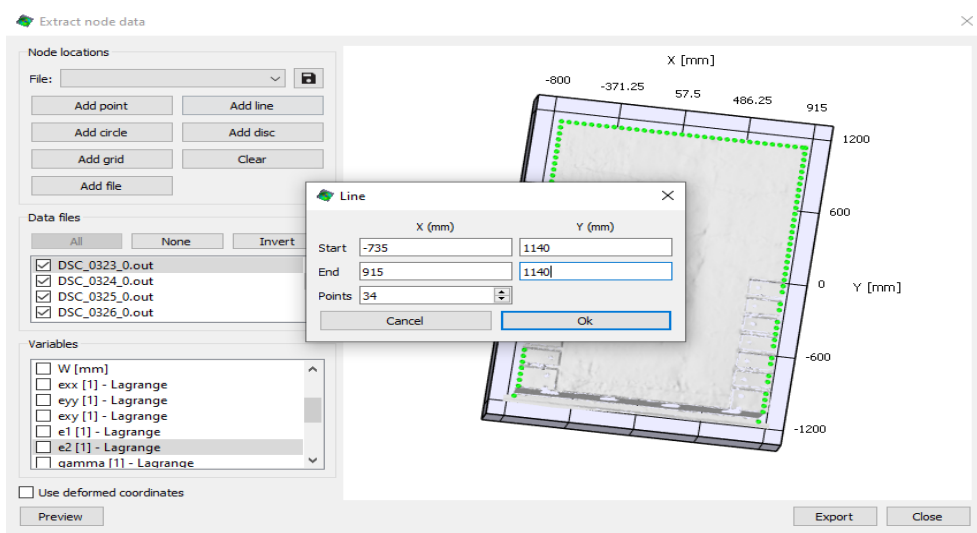


Figura 31. Coordenadas del punto de inicio y final de la extracción de datos y el número de puntos a extraer dentro de esas coordenadas, lado superior o up.

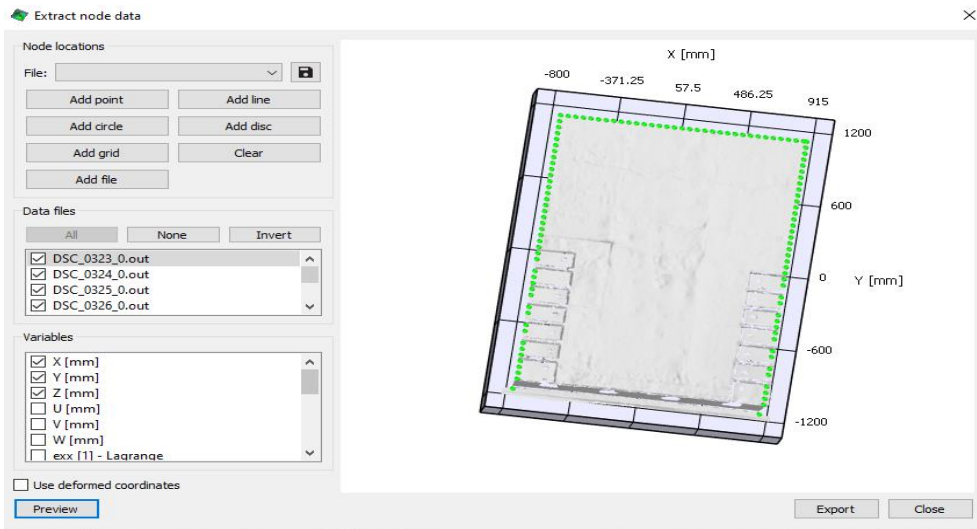


Figura 32. Puntos seleccionados para la extracción de datos perimetrales del elemento ensayado.

Nota: Es posible utilizar las otras herramientas para extraer datos en puntos localizados, (Figura 33), y también para extraer grillas de datos en toda la superficie, (Figura 34), esto debe adaptarlo a su necesidad de análisis.

