

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC) APLICADA AL ESTUDIO DE MUROS
DE MAMPOSTERÍA REFORZADA CONFINADA.

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de
Posgrado Maestría Académica en Ingeniería Civil para optar por el grado y título de
Maestría Académica en Ingeniería Civil.

Preparado por:

Esteban Antonio González Mora.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

Dedicatoria

A mis padres que me entregaron todo, a mi esposa por su amor y paciencia y a mis hijos Santiago y María Celeste, en quienes se refleja el empeño de Dios en demostrarme que me ama; que les sirva de testimonio de que todo es posible para el que cree (*Mc 9, 23*).

Agradecimientos

En primer lugar a Dios, por darme sabiduría y poner a las personas correctas en mi camino, a mi familia por todo el apoyo y al comité asesor Diego, Guillermo y Francisco por creer en este proyecto y guiarme a obtener un trabajo profesional y de calidad.

Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Civil.

PhD. Sergio Lobo Aguilar.
**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**

PhD. Diego Hidalgo Leiva.
Profesor Guía

M.Sc. Francisco Villalobos Ramírez.
Lector

PhD. Guillermo González Beltrán.
Lector

M.Sc. Alejandro Navas Carro.
Representante del Director Programa de Posgrado de Ingeniería Civil

Esteban Antonio González Mora.
Sustentante

Fecha: 2021, noviembre.

El suscrito, **Esteban Antonio González Mora, cédula 303800950**, estudiante de la carrera de Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A01835**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Correlación Digital de Imágenes (DIC) aplicada al Estudio de Muros de Mampostería Reforzada Confinada**, bajo la dirección del **Dr. Diego Hidalgo Leiva, PhD**; quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice la información contenida en esta obra.

Índice

1. Introducción.	1
2. Objetivos.	3
2.1. Objetivo General.	3
2.2. Objetivos específicos.	3
3. Alcances y limitaciones.	4
3.1. Alcances.	4
3.2. Limitaciones.	5
4. Estado del arte.	6
4.1. Imagen Digital y su procesamiento.	6
4.1.1. Definición.	6
4.1.1. Tipos de Imágenes digitales.	6
4.1.2. Procesamiento de imágenes digitales.	9
4.2. Teoría de la Correlación Digital de Imágenes.	10
4.2.1. Descripción.	10
4.2.2. Errores de medición en el DIC.	12
4.2.3. Problema de la apertura.	14
4.2.4. Distorsión.	16
4.3. Procedimiento 2D-DIC.	20
4.3.1. Preparación de la muestra.	20
4.3.1.1. Distancia de trabajo.	20
4.3.1.2. Patrón de manchas.	21
4.3.2. Registro de imágenes.	24
4.3.3. Procesamiento de las imágenes adquiridas.	25
4.3.4. Medición de campo de desplazamiento.	29
4.3.5. Estimación de campo de deformación.	33
4.3.6. Resumen.	33

4.4.	Ventajas y desventajas de la técnica DIC.....	35
4.5.	Últimos avances en la técnica del DIC.	36
5.	Implementación de la Correlación Digital de Imágenes.	40
5.1.	Muro de mampostería confinada reforzada	40
5.1.1.	Diseño.....	41
5.1.2.	Construcción.	45
5.2.	Preparación de la muestra.	46
5.2.1.	Instrumentación del muro.....	46
5.2.2.	Montaje de los mecanismos para la falla.....	47
5.2.3.	Descripción del equipo utilizado.	48
5.2.4.	Distancia de trabajo.	50
5.2.5.	Patrón de manchas.	59
5.2.5.1.	Selección del patrón a utilizar.	59
5.2.5.2.	Prueba experimental del Patrón de Manchas.....	66
5.2.5.3.	Aplicación a la muestra.	72
5.3.	Registro de imágenes.	75
5.3.1.	Protocolo de carga.....	75
5.3.2.	Cargas en la estructura.....	77
5.3.3.	Adquisición de imágenes e intervalo de tiempo.....	77
5.4.	Procesamiento de las imágenes adquiridas.	78
5.4.1.	Programa (software) utilizado.....	78
5.4.2.	Duración para procesamiento de las imágenes.....	78
6.	Resultados.....	79
6.1.	Campos de desplazamiento.....	79
6.1.1.	Desplazamientos obtenidos de los LVDT.....	79
6.1.1.1.	Desplazamientos verticales en LVDT 1.....	81
6.1.1.1.	Desplazamientos horizontales en LVDT 2.....	84

6.1.1.1.	Desplazamientos horizontales en LVDT 3.....	88
6.1.1.1.	Desplazamientos verticales en LVDT 4.....	90
6.1.1.1.	Desplazamientos horizontales en LVDT 5.....	92
6.1.1.1.	Resumen de los desplazamientos en LVDT.....	93
6.1.2.	Desplazamientos obtenidos de 2D-DIC.....	94
6.1.2.1.	Desplazamientos verticales en zona DIC LVDT 1.	96
6.1.2.1.	Desplazamientos horizontales en zona DIC LVDT 2.	97
6.1.2.1.	Desplazamientos horizontales en zona DIC LVDT 3.	100
6.1.2.1.	Desplazamientos verticales en zona DIC LVDT 4.	102
6.1.2.1.	Desplazamientos horizontales en zona DIC LVDT 5.	104
6.1.2.2.	Resumen de los desplazamientos en zonas DIC LVDT.	106
6.1.3.	Verificación de los resultados de la técnica DIC.....	108
6.1.3.1.	Desplazamientos horizontales (U).	109
6.1.3.2.	Desplazamientos verticales (V).	113
6.1.3.3.	Cálculo de la ductilidad (con base en la ASTM E2126).	117
6.1.3.4.	Resumen.	124
6.2.	Campos de deformación	127
6.2.1.	Deformación obtenida de las Galgas de Deformación.....	127
6.2.2.	Deformación obtenida de 2D-DIC.	129
6.3.	Comportamiento mecánico de la falla.	135
6.4.	Análisis de los resultados.....	149
7.	Conclusiones.	154
8.	Recomendaciones.	156
9.	Referencias.....	158

Índice de imágenes

Imagen 1. Imagen digital tipo binario (McAndrew, 2004).	7
Imagen 2. Imagen digital tipo escala de grises (McAndrew, 2004).	7
Imagen 3. Imagen digital tipo RGB o color verdadero (McAndrew, 2004).	8
Imagen 4. Imagen digital tipo Indexado (McAndrew, 2004).	9
Imagen 5. Medición del desplazamiento de subconjunto incremental durante el intervalo de tiempo δt usando DIC basado en una función de orden cero o de primer orden ref. (Murray, Hoult, & Take, 2017).	11
Imagen 6. Diferentes modos de falla en marcos rellenos con muros de mampostería. (Ramos, y otros, 2015).	12
Imagen 7. El problema de apertura en la coincidencia de imágenes. a) Un punto en la línea puede coincidir con puntos arbitrarios en la línea desplazada. b) La apertura se ha ampliado para incluir los puntos finales de la línea. El vector de movimiento ahora es único (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).	15
Imagen 8. Problema de correspondencia para a) una estructura repetitiva, donde solo se puede encontrar una correspondencia única si el borde de la rejilla está incluido en la abertura y b) una estructura deformante sin texturas, donde no se puede establecer correspondencia sin más suposiciones (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).	15
Imagen 9. Modelo de cámara estenopeica (Pan B. , 2015).	17
Imagen 10. Esquema del modelo de cámara estenopeica, considerando la influencia de la distorsión de la lente. El gráfico muestra la influencia de la distorsión radial de la lente en el vector de desplazamiento medido por 2D-DIC (Pan B. , 2015).	18
Imagen 11. El movimiento fuera del plano del objeto de prueba altera la distancia Z del objeto del sistema de imágenes (Pan B. , 2015).	19
Imagen 12. El autocalentamiento de una cámara cambia la distancia de imagen L y / o la distancia del objeto Z del sistema de imagen (Pan B. , 2015).	19
Imagen 13. Distancia de trabajo, distancia focal, tamaño del sensor, campo de visión, resolución. Fuente: (Dong & Pan, 2017).	20
Imagen 14. Ejemplo de patrones de manchas (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).	21
Imagen 15. Ilustración de la mancha con alias (izquierda) y sin alias (derecha) (Reu, 2015).	23
Imagen 16. Ejemplos: Patrones aleatorios usando: Un marcador (izquierda), un lápiz (medio) y una pistola de pintura (derecha) (Hosein Salmapour & Mojsilović, 2013).	24

Imagen 17. Esquema de una configuración experimental típica utilizando un dispositivo óptico de imágenes para el método 2D-DIC (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).	25
Imagen 18. (a) Imagen de referencia, el cuadrado rojo impuesto es el subconjunto utilizado para rastrear el movimiento de su punto central, y los puntos de intersección de la cuadrícula amarilla denotan los puntos que deben calcularse; (b) los vectores de desplazamiento calculados impuestos sobre la imagen deformada (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).	26
Imagen 19. Ilustración esquemática de un subconjunto cuadrado de referencia antes de la deformación y un subconjunto objetivo (o deformado) después de la deformación (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).	27
Imagen 20. Distribución de coeficientes de correlación cruzada de campo completo calculada cuando la imagen deformada se somete a (a) traslación de cuerpo rígido y (b) rotación relativa de 20° (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).	31
Imagen 21. Esquema de la aplicación de la Técnica DIC en 2D (Pan B. , 2018).	34
Imagen 22. Número de artículos que involucran técnicas de medición de deformación típicas durante los últimos 16 años (desde 2000 hasta 2015) (Dong & Pan, 2017).	39
Imagen 23. Dimensiones del muro.	42
Imagen 24. Detalle de refuerzo en columna de concreto.	43
Imagen 25. Detalle de refuerzo en cimiento de concreto.	43
Imagen 26. Detalle de refuerzo en viga corona de concreto.	44
Imagen 27. Ajuste de la altura a la línea de acción de la carga.	44
Imagen 28. Muro construido de mampostería confinada reforzada.	45
Imagen 29. Ubicación de los transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) y Galgas extensiométricas (cotas en milímetros).	46
Imagen 30. Esquema de montaje del muro.	47
Imagen 31. Montaje del muro en el laboratorio.	48
Imagen 32. Cámara Digital Compacta Sony Cyber-shot DSC-HX400V.	48
Imagen 33. Lámpara LED MANAX.	49
Imagen 34. Posibilidad 1 de 2, ubicación de los muros.	51
Imagen 35. Posibilidad 2 de 2, ubicación de los muros.	52
Imagen 36. Relación entre tamaños de los sensores de diferentes cámaras con el tamaño del sensor “Full Frame” (24mmx36mm). (Pérez, 2021).	53
Imagen 37. Distancias focales, tipos de fotografía y ángulos de visión para una cámara “Full Frame”. (Pérez, 2021)	54

Imagen 38. Campos de Visión para Distancias de Trabajo entre 2.0 m y 3.5 m, con una distancia focal de 8mm (44.65mm equivalente “full frame”); proyectados sobre el muro H/L=2.18.	57
Imagen 39. Campo de Visión para una Distancia de Trabajo de 3.5 metros, Distancia focal de 6mm (33.49 mm equivalente FF) y Sensor de Cámara 6.17mm x 4.55mm. Altura de Cámara = 1500mm.	58
Imagen 40. Campo de Visión para una Distancia de Trabajo de 3.5 metros, Distancia focal de 4.3mm (24 mm equivalente FF) y Sensor de Cámara 6.17mm x 4.55mm. Altura de Cámara = 1345mm.	59
Imagen 41. Figura esquemática del método de fabricación de patrones de mancha por rociador (“spraying”) (Dong & Pan, 2017).	60
Imagen 42. Plantilla de vinil autoadhesivo.	61
Imagen 43. Patrón de Manchas propuesto, para un tamaño de 5mm.	63
Imagen 44. Comparación de la nitidez de los bordes.	65
Imagen 45. Patrón de manchas regulares de 1mm a 15 mm de diámetro para imprimir en escala real.	66
Imagen 46. Colocación del patrón regular experimental en la cara del muro.	67
Imagen 47. Tamaño de punto de 15mm en fotografía de 5 megapíxeles, con una distancia focal de 4.3mm y una distancia de trabajo de 3.5mm (15 mm \approx 7.74 píxeles).	68
Imagen 48. Tamaño de punto de 15mm en fotografía de 10 megapíxeles, con una distancia focal de 4.3mm y una distancia de trabajo de 3.5mm (15 mm \approx 10.90 píxeles).	69
Imagen 49. Tamaño de punto de 15mm en fotografía de 20 megapíxeles, con una distancia focal de 4.3mm y una distancia de trabajo de 3.5mm (15 mm \approx 15.48 píxeles).	69
Imagen 50. Procedimiento experimental para la plantilla o stencil fabricada en vinil autoadhesivo.	71
Imagen 51. Procedimiento experimental para la plantilla o stencil fabricada lámina acrílica transparente.	71
Imagen 52. Dimensiones de la plantilla o stencil de vinil autoadhesivo (600mmx 2500mm).	72
Imagen 53. Limpieza del muro y aplicación de la pintura base color blanco.	73
Imagen 54. Colocación de la plantilla o stencil en secciones a la superficie del muro.	73

Imagen 55. Aplicación de pintura de color negro y acabado del patrón de manchas...	74
Imagen 56. Acabado del patrón de manchas impregnado en la superficie. Cumple con elementos como tamaño de mancha, isotropía, aleatoriedad, nitidez y cobertura.	75
Imagen 57. Desplazamiento cíclico (Método de prueba B. Amplitudes de los Ciclos Invertidos). ASTM E2126-19.	76
Imagen 58. Ajuste del transformador diferencial de variación lineal 1 (LVDT 1), debido a una posible descalibración del instrumento.	82
Imagen 59. Ajustes realizados a los pernos que anclan el muro al piso fuerte, suscitados durante la falla. Lanamme-UCR.....	87
Imagen 60. Región de interés o Zonas DIC LVDT n para cada medición. Lanamme-UCR.	95
Imagen 61. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 1 (subconjunto 30 x 30 píxeles).	96
Imagen 62. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 2 (subconjunto 30 x 30 píxeles).	98
Imagen 63. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 3 (subconjunto 30 x 30 píxeles).	101
Imagen 64. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 4 (subconjunto 30 x 30 píxeles).	103
Imagen 65. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 5 (subconjunto 30 x 30 píxeles).	105
Imagen 66. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 2 (horizontal) y la diferencia entre mediciones.	109
Imagen 67. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 3 (horizontal) y la diferencia entre mediciones.	110
Imagen 68. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 5 (horizontal) y la diferencia entre mediciones.	111
Imagen 69. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para la zona 2.	112
Imagen 70. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para la zona 3.	112
Imagen 71. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para las zonas 5.....	113

Imagen 72. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 1 (vertical) y la diferencia entre mediciones.	114
Imagen 73. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 4 (vertical) y la diferencia entre mediciones.	115
Imagen 74. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para la zona 1.	116
Imagen 75. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para la zona 4.	116
Imagen 76. Parámetros para determinar la ductilidad del muro.....	117
Imagen 77. Curva envolvente obtenida de la Curva de Histéresis del LVDT 5.	118
Imagen 78. Curva envolvente obtenida de la Curva de Histéresis del DIC LVDT 5. ..	119
Imagen 79. Ejemplo del cálculo de la envolvente promedio.	120
Imagen 80. Envolvente promedio para el LVDT 5.	121
Imagen 81. Curva envolvente y EEEP obtenida de los datos del LVDT 5.	122
Imagen 82. Envolvente promedio para el DIC LVDT 5.	123
Imagen 83. Curva envolvente y EEEP obtenida de los datos del DIC LVDT 5.	124
Imagen 84. Ubicación esquemática de las galgas de deformación (SG, Strain Gages). Lanamme-UCR	127
Imagen 85. Deformación obtenida por las galgas extensiométricas instaladas en el acero de refuerzo para la zona SG0.....	128
Imagen 86. Deformación obtenida por las galgas extensiométricas instaladas en el acero de refuerzo para la zona SG1.....	128
Imagen 87. Deformación obtenida por las galgas extensiométricas instaladas en el acero de refuerzo para la zona SG2.....	129
Imagen 88. Zona DIC o Región de Interés definidas para mostrar resultados de deformación obtenidos por la técnica DIC (SG, Strain Gages). Matlab.....	130
Imagen 89. Deformación total en zonas 0,1 y 2, obtenidas mediante la técnica DIC.	131
Imagen 90. Deformación total en zonas 3,4 y 5, obtenidas mediante la técnica DIC.	132
Imagen 91. Definición de la región de interés en la superficie visible (sin obstrucción) del muro.	135
Imagen 92. Campo de desplazamientos horizontales U obtenido con el código 1.....	136
Imagen 93. Campo de desplazamientos verticales V obtenido con el código 1.	136
Imagen 94. Campo de deformaciones.....	137
Imagen 95. Deformación real versus imágenes.....	137

Imagen 96. Desplazamientos horizontales sobre el número de imagen 700 en mapa de colores. Escala de colores en mm. Ncorr.	139
Imagen 97. Desplazamientos verticales sobre las fotografías 2 y 700 en mapa de colores. Escala de colores en mm. Ncorr.	139
Imagen 98. Líneas de contornos de los desplazamientos horizontales, sobre el número de imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala de colores en mm. Ncorr.	140
Imagen 99. Líneas de contornos de los desplazamientos verticales, sobre el número de imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala de colores en mm. Ncorr.	141
Imagen 100. Campo vectorial de desplazamientos verticales y horizontales, obtenidos con las funciones quiver y streamslice de Matlab.	142
Imagen 101. Acercamiento al campo vectorial de desplazamientos verticales y horizontales, obtenidos con las funciones quiver y streamslice de Matlab.	143
Imagen 102. Deformaciones ϵ_{xx} , sobre la imagen número 700 en mapa de colores. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab.	144
Imagen 103. Deformaciones ϵ_{yy} , sobre la imagen número 700 en mapa de colores. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab.	144
Imagen 104. Deformaciones ϵ_{xx} , sobre la imagen número 700 en mapa de colores. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab.	145
Imagen 105. Líneas de contornos de las deformaciones ϵ_{xx} sobre la imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab. .	145
Imagen 106. Líneas de contornos de las deformaciones ϵ_{yy} sobre la imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab. .	146
Imagen 107. Líneas de contornos de las deformaciones ϵ_{xy} sobre la imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab. .	146
Imagen 108. Campo vectorial de deformaciones $\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$, obtenidos con las funciones quiver y streamslice de Matlab.	147
Imagen 109. Acercamiento al campo vectorial de deformaciones $\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$, obtenidos con las funciones quiver y streamslice de Matlab.	148
Imagen 110. Deformación principal máxima, para el número de imagen 700. Escala en milímetros. Matlab.	152
Imagen 111. Deformación principal mínima, para el número de imagen 700. Escala en milímetros. Matlab.	153

Imagen 112. Agrietamientos de falla a 45° e imágenes posteriores de desprendimiento de mampuestos. Las grietas están realzadas con líneas color azul para una mejor visualización..... 154

Índice de gráficos

Gráfico 1. Gráfico # de imagen vs desplazamiento vertical (mm) obtenidos del LVDT 1. Lanamme-UCR.	81
Gráfico 2. Gráfico de los desplazamientos obtenidos por el LVDT 1 versus los desplazamientos obtenidos por el pistón. Lanamme-UCR	83
Gráfico 3. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del LVDT 1. Lanamme-UCR.....	84
Gráfico 4. Gráfico tiempo (s) vs desplazamiento horizontal (mm) obtenidos del LVDT 2. Lanamme-UCR.	85
Gráfico 5. Desplazamiento (mm) vs número de ciclos obtenido del LVDT 2.....	86
Gráfico 6. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del LVDT 2. Lanamme-UCR.....	87
Gráfico 7. Gráfico tiempo (s) vs desplazamiento horizontal (mm) obtenidos del LVDT 3. Lanamme-UCR.	88
Gráfico 8. Desplazamiento (mm) vs número de ciclos obtenido del LVDT 3.....	89
Gráfico 9. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del LVDT 3. Lanamme-UCR.....	89
Gráfico 10. Gráfico tiempo (s) vs desplazamiento vertical (mm) obtenidos del LVDT 4. Lanamme-UCR.	90
Gráfico 11. Desplazamiento (mm) vs número de ciclos obtenido del LVDT 4.....	91
Gráfico 12. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del LVDT 4. Lanamme-UCR.....	91
Gráfico 13. Gráfico tiempo (s) vs desplazamiento horizontal (mm) obtenidos del LVDT 5. Lanamme-UCR.	92
Gráfico 14. Desplazamiento (mm) vs número de ciclos obtenido del LVDT 5.....	93
Gráfico 15. Comparación de los desplazamientos horizontales para LVDT 2, LVDT 3, LVDT 5.....	93
Gráfico 16. Comparación de los desplazamientos verticales del LVDT 1 y LVDT 4.....	94
Gráfico 17. Desplazamientos vs imagen de la zona DIC LVDT 1.	97