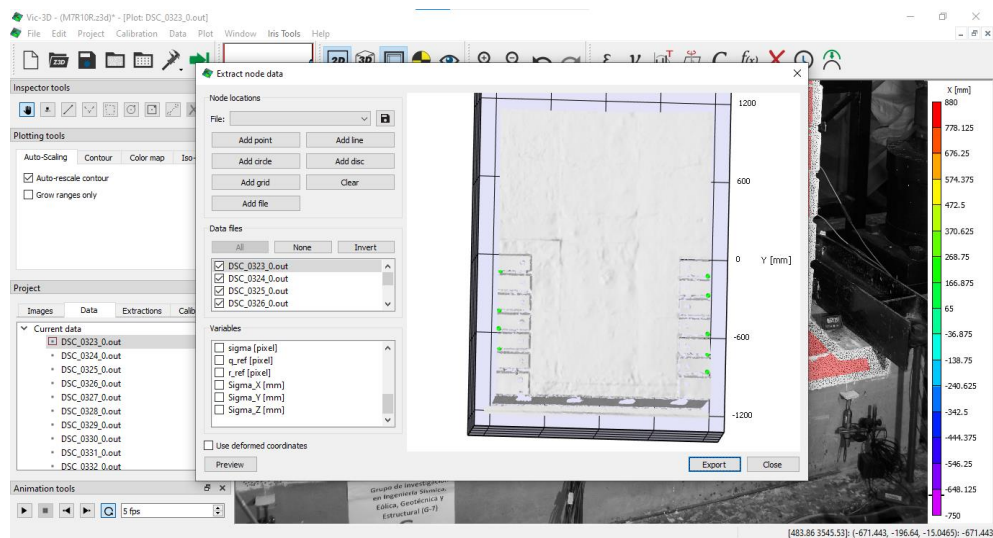


Figura 33. Extracción de datos en puntos localizados.

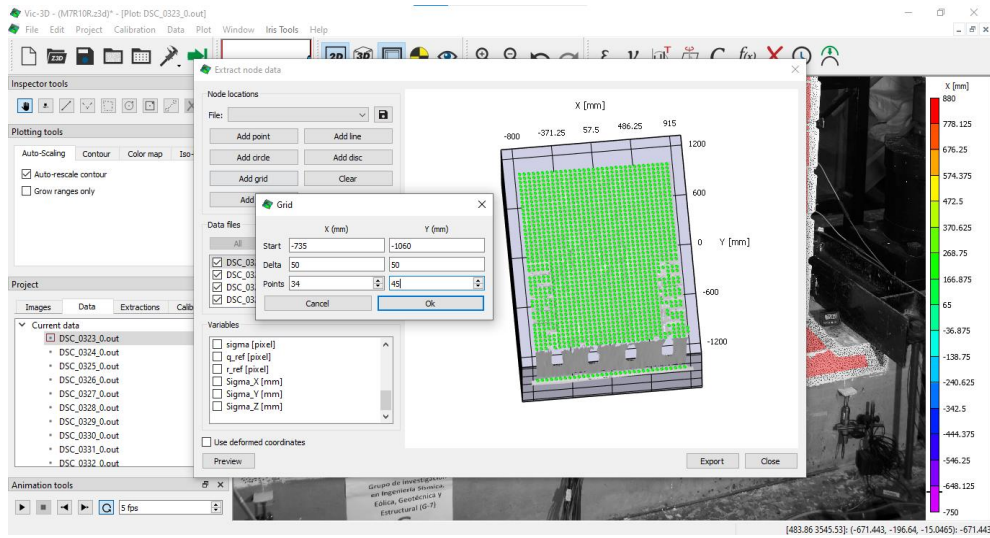


Figura 34. Extracción de grilla de datos en toda la superficie cada 50mm horizontal y verticalmente.

- 3.2.4. De clic en “Export” para extraer los datos en formato CSV, los datos quedaran ordenados en columnas con las coordenadas X, Y y Z de cada punto, que posteriormente puede abrir en Excel o Matlab para postprocesarlos y darles el uso que requiera, (Figura 35, 36),

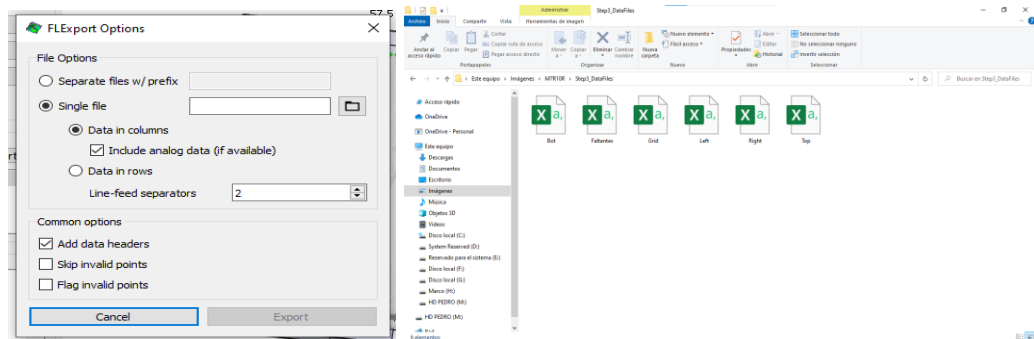


Figura 35. Interfaz para exportar los datos seleccionados en el paso anterior y archivos con los datos respectivos.