Gráfico 18. Desplazamientos (mm) vs imagen de la zona DIC LVDT 2.....	99
Gráfico 19. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del DIC LVDT 2.....	100
Gráfico 20. Desplazamientos (mm) vs imagen de la zona DIC LVDT 3.....	101
Gráfico 21. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del DIC LVDT 3.....	102
Gráfico 22. Desplazamientos (mm) vs imagen de la zona DIC LVDT 4.....	104
Gráfico 23. Desplazamientos (mm) vs imagen de la zona DIC LVDT 5.....	105
Gráfico 24. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del DIC LVDT 5.....	106
Gráfico 25. Comparación de los desplazamientos horizontales para DIC LVDT 2, DIC LVDT 3 y DIC LVDT 5.....	107
Gráfico 26. Comparación de los desplazamientos verticales del DIC LVDT 1 & DIC LVDT 4.....	108
Gráfico 27. Comparación de deformaciones obtenidas mediante el DIC para cada zona.....	133
Gráfico 28. Comparación de desplazamientos horizontales obtenidos mediante la instrumentación LVDT y la implementación de la técnica DIC.....	150
Gráfico 29. Comparación de desplazamientos verticales obtenidos mediante la instrumentación LVDT y la implementación de la técnica DIC.....	151

Índice de tablas.

Tabla 1. Criterios de Correlación Cruzada comúnmente usados (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).....	28
Tabla 2. Criterios de Correlación de Suma de la diferencia al cuadrado comúnmente usados (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).	28
Tabla 3. Zoom Óptico de la Cámara Sony Cyber-Shot DSC HX400v y sus relaciones.56	
Tabla 4. Campo de visión para distancias de trabajo de 2.0 a 3.5 m, con una distancia focal de 8mm.....	57
Tabla 5. Campo de visión para una distancia de trabajo de 3.5 m, con una distancia focal de 4.3mm.....	59

Tabla 6. Tamaño promedio de los puntos del Patrón de Manchas, para una Distancia Focal de 4.3mm (24 mm equivalente FF), Distancia de Trabajo de 3500mm y Sensor de Cámara 6.17mm x 4.55mm.	62
Tabla 7. Método de prueba B. Amplitudes de los ciclos invertidos (según norma E2126-19).	75
Tabla 8. Mediciones de la fuerza y desplazamientos máximos y mínimos para cada ciclo.....	80
Tabla 9. Resumen de los datos.	80
Tabla 10. Diferencia promedio, desviación estándar y diferencia máxima de mediciones de los desplazamientos entre LVDT y DIC.	125
Tabla 11. Valores máximos y mínimos de deformación encontrados en las zonas DIC definidas.....	133

1. Introducción.

El presente trabajo pretende servir como base para adentrarse, desde una perspectiva distinta, en la investigación de los límites de la capacidad de deformación de la mampostería estructural. La meta principal es dar a conocer una técnica novedosa, la cual, mediante una aplicación no invasiva de un patrón de manchas impregnado sobre una superficie el procesamiento de imágenes digitales y la computación numérica, es capaz de determinar el campo de deformaciones y desplazamientos de prácticamente cualquier estructura que se vea sometida a cargas externas; realizando para este caso, una aplicación exclusiva sobre un muro construido con el sistema de Mampostería Confinada Reforzada.

La técnica en mención corresponde a un sistema de medición conocido como Correlación Digital de Imágenes (DIC) que, aunque es novedoso, fue desarrollado por primera vez por un grupo de investigadores de la Universidad de Carolina del Sur en la década de 1980 cuando el procesamiento de imágenes digitales y la computación numérica aún estaban en sus primeras etapas (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009)

Teóricamente, DIC se puede utilizar para medir áreas de cualquier escala de tamaño, desde la mecánica experimental con especímenes pequeños, a ensayos en muestras más grandes, como muros de concreto reforzado y mampostería como lo es este trabajo, incluso en ensayos in situ en estructuras a gran escala, por ejemplo, puentes, torres y turbinas eólicas, aunque para este último se requiera del uso de cámaras de alta resolución (Hosein Salmanpour & Mojsilović, 2016).

La aplicación de esta técnica en un muro de mampostería a escala natural implica la necesidad de enfrentarse a varios retos importantes que van desde el diseño y la aplicación del patrón de manchas, que como se desarrollará en el documento, debe ser de alto contraste, de forma que asegure un equilibrio adecuado entre la precisión de la medición y la resolución espacial hasta la configuración de la resolución de cámara, el montaje del escenario y una calibración efectiva de todo el sistema; todo con el fin de evitar errores en la adquisición de imágenes y lograr fotografías que puedan ser interpretadas correctamente por el software de procesamiento de imágenes. (Ghorbani, Matta, & Sutton, 2015).

En resumen, este estudio se lleva a cabo en distintas etapas, donde primero se calculan las distancias requeridas en el espacio del laboratorio considerando las

dimensiones del muro, para luego ejecutar pruebas experimentales de campo que permiten definir el patrón de manchas más adecuado a impregnar sobre la superficie. Posteriormente se lleva a cabo el montaje del escenario: alturas, distancias, cámara, nivelación, iluminación, entre otros. Así mismo, se da el proceso de falla del muro, durante el cual se adquieren las imágenes digitales. Por último, estas imágenes son procesadas y correlacionadas utilizando dos códigos libres desarrollados para el programa Matlab, con el fin de obtener los resultados de desplazamiento y deformaciones que son verificados y analizados.

2. Objetivos.

2.1. Objetivo General

- Analizar mediante una alternativa técnica moderna de medición óptica y sin contacto, conocida como “Correlación Digital de Imágenes”; el comportamiento mecánico de falla de un muro estructural construido en mampostería reforzada confinada, a lo largo y ancho de un campo de desplazamientos, en diferentes momentos de carga y compararlo con los métodos convencionales de medición.

2.2. Objetivos específicos

- Aplicar la técnica de Correlación Digital de Imágenes en dos dimensiones (2D DIC) en un muro de mampostería reforzada confinada, sometido a cargas paralelas a su plano.
- Analizar los resultados obtenidos con el fin de explicar de una manera más precisa, el comportamiento de falla que ocurre en el muro mediante la aplicación de cargas cíclicas.
- Comparar los resultados de la técnica mediante la instrumentación en el muro, que permita obtener los desplazamientos y deformaciones de la forma convencional.
- Contribuir como una base para el desarrollo de futuros proyectos investigación en mampostería, que utilicen la técnica de Correlación Digital de Imágenes.

3. Alcances y limitaciones.

Con la técnica en estudio, es posible realizar múltiples investigaciones en el campo de la Mampostería Confinada Reforzada y enfocarse en obtener distintos resultados, por esta razón, es importante como un punto de partida de este trabajo, conocer a fondo cuáles son los alcances o expectativas que se espera obtener y las limitaciones o aspectos que quedan fuera de esta. A continuación, se enumeran.

3.1. Alcances.

1. La metodología digital de imágenes en dos dimensiones será aplicada en un muro construido en mampostería confinada reforzada.
2. La construcción y falla de este muro, se realizará en el Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme-UCR), ubicado en el campus de la Universidad de Costa Rica.
3. Se utilizará una cámara digital compacta de 16.1 megapíxeles, ensamblada sobre un trípode con iluminación artificial tipo LED.
4. La metodología requerirá de un patrón de manchas, el cual se elaborará con pintura y de forma manual sobre la superficie de la mampostería.
5. Los resultados numéricos de la implementación de la técnica se llevarán a cabo mediante la utilización de dos códigos libres computacionales, desarrollados para el software Matlab del cual la Universidad de Costa Rica cuenta con licencia.
6. El muro se construirá en el laboratorio, a escala real (Prototipo), con mano de obra de la zona y bajo ambiente controlado de agregados y materiales.
7. Se determinarán los campos de desplazamiento y deformación en cada imagen obtenida.
8. Los resultados de la técnica se valorarán con la comparación de resultados obtenidos mediante la instrumentación del muro.

3.2. Limitaciones.

1. Para este estudio, la técnica se desarrolla únicamente en dos dimensiones (2D-DIC), no forma parte de este documento su implementación en tres dimensiones (3D-DIC).
2. Se utilizan únicamente referencias internacionales debido a la falta de estudios e investigaciones de este tipo en el país, específicamente en el campo de la Mampostería Confinada Reforzada.
3. El estudio abarca la implementación de la técnica a un único muro construido mediante el sistema de mampostería confinada reforzada; no forma parte de esta investigación su implementación en varios especímenes que varíen su relación de aspecto o cuantía de acero, u otros sistemas constructivos.
4. La comparación de los resultados de la técnica se realiza con la instrumentación que se encuentra disponible para la falla de muros en el Lanamme-UCR, que no incluye el uso de potenciómetros o galgas extensiométricas a nivel de la superficie del espécimen.

4. Estado del arte.

4.1. Imagen Digital y su procesamiento.

4.1.1. Definición.

Una imagen se puede definir como una información visual-bidimensional la cual es creada por dispositivos fotosensibles que capturan la luz de reflexión de la superficie bidimensional del objeto, en el mundo real tridimensional (Sinecen, 2016), es decir, una representación en dos dimensiones de una imagen basada en una matriz numérica binaria.

Para componer una imagen digital se hace una retícula compuesta por celdas que son denominadas píxeles o puntos de color y corresponden a un concepto inmaterial que no tiene una medida concreta, únicamente denota una medida de división en celdas. El píxel corresponde al elemento direccionable más pequeño que compone una imagen de este tipo. De esta manera, cuando una imagen se compone de 250 píxeles × 500 píxeles, lo que indica es que esa imagen ha sido dividida en 250 celdas a lo ancho por 500 celdas de alto, es decir 125 000 celdas.

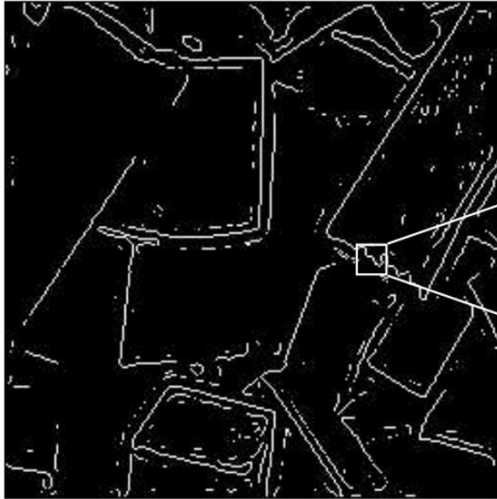
Para asignarle un valor al píxel, debe conocerse la resolución (cantidad de píxeles por una unidad de medida o viceversa), por ejemplo: 100 $\mu\text{m}/\text{píxel}$, indica que una imagen de 250 x 500 píxeles, tendrá un tamaño de 25 mm x 100 mm.

4.1.1. Tipos de Imágenes digitales.

Se consideran 4 tipos básicos de imágenes digitales (McAndrew, 2004):

Binario.

En este tipo de imágenes, cada píxel es negro o blanco. De esta forma, como solo hay dos valores posibles para cada píxel, solo se requiere un bit por píxel. Así, estas imágenes son muy eficientes en términos de almacenamiento, pues ocupan poco espacio. Las imágenes que mejor describen una representación binaria son, por ejemplo, los textos, las huellas digitales y los planos arquitectónicos.



Matriz binaria que representa cada píxel.

1	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	1

Imagen 1. Imagen digital tipo binario (McAndrew, 2004).

Escala de grises.

En la imagen de escala de grises, cada píxel es un tono de gris, normalmente de 0 (negro) a 255 (blanco). Este rango significa que, cada píxel puede representarse mediante ocho bits o exactamente un byte. Este es un rango muy natural para el manejo de archivos de imagen. Algunos ejemplos son las imágenes de rayos X y las imágenes de trabajos impresos-



230	229	232	234	235	232	148
237	236	236	234	233	234	152
255	255	255	251	230	236	161
99	90	67	37	94	247	130
222	152	255	129	129	246	132
154	199	255	150	189	241	147
216	132	162	163	170	239	122

Imagen 2. Imagen digital tipo escala de grises (McAndrew, 2004).

Color verdadero, o RGB.

En este tipo de imágenes cada píxel tiene un color particular; ese color se describe por la cantidad de rojo, verde y azul que contiene. Si cada uno de estos componentes tiene un rango de 0 a 255, esto da un total de 256^3 , es decir 16,777,216 (dieciséis millones,

setecientos setenta y siete mil doscientos dieciséis) de diferentes colores posibles en la imagen. Dado que el número total de bits necesarios para cada píxel es de 24, estas imágenes también se denominan imágenes de color de 24 bits.

Dicha imagen consiste en una "pila" de tres matrices; representando los valores rojo, verde y azul para cada píxel. Esto significa que por cada píxel hay tres valores correspondientes.

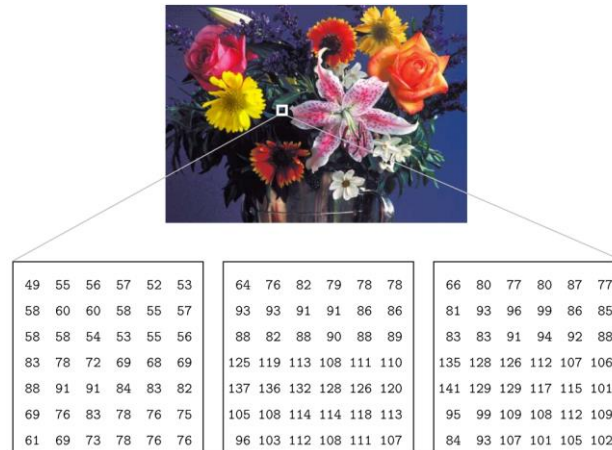


Imagen 3. Imagen digital tipo RGB o color verdadero (McAndrew, 2004).

Indexado.

La mayoría de las imágenes en color solo tienen un pequeño subconjunto de los más de dieciséis millones de colores posibles. Para mayor comodidad de almacenamiento y manejo de archivos, la imagen tiene un mapa de color asociado, o paleta de colores, que es simplemente una lista de todos los colores utilizados en esa imagen. Cada píxel tiene un valor que no da su color (como para una imagen RGB), sino un índice del color en el mapa.

Si una imagen tiene 256 colores o menos lo más razonable es usar este formato, ya que los valores de índice solo requerirán un byte para almacenar cada uno.

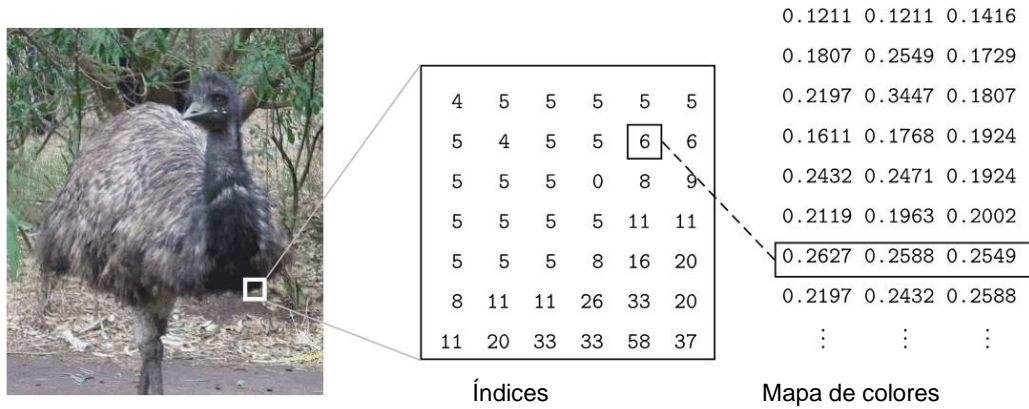


Imagen 4. Imagen digital tipo Indexado (McAndrew, 2004).

4.1.2. Procesamiento de imágenes digitales.

El procesamiento de imágenes digitales implica el uso de una computadora para cambiar la naturaleza de una imagen y consiste en mejorar su información para ayudar a la interpretación humana (por ejemplo: el mejoramiento de la nitidez de los bordes, la eliminación de ruido o errores aleatorios y la eliminación del desenfoque de movimiento) así como en hacerlas más adecuadas para la percepción de la computadora (por ejemplo: la delimitación de bordes, la eliminación de detalles, entre otros) (McAndrew, 2004).

4.2. Teoría de la Correlación Digital de Imágenes.

4.2.1. Descripción.

Como una alternativa moderna para estudiar el sistema constructivo de Mampostería Confinada Reforzada (en adelante MCR), existe la técnica conocida como Correlación de Imágenes Digitales (DIC, por sus siglas en inglés), la cual permite hacer un aporte en el diagnóstico estructural requerido por la Ingeniería con el estudio de superficies a campo completo, de manera óptica y sin contacto. Esta técnica, la cual cuenta con aplicaciones extensas en ingeniería civil, ciencia de materiales y biomecánica; ha sido ampliamente adoptada en las comunidades de pruebas geotécnicas y modelos físicos durante los últimos 19 años (Murray, Hout, & Take, 2017). Desde su invención en la década de 1980, se han logrado mejoras significativas en los principios básicos, el rendimiento de la medición y la eficiencia computacional. Hoy en día, el DIC ha sido un método popular para medir la forma, el movimiento y la deformación (Yong, Zeren, Qingchuan, & Shangquan, 2018).

El DIC permite medir campos de desplazamiento en sollicitaciones en el plano (2D, dos dimensiones) o fuera del plano (3D, tres dimensiones). La técnica DIC primero adquiere las imágenes digitales de un objeto en diferentes momentos o estados de cargas, mediante la utilización de un dispositivo que las genera y luego las analiza con la correlación (algoritmos de comparación, seguimiento o registro) considerando la intensidad, el área y enfoques de diferenciación numérica para extraer cuantitativamente el desplazamiento de campo completo y las respuestas de tensión de materiales, componentes, estructuras y otros (Pan B. , 2018). La idea básica del método es la coincidencia de un punto en la imagen de referencia con un punto correspondiente de la imagen deformada llevando a cabo los siguientes tres pasos (Hosein Salmanpour & Mojsilović, 2016) y (Pan B. , 2015): (1) preparación experimental y de la muestra; (2) registro de imágenes de la superficie de la muestra antes y después de la carga; (3) procesamiento de las imágenes adquiridas utilizando un programa de computadora para obtener la información de desplazamiento y deformación deseada.

DIC calcula los desplazamientos según el marco conceptual que se muestra en la Imagen 5 (Murray, Hout, & Take, 2017).

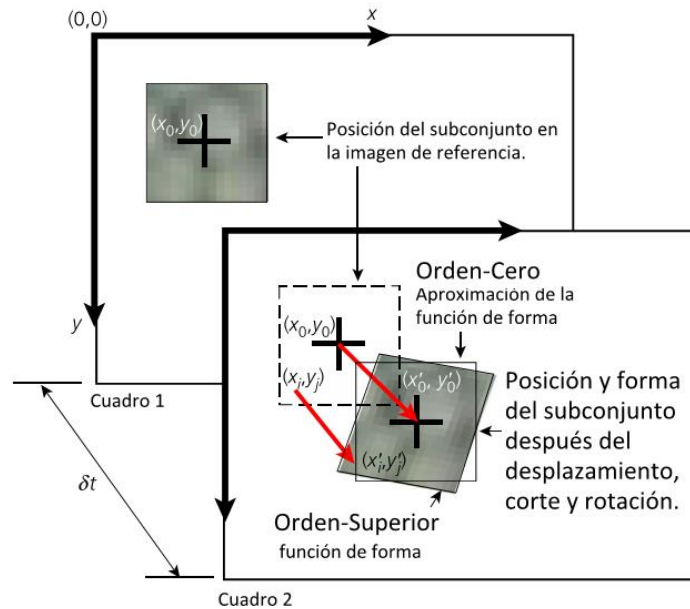


Imagen 5. Medición del desplazamiento de subconjunto incremental durante el intervalo de tiempo δt usando DIC basado en una función de orden cero o de primer orden ref. (Murray, Hault, & Take, 2017).