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	-735	-1060	-39.5524	-735	-1010	-38.4219	-735	-960	-36.7504	-735	-910	-35.1295	-735	-860	-33.1679	-735	-810	-31.2063	-735	-760	-29.2447	-735	-710	-27.2831
2	-735.06	-1060.06	-39.6517	-735.079	-1010.07	-38.5722	-735.094	-960.058	-36.9135	-735.075	-910.054	-35.2716	-735.074	-860.059	-33.2998	-735.066	-810.06	-31.409	-735.058	-760.061	-31.5182	-735.05	-710.062	-27.3923
3	-734.993	-1060	-39.7039	-735.009	-1010.01	-38.6113	-735.002	-959.99	-36.92	-734.985	-909.985	-35.276	-734.978	-859.992	-33.2941	-734.969	-809.997	-31.5132	-734.96	-759.999	-31.6224	-734.951	-709.999	-27.4445
4	-735.023	-1059.92	-39.6826	-735.042	-1009.93	-38.5904	-735.04	-959.91	-36.912	-735.016	-909.904	-35.2723	-735.007	-859.913	-33.3006	-734.998	-809.918	-31.5183	-734.989	-759.92	-31.6285	-734.98	-709.92	-27.4968
5	-734.952	-1059.87	-39.6285	-734.967	-1009.88	-38.5303	-734.97	-959.86	-36.8701	-734.949	-909.847	-35.228	-734.931	-859.852	-33.2238	-734.923	-809.857	-31.4184	-734.914	-759.859	-31.5276	-734.905	-709.859	-27.5491
6	-735.161	-1060.11	-40.2244	-735.166	-1010.11	-39.1201	-735.18	-960.099	-37.464	-735.159	-910.079	-35.8025	-735.156	-860.081	-33.8133	-735.155	-810.082	-31.8225	-735.146	-760.083	-31.9317	-735.137	-710.083	-27.6014
7	-734.987	-1059.99	-39.7968	-735.008	-1010	-38.7276	-735.015	-959.99	-37.0424	-735.002	-909.988	-35.4045	-734.992	-860	-33.4283	-734.983	-810.001	-31.4375	-734.974	-760.002	-31.5467	-734.965	-710.002	-27.6537
8	-735.083	-1060.03	-39.9372	-735.101	-1010.05	-38.8494	-735.115	-960.027	-37.1762	-735.096	-910.016	-35.5324	-735.086	-860.022	-33.5473	-735.084	-810.023	-31.5565	-735.075	-760.024	-31.6657	-735.066	-710.024	-27.706
9	-735.252	-1060.43	-40.9329	-735.252	-1010.41	-39.7958	-735.275	-960.384	-38.144	-735.254	-910.347	-36.4942	-735.253	-860.352	-34.5136	-735.248	-810.353	-31.6757	-735.239	-760.354	-31.7849	-735.23	-710.354	-27.7583
10	-735.165	-1060.36	-40.4484	-735.195	-1010.36	-39.3645	-735.206	-960.329	-37.6832	-735.188	-910.307	-36.0458	-735.19	-860.309	-34.0638	-735.185	-810.31	-31.1849	-735.176	-760.311	-31.2941	-735.167	-710.311	-27.8101
11	-735.24	-1060.53	-40.5976	-735.266	-1010.53	-39.5054	-735.287	-960.501	-37.8401	-735.262	-910.475	-36.1977	-735.269	-860.482	-34.2376	-735.264	-810.476	-31.3387	-735.255	-760.477	-31.4479	-735.246	-710.477	-27.8613
12	-735.226	-1060.31	-40.2337	-735.258	-1010.33	-39.1627	-735.271	-960.301	-37.4785	-735.258	-910.287	-35.8346	-735.263	-860.301	-33.8681	-735.261	-810.288	-31.3478	-735.252	-760.289	-31.457	-735.243	-710.289	-27.9125
13	-735.271	-1060.29	-40.2272	-735.295	-1010.29	-39.1351	-735.317	-960.271	-37.4658	-735.301	-910.256	-35.817	-735.313	-860.271	-33.8669	-735.31	-810.257	-31.346	-735.297	-760.258	-31.4561	-735.288	-710.258	-27.9632
14	-735.265	-1060.28	-40.3088	-735.286	-1010.28	-39.2128	-735.302	-960.255	-37.5404	-735.284	-910.248	-35.9086	-735.286	-860.246	-33.9326	-735.27	-810.249	-31.3451	-735.261	-760.247	-31.4552	-735.252	-710.249	-28.0139
15	-735.13	-1060.17	-40.1255	-735.157	-1010.18	-39.0388	-735.172	-960.16	-37.3719	-735.151	-910.141	-35.7187	-735.145	-860.153	-33.7557	-735.147	-810.142	-31.1622	-735.138	-760.143	-31.2714	-735.129	-710.143	-27.964
16	-735.136	-1060.15	-40.1875	-735.156	-1010.15	-39.0785	-735.163	-960.12	-37.3905	-735.154	-910.107	-35.7547	-735.148	-860.123	-33.7794	-735.14	-810.108	-31.1613	-735.131	-760.109	-31.2705	-735.122	-710.109	-27.964
17	-735.141	-1060.16	-40.2255	-735.155	-1010.16	-39.1308	-735.158	-960.123	-37.44	-735.151	-910.102	-35.7861	-735.124	-860.11	-33.7904	-735.122	-810.103	-31.1604	-735.113	-760.104	-31.2696	-735.104	-710.104	-27.964
18	-735.111	-1060.13	-40.2564	-735.128	-1010.13	-39.1858	-735.127	-960.097	-37.4773	-735.087	-910.067	-35.8018	-735.09	-860.08	-33.8517	-735.095	-810.068	-31.1595	-735.086	-760.069	-31.2687	-735.077	-710.069	-27.964
19	-735.078	-1060.12	-40.2838	-735.095	-1010.11	-39.1894	-735.096	-960.084	-37.5077	-735.066	-910.065	-35.8618	-735.056	-860.058	-33.8823	-735.058	-810.06	-31.1586	-735.049	-760.06	-31.2678	-735.04	-710.06	-27.964
20	-735.12	-1060.52	-40.977	-735.136	-1010.5	-39.8653	-735.137	-960.453	-38.1909	-735.107	-910.425	-36.5476	-735.095	-860.399	-34.5471	-735.081	-810.426	-31.3667	-735.072	-760.427	-31.4562	-735.063	-710.427	-28.014
21	-735.047	-1060.27	-40.7142	-735.053	-1010.25	-39.6061	-735.055	-960.226	-37.9323	-735.024	-910.197	-36.2886	-735.013	-860.179	-34.2979	-734.992	-810.198	-31.157	-734.983	-760.199	-31.2668	-734.974	-710.199	-27.964
22	-735.147	-1060.28	-40.7165	-735.164	-1010.27	-38.6133	-735.16	-960.325	-37.6207	-735.135	-910.206	-36.3766	-735.134	-860.386	-34.3703	-735.113	-810.207	-31.1561	-735.104	-760.208	-31.2659	-735.095	-710.208	-27.964