Primero, las regiones a rastrear se definen en una imagen inicial del plano o del objeto que se monitorea. Estas regiones son subconjuntos de la imagen de referencia que contienen una variación de intensidad de color suficiente para permitir que se ubiquen con una precisión de subpíxeles en las imágenes posteriores. Este cálculo se basa en la suposición de que: (a) la forma y la orientación del subconjunto no han cambiado apreciablemente en la imagen subsiguiente o (b) utilizando algoritmos más avanzados que permiten que el subconjunto experimente rotación y tensión.

Los avances en las cámaras de alta resolución temporal permiten que los desplazamientos incrementales se calculen en intervalos de tiempo suficientemente cortos (δt ; es decir, la velocidad de un subconjunto) para proporcionar un método sin contacto de medición de la velocidad en pruebas de modelos físicos dinámicos como 1g y experimentos en mesas vibratorias (Murray, Hault, & Take, 2017).

Utilizando la técnica DIC, es posible reconstruir el movimiento del muro, caracterizar el movimiento de su cuerpo rígido y de esta manera medir los desplazamientos y campos de deformación. Con el procesamiento posterior de los datos obtenidos se pretende que, se permita la identificación de los daños más comunes, como lo son el aplastamiento de las esquinas (columna-viga y columna-cimiento), la posible separación muro-marco (Ramos, y otros, 2015) así como la propagación de grietas por tensión o comprensión de la diagonal.

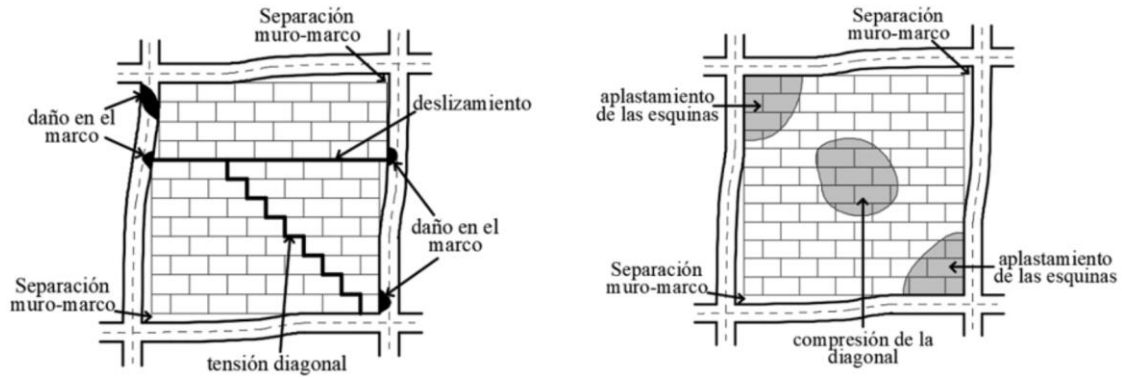


Imagen 6. Diferentes modos de falla en marcos rellenos con muros de mampostería. (Ramos, y otros, 2015).

Para este último, de acuerdo con (Nghiem, Al Heib, & Emeriault, 2015) la mampostería es considerada como una estructura frágil, por lo tanto, la propagación de grietas puede predecirse utilizando el enfoque mencionado anteriormente, aunque se puede simplificar considerando que las grietas solo aparecen cerca de las juntas entre bloques de forma que el modo de falla podría ser por tracción o por cortante, rara vez por compresión.

Adicionalmente, el mismo autor menciona que usando la técnica DIC, la diferencia entre las fallas mencionadas se puede proporcionar con respecto al esfuerzo de Von Mises, pues sus valores altos pueden indicar la ubicación de las grietas. Sin embargo, la identificación de grietas no es suficiente para una evaluación de daños completa, que debe tomar en cuenta cuatro propiedades importantes que son: la ubicación, la longitud, el ancho y la orientación del agrietamiento.

Para este estudio, se implementó el DIC en dos dimensiones, de manera que se aplicaron cargas en el mismo plano para un muro construido en MCR, con una relación altura-longitud cercana a 2.

4.2.2. Errores de medición en el DIC.

Hoy en día, la técnica se utiliza en una amplia gama de disciplinas y ha ganado cada vez más importancia desde la década de 1980 (Nghiem, Al Heib, & Emeriault, 2015). No obstante, aunque esta es una técnica poderosa para realizar pruebas en materiales y estructuras, los errores de medición no se discuten de manera suficiente y son difíciles de reducir en la práctica. Las fuentes de errores son numerosas y se pueden

dividir en dos categorías principales: la calidad de los dispositivos de medición junto con el entorno de trabajo y el algoritmo correlacional.

La primera categoría se relaciona con el material de la muestra (por ejemplo, el lente) y el entorno de trabajo, como la restricción epipolar, el proceso de calibración, la iluminación, la resistencia a la imagen y la presencia de desplazamientos fuera del plano. La segunda categoría se refiere a aspectos del algoritmo correlacional, como el tamaño del subconjunto, el patrón de manchas y los algoritmos de correlación.

Según indica el mismo autor, por lo general, la mayoría de los estudios de la técnica DIC se centran únicamente en optimizar algoritmos, pero descuidan otras fuentes de error y existen muy pocos estudios que muestran cómo integrar los errores de medición de DIC en los resultados experimentales. Una forma es mediante el uso de movimiento de cuerpo rígido, pero esto no es aplicable a materiales frágiles como el concreto o la mampostería, debido a los fenómenos de falla asociados. Otro enfoque es analizar dos imágenes de una muestra en instantes consecutivos, t y $t+1$, mientras se carga la muestra. Teniendo en cuenta las lentas variaciones en la carga, los resultados del DIC pueden considerarse como errores de medición. Sin embargo, este enfoque es difícil de emplear en el caso de una carga rápida o una muestra muy rígida. Por lo que la forma de aproximar los errores en el DIC para los materiales en mención (mampostería y concreto) consiste en que una vez realizada la configuración de la prueba y antes del comienzo de esta, se graban de entre 5 a 10 imágenes estáticas (es decir, sin movimiento por la acción de carga). Estas imágenes, a excepción de la imagen de referencia, se duplican y renombran hasta alcanzar el mismo número de imágenes de la prueba. Por último, se analizan todas estas imágenes con el software DIC y dado que no existe un movimiento real entre estas, los desplazamientos obtenidos serán los errores de medición.

Así, la precisión de la medición de DIC es un tema controvertido porque es muy difícil, si no imposible, determinar exactamente los errores de medición. La precisión de la medición de DIC está influenciada por varios factores que se discuten a continuación (Hosein Salmanpour & Mojsilović, 2016) y (Haddadi & Belhabib, 2008).

Errores relacionados con la muestra, carga e imágenes:

- La calidad del patrón de manchas.
- La resolución de la cámara.

- La condición de iluminación.
- Ausencia de paralelismo entre el sensor y la superficie del objeto.
- El desplazamiento fuera del plano.
- La distorsión de imagen.
- El ruido durante la adquisición de imágenes y la digitalización.

Errores relacionados con el algoritmo de correlación.

- El tamaño del subconjunto.
- La función de correlación.
- El algoritmo subpíxel.
- La función de forma.
- El esquema de interpolación.

4.2.3. Problema de la apertura.

La correlación de imágenes digitales emplea algoritmos que toman en cuenta la física de los procesos de deformación subyacentes, la cual se centra en la comparación sucesiva del movimiento de los píxeles de las imágenes en el proceso de carga, de manera que exista una correspondencia única y no se produzca el problema de la apertura, que se describirá a continuación.

Debido a los minúsculos movimientos que a menudo son interesantes para las aplicaciones de ingeniería, los requisitos de resolución son mucho más altos que para la mayoría de las otras aplicaciones. Para medir con precisión la curva de tensión-esfuerzo para muchos materiales de ingeniería, se deben resolver los cambios de longitud en el orden de 10 a 5 m/m (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).

En general, no es posible encontrar la correspondencia de un solo píxel en una imagen en una segunda imagen. Normalmente, el valor de gris de un solo píxel se puede encontrar en miles de otros píxeles en la segunda imagen y no hay una correspondencia única (imagen 7).

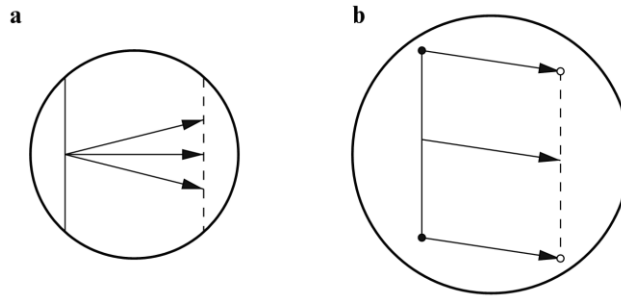


Imagen 7. El problema de apertura en la coincidencia de imágenes. a) Un punto en la línea puede coincidir con puntos arbitrarios en la línea desplazada. b) La apertura se ha ampliado para incluir los puntos finales de la línea. El vector de movimiento ahora es único (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).

Por lo tanto, consideramos encontrar la correspondencia de un pequeño vecindario alrededor del píxel de interés. Si bien el vecindario proporciona información adicional, el problema de emparejamiento aún no puede ser único. Esto se puede ilustrar colocando una abertura sobre la imagen.

Aunque la composición del vector de movimiento que es perpendicular a la línea se puede resolver, la posición a lo largo de la línea no se puede resolver. Un punto en la línea en la primera imagen puede coincidir con un punto arbitrario en la línea en la segunda imagen. Esta ambigüedad se conoce comúnmente como el problema de la apertura (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009). En la parte derecha de la imagen 8, la apertura se ha incrementado al revelar los puntos finales de la línea. En este caso, el vector de movimiento puede ser determinado de forma única.

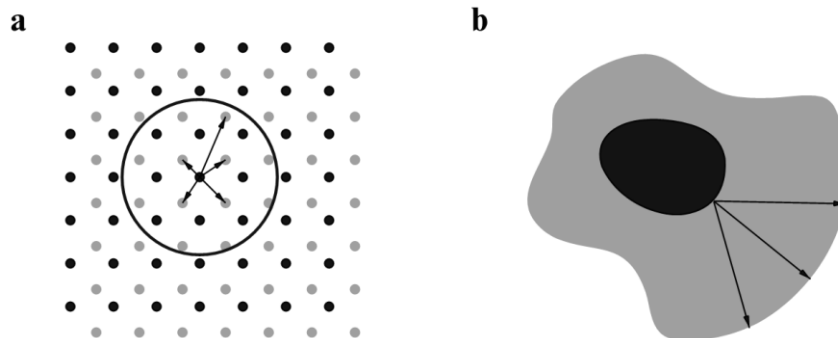


Imagen 8. Problema de correspondencia para a) una estructura repetitiva, donde solo se puede encontrar una correspondencia única si el borde de la rejilla está incluido en la abertura y b) una estructura deformante sin texturas, donde no se puede establecer correspondencia sin más suposiciones (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).

Para resolver el problema de la correspondencia de manera única, la superficie del objeto tiene que exhibir ciertas propiedades. La discusión del problema de apertura ha demostrado que las estructuras orientadas, como las líneas, limitan la determinación

de los vectores de movimiento al componente ortogonal a la estructura. Por lo tanto, la textura ideal de la superficie debe ser isotrópica, es decir, no debe tener una orientación preferida.

Además, la repetición de texturas puede llevar a problemas de registro incorrecto. Por lo tanto, la textura de superficie preferida no debe ser periódica. Estos requisitos conducen naturalmente al uso de texturas aleatorias.

4.2.4. Distorsión.

La cámara se coloca con su eje óptico perpendicular a la superficie de la muestra plana nominal, obteniendo imágenes de la superficie plana de la muestra en diferentes estados de carga en su plano sensor. En general, un modelo de cámara estenopeica ideal simple (modelo que muestra una cámara fotográfica sin lente, que consiste en una caja estanca a la luz con solo un pequeño orificio por donde entra la luz, el estenopo, y un material fotosensible), como se muestra en la Imagen 9, se usa implícitamente para describir la relación matemática entre las coordenadas de un punto del objeto y su punto de imagen correspondiente en el plano del sensor. Eso significa que los desplazamientos medidos del plano del sensor (u, v) son linealmente proporcionales a los desplazamientos del plano del objeto (U, V) de acuerdo con una relación lineal simple de $u = MU$, $v = MV$, donde M denota el factor de aumento constante invariable en el tiempo a través del plano de la imagen. Sin embargo, en aplicaciones prácticas de 2D-DIC, el factor de aumento M no puede verse como una constante en todo el plano de la imagen, a menos que se cumplan los siguientes requisitos (Pan B. , 2015):

1. El sistema de imágenes es perfecto y no sufre ninguna distorsión geométrica. Por tanto, se puede suponer que el factor de ampliación (M) es una constante en el plano de la imagen.
2. La superficie de la muestra debe ser gruesa y debe colocarse paralela al objetivo del sensor de la cámara. Tanto la superficie del objeto como la superficie de la imagen deben permanecer en el mismo plano sin ningún movimiento o rotación durante el experimento. Esta suposición implica que la distancia del objeto (Z) y la distancia de la imagen (L) no cambiarán después de la carga. Por tanto, el factor de magnificación (M) puede considerarse una constante invariable en el tiempo.

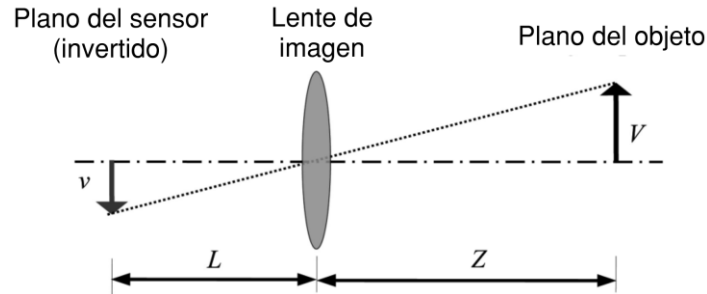


Imagen 9. Modelo de cámara estenopeica (Pan B. , 2015).

No obstante, se ha demostrado (Pan B. , 2015), que el modelo ideal de cámara estenopeica asumido para un sistema 2D-DIC ordinario, que utiliza una lente de imagen común, no es perfecto ni estable. Eso significa que el factor de ampliación (M) varía en diferentes ubicaciones de píxeles y también cambia ligeramente en diferentes momentos. Las razones son las siguientes:

1. El modelo de imagen estenopeica no es perfecto, porque cualquier lente de cámara real, especialmente una lente de bajo costo contiene inevitablemente una cierta cantidad de distorsión debido a la aberración inherente, errores de mecanizado y errores de montaje de la lente. Debido a las características no uniformes de la distorsión de la lente, un pequeño movimiento en el plano de la superficie de un objeto provocará diferentes cantidades de movimiento de la imagen, como se muestra esquemáticamente en la Imagen 10.

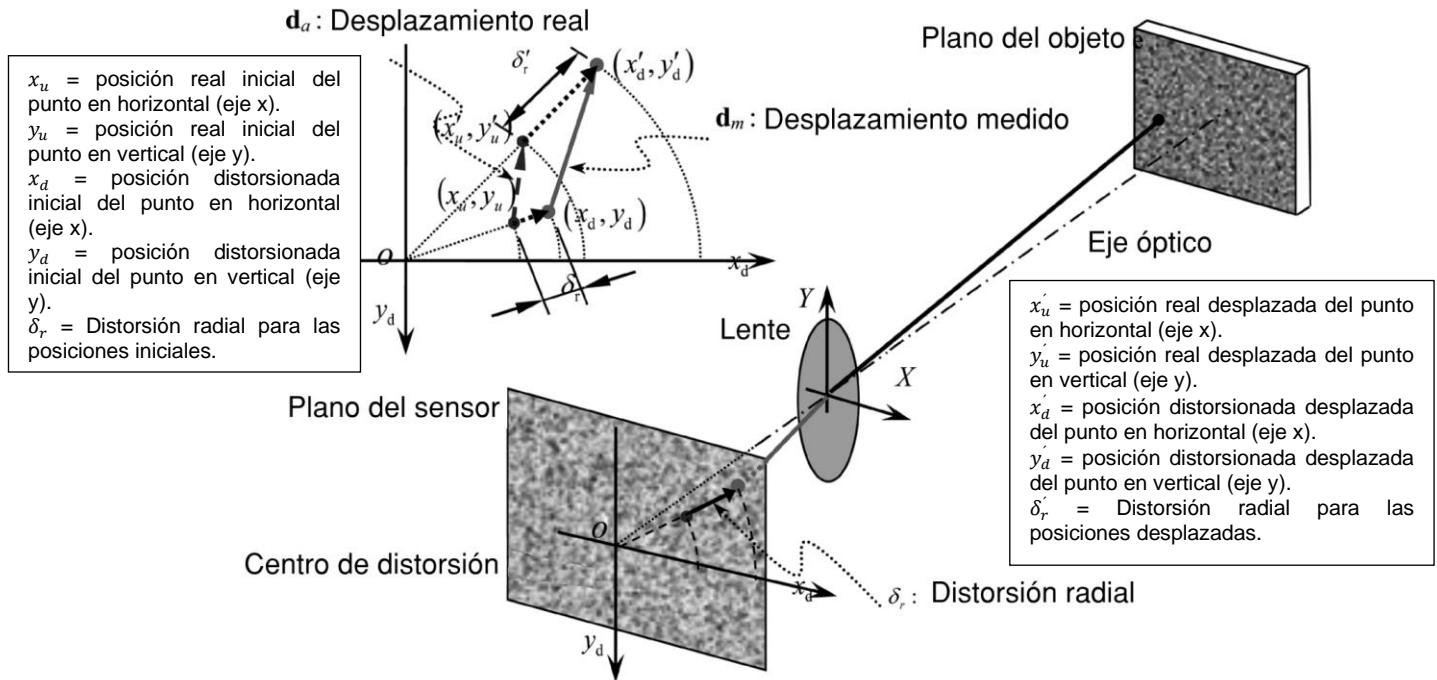


Imagen 10. Esquema del modelo de cámara estenopeica, considerando la influencia de la distorsión de la lente. El gráfico muestra la influencia de la distorsión radial de la lente en el vector de desplazamiento medido por 2D-DIC (Pan B. , 2015).

- El modelo de imagen de estenopeico no es estable, porque después de cargar una muestra de prueba, la distancia del objeto del sistema 2D-DIC puede cambiar debido al movimiento fuera del plano de la superficie de la muestra. como se muestra en la Imagen 11. Además, las distancias de la imagen y/o el objeto también cambian debido al autocalentamiento y/o la variación de temperatura de una cámara, como se indica en la Imagen 12. Los cambios en la distancia del objeto y/o la distancia de la imagen, alteran el factor de aumento M del sistema de imágenes. En ciertos casos, la imperfección y la inestabilidad de un sistema 2D-DIC de bajo costo puede dar lugar a cientos o incluso miles de errores de microdeformación.

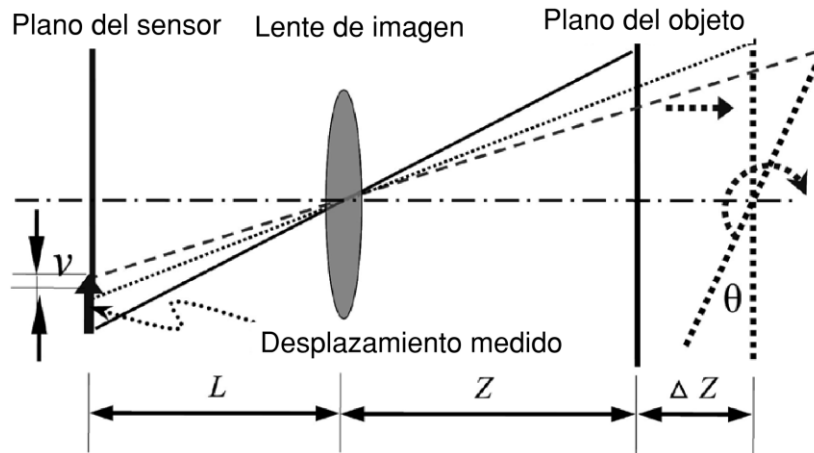


Imagen 11. El movimiento fuera del plano del objeto de prueba altera la distancia Z del objeto del sistema de imágenes (Pan B. , 2015).