Figura 36. Distribución de los datos exportados en formato .csv, cada punto tiene coordenadas X, Y y Z. Las filas hacen referencia al número de imagen.

Nota: El software adicionalmente permite extraer datos desde la pestaña “Inspector tools”, el usuario puede manualmente, sin introducir una coordenada especifica, seleccionar puntos de interés, líneas, u otros para extraer los datos que sean necesarios, (Figura 37),. Esta opción es útil cuando sobre la probeta se han marcado puntos de interés y es posible de forma visual identificarlos.

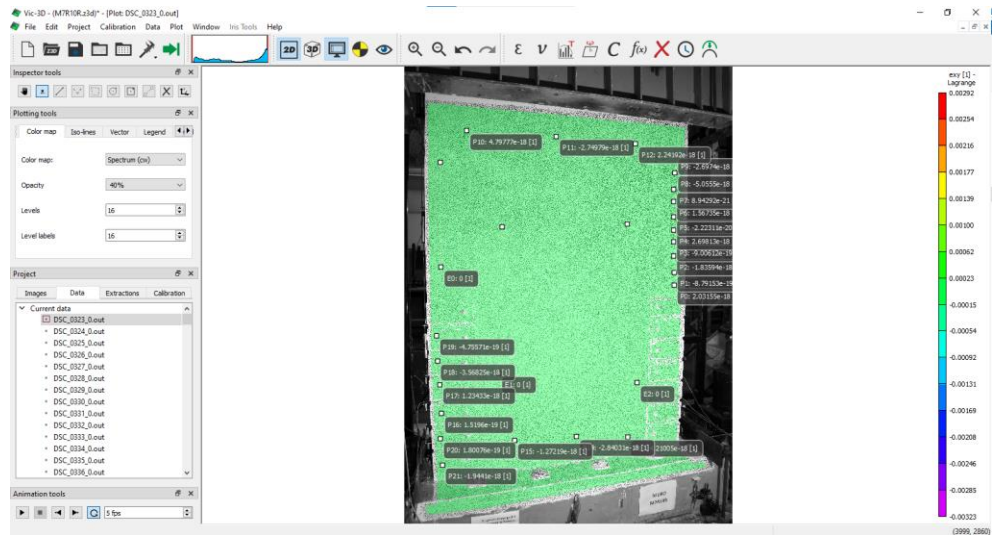


Figura 37. Extracción de datos desde la pestaña “Inspector tools”.

10.4. ANEXO 4: CERTIFICADO AL PRIMER LUGAR EN EL CONCURSO GREEN BEAM COMPETITION.



10.5. ANEXO 5: EQUIPO DE TRABAJO