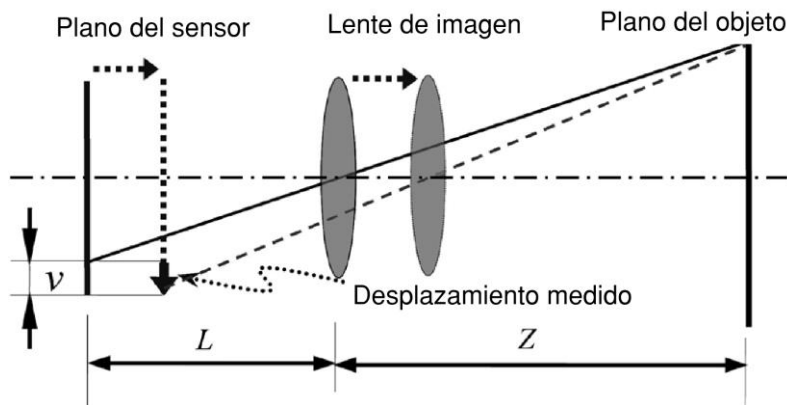


Imagen 12. El autocalentamiento de una cámara cambia la distancia de imagen L y / o la distancia del objeto Z del sistema de imagen (Pan B. , 2015).

Finalmente, si se requiere obtener mediciones 2D-DIC de alta fidelidad, un sistema óptico casi perfecto (con una distorsión de la lente insignificante) y muy estable (insensible a los movimientos fuera del plano en la superficie del objeto y el plano de imagen) utilizando un sistema óptico bilateral bien diseñado; la lente telecéntrica es muy recomendable para uso práctico. Aunque para este proyecto no se cuenta con dicho equipo, se espera que las distorsiones mencionadas tengan una influencia mínima y se considerará como parte de los posibles errores de la técnica.

4.3. Procedimiento 2D-DIC.

4.3.1. Preparación de la muestra.

4.3.1.1. Distancia de trabajo.

Antes de iniciar con la técnica DIC, se debe determinar la distancia de trabajo, es decir, la distancia que existe entre el sensor de la cámara y el paño de mampostería. Para ello es necesario conocer el campo de visión, que es básicamente “la ventana” con dimensiones vertical y horizontal que tiene la cámara para capturar un objeto y que este posteriormente sea dimensionado en píxeles, así como las distancias físicas del espacio de trabajo en el laboratorio para la toma de fotografías.

De la cámara es necesario conocer: los datos de su sensor, la resolución de este y la distancia focal y del laboratorio se debe conocer: la distancia física máxima y mínima que existe para colocar la cámara frente al muro, así como las dimensiones de este.

De esta forma, con dichos datos es posible calcular la distancia en la cual se pueda observar el muro dentro del campo de visión de la cámara (ver Imagen 13), utilizando la siguiente relación (Dong & Pan, 2017):

$$FL \cdot FOV = SS \cdot FD \quad \text{[ecuación \#1]}$$

Donde

- FL = Distancia focal (mm)
- FOV = Campo de visión (mm).
- SS = Tamaño del sensor (mm)
- FD = Distancia de trabajo (mm).

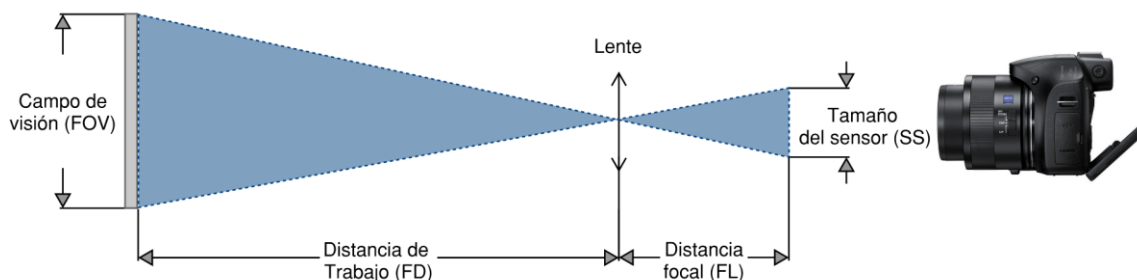


Imagen 13. Distancia de trabajo, distancia focal, tamaño del sensor, campo de visión, resolución. Fuente: (Dong & Pan, 2017).

4.3.1.2. Patrón de manchas.

La superficie de la muestra de ensayo debe tener una distribución de intensidad gris aleatoria, también conocida como patrón de manchas aleatorio, el cual se deforma junto con la superficie de la muestra como portadora de información de deformación. El patrón de manchas puede ser una textura natural de la superficie de la muestra o hacerse artificialmente rociando pinturas blancas y negras o mediante otras técnicas (Pan B. , 2015).

Los patrones utilizados en la correlación de la imagen digital se adhieren a la superficie y se deforman con la superficie, por lo que no se produce una pérdida de correlación, incluso en grandes traslaciones y deformaciones. Algunos ejemplos de patrones de manchas se muestran en la Imagen 14 (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).

Una de las características clave de los buenos patrones de manchas es su alto contenido de información. Dado que la superficie está texturizada, la información para la coincidencia de patrones está disponible en cualquier parte de la superficie y no solo en una cuadrícula. Esto permite el uso de una apertura relativamente pequeña para la coincidencia de patrones, comúnmente conocida como un subconjunto o ventana.

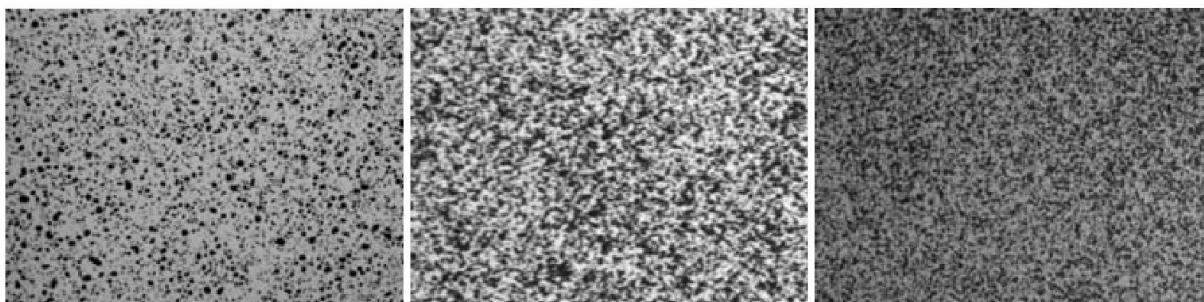


Imagen 14. Ejemplo de patrones de manchas (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009).

El patrón de manchas puede ser la textura natural de la superficie o estar hecho de manera artificial y la calidad que presente tiene una influencia dominante en la resolución espacial y la precisión de los resultados del DIC.

Muchos investigadores han demostrado que un patrón de manchas con gradientes más abundantes, generalmente conduce a errores de sesgo más pequeños y errores aleatorios reducidos (Dong & Pan, 2017).

Debe tenerse en cuenta que los patrones de manchas creados con diferentes métodos o por diferentes profesionales pueden llevar a distribuciones de histogramas,

contrastes de imagen u otras características claramente diferentes. Para realizar mediciones precisas del DIC, un buen patrón de manchas debe cumplir varios requisitos que se mencionan a continuación (Dong & Pan, 2017):

- **Alto contraste:** intensidades de escala de grises variables y gradientes de intensidad relativamente grandes;
- **Aleatoriedad:** patrón no periódico y no repetitivo para facilitar el mapeo de desplazamiento de campo completo;
- **Isotropía:** no hay direccionalidad en el patrón. No debe haber una direccionalidad obvia en el patrón, es decir, el punto y la brecha entre los puntos debe ser casi del mismo tamaño en diferentes direcciones. Los gránulos de macha con un tamaño de 3 a 5 píxeles o un poco más, son altamente recomendables para evitar el efecto de alias (ver Imagen 15).
- **Estabilidad:** un buen patrón de manchas debe adherirse fuertemente a la superficie de la muestra y deformarse con la superficie de la muestra, incluso bajo traslación grande y deformación sin cambios evidentes en las características geométricas y de escala de grises.

En general, para lograr una correlación efectiva, el patrón debe ser aleatorio, isotrópico, no debe exhibir un sesgo a una orientación ni ser altamente contrastante, es decir, debe mostrar negros oscuros y blancos brillantes. Además, los puntos no deben ser ni demasiado pequeños ni demasiado grandes. En DIC, un pequeño subconjunto de la imagen se rastrea a medida que la muestra se mueve y se deforma. Para realizar el seguimiento, el subconjunto se desplaza hasta que el patrón en la imagen deformada coincide con el patrón en la imagen de referencia lo más cerca posible; esta coincidencia se calcula como la diferencia total en niveles de gris en cada punto.

Si el patrón es demasiado grande, podemos encontrar que ciertos subconjuntos pueden estar completamente en un campo negro o completamente en un campo blanco, esto no nos permitiría hacer una buena combinación. Podemos compensar esto aumentando el tamaño del subconjunto, pero a costa de la resolución espacial.

Por el contrario, las manchas demasiado pequeñas pueden causar un efecto de alias (ver Imagen 15) resultante de imágenes que a menudo muestran un patrón de Moiré (interferencia visual, efecto geométrico de distorsión ocasionado por la interacción de dos patrones de trama situados uno encima del otro) pronunciado en los resultados de

la medición (Hosein Salmapour & Mojsilović, 2013). Como regla general, los puntos deben tener un tamaño de 3-4 píxeles para lograr una correlación efectiva (Reu, 2015) (Ghorbani, Matta, & Sutton, 2015)

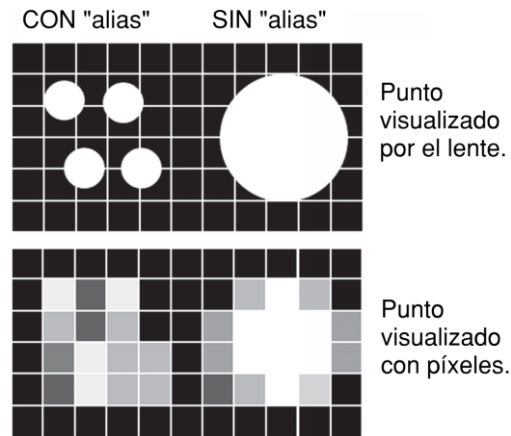


Imagen 15. Ilustración de la mancha con alias (izquierda) y sin alias (derecha) (Reu, 2015).

Debido a los problemas de tamaño, es más seguro sobredimensionar ligeramente las manchas, para que las más pequeñas sean al menos de 3 píxeles, así como la distancia entre ellas.

Las manchas con alias deben evitarse siempre. Cualquier alias en el patrón agregará ruido a la imagen y comprometerá la precisión de la medición (Reu, 2015).

Esto no solo se aplica cuando todas las manchas tienen un alias como se ha ilustrado aquí, sino que también puede haber una gran cantidad de manchas de tamaño insuficiente entre las otras del tamaño correcto. Estas pequeñas manchas causarán problemas y pueden influir en el tamaño mínimo del subconjunto.

La aplicación del patrón es el paso más importante en la implementación del método 2D DIC. Existen varias técnicas para aplicar diferentes tamaños de patrones en la superficie de la muestra, por ejemplo: pulverización de pintura, impresión, litografía, uso de tóner en polvo y plantillas.

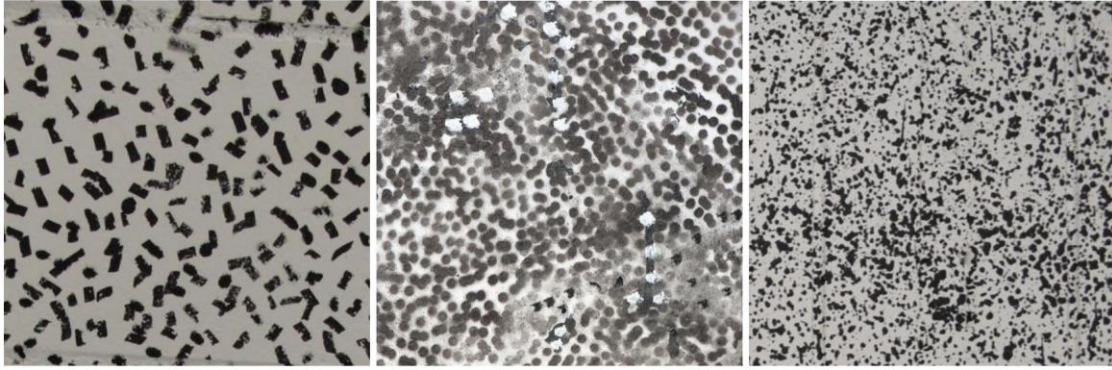


Imagen 16. Ejemplos: Patrones aleatorios usando: Un marcador (izquierda), un lápiz (medio) y una pistola de pintura (derecha) (Hosein Salmapour & Mojsilović, 2013).

4.3.2. Registro de imágenes.

Se debe utilizar una cámara con sensor CCD ("Charged Coupled Device"; Dispositivo acoplado cargado). Los CCD son sensores utilizados en cámaras digitales y cámaras de video para grabar imágenes fijas y en movimiento, estos capturan la luz y la convierten en datos digitales grabados por la cámara.

Es importante tomar en cuenta que las imágenes grabadas son la proyección 2D de la superficie de la muestra, el movimiento estimado de cada punto de la imagen multiplicando la ampliación del sistema de imagen (en unidades de mm/píxel) no será exactamente igual al del punto físico real en la superficie de la muestra a menos que se cumplan los siguientes requisitos (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

- La superficie de la muestra debe ser plana y permanecer en el mismo plano paralelo al objetivo del sensor CCD durante la carga. Esto implica que el sensor CCD y la superficie del objeto deben ser paralelos y el movimiento fuera de plano de la muestra durante la carga debe ser lo suficientemente pequeño como para ser despreciado. El movimiento fuera del plano de la muestra conduce a un cambio en la ampliación de las imágenes grabadas, lo que además produce desplazamientos adicionales en el plano. Por lo tanto, debe evitarse para la estimación precisa de desplazamiento. Normalmente, el movimiento fuera del plano se puede aliviar de alguna manera mediante el uso de un sistema de imagen telecéntrico o colocando la cámara lejos de la muestra para aproximarse a un sistema de imagen telecéntrico.

- El sistema de imagen no debe sufrir distorsión geométrica. En un sistema de imagen óptico real u otro sistema de imagen de alta resolución, se presenta la distorsión geométrica, lo que afecta la correspondencia lineal ideal entre el punto físico y el punto de la imagen y produce desplazamientos adicionales. Si no se puede ignorar o despreciar la influencia de la distorsión geométrica, se deben utilizar las técnicas de corrección de distorsión correspondientes para eliminar la influencia de la distorsión con el fin de proporcionar mediciones precisas.

La siguiente imagen muestra el esquema de una configuración experimental típica utilizando un dispositivo óptico de imágenes para el método 2D-DIC.

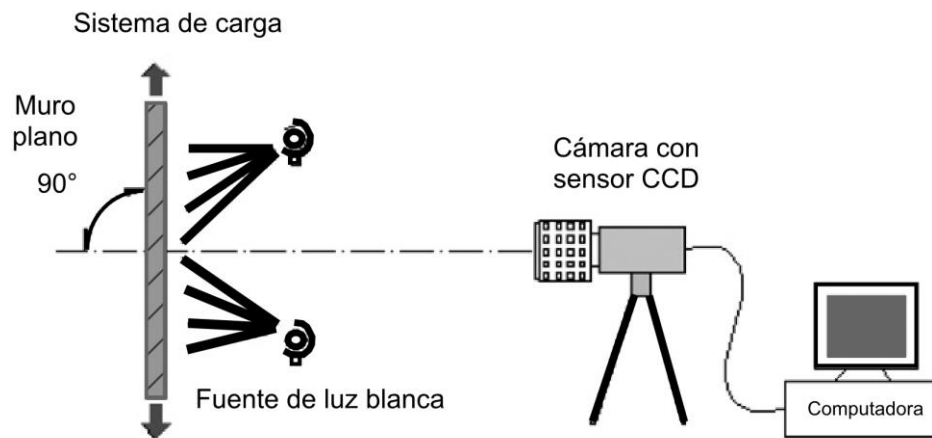


Imagen 17. Esquema de una configuración experimental típica utilizando un dispositivo óptico de imágenes para el método 2D-DIC (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

4.3.3. Procesamiento de las imágenes adquiridas.

Después de grabar las imágenes digitales de la superficie de la muestra antes y después de la deformación, el DIC calcula el movimiento de cada punto de imagen comparando las imágenes digitales de la superficie del objeto de prueba en diferentes estados. A continuación, se presentan los principios y conceptos básicos involucrados en el 2D-DIC (Pan B. , 2015).

- Principios básicos: En la implementación rutinaria del método 2D-DIC, debe especificarse o definirse al principio una **región de interés** en la imagen de referencia, la cual se divide adicionalmente en cuadrículas virtuales espaciadas uniformemente, como se muestra en la Imagen 18. Los desplazamientos se

calculan en cada punto de las redes virtuales para obtener la deformación de campo completo.

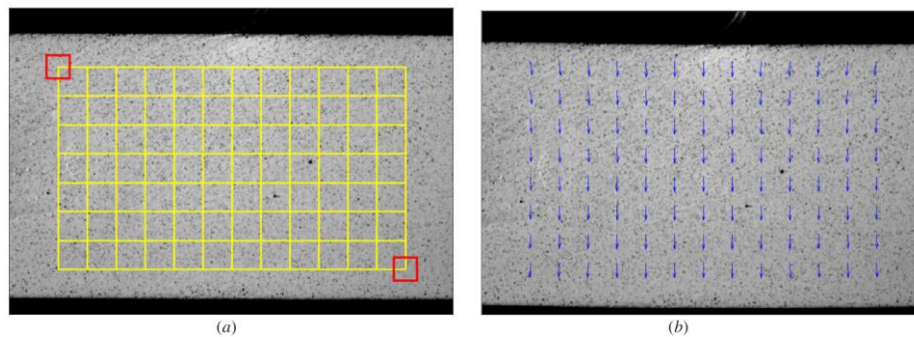


Imagen 18. (a) Imagen de referencia, el cuadrado rojo impuesto es el subconjunto utilizado para rastrear el movimiento de su punto central, y los puntos de intersección de la cuadrícula amarilla denotan los puntos que deben calcularse; (b) los vectores de desplazamiento calculados impuestos sobre la imagen deformada (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

La idea es el seguimiento (o emparejamiento) de los mismos puntos (o píxeles) entre las dos imágenes registradas antes y después de la deformación, como se ilustra esquemáticamente en la Imagen 19.

Para calcular los desplazamientos del punto P , se elige un subconjunto cuadrado con dimensiones de $(2M + 1) \times (2M + 1)$ píxeles (ver factor de ampliación M , apartado 4.2.4), centrados en el punto $P(x_0, y_0)$ de la imagen de referencia y se utiliza para rastrear su ubicación correspondiente en la imagen deformada.

La razón por la que se selecciona un subconjunto cuadrado, en lugar de un píxel individual para la coincidencia, es que el subconjunto que comprende una variación más amplia en los niveles de gris que se distinguirá de otros subconjuntos y, por lo tanto, puede identificarse de manera única en la imagen deformada.

Para evaluar el grado de similitud entre el subconjunto de referencia y el subconjunto deformado, se debe predefinir un criterio de correlación cruzada (CC) o un criterio de correlación de la suma de la suma al cuadrado (SSD). El procedimiento de coincidencia se completa a través de la búsqueda de la posición de pico de la distribución del coeficiente de correlación. Una vez que se detecta el coeficiente de correlación extremo, se determina la posición del subconjunto deformado. Las diferencias en las posiciones del centro del subconjunto de referencia y del centro del subconjunto objetivo producen el vector de desplazamiento en el plano en el punto P , como se ilustra en la Imagen 19.

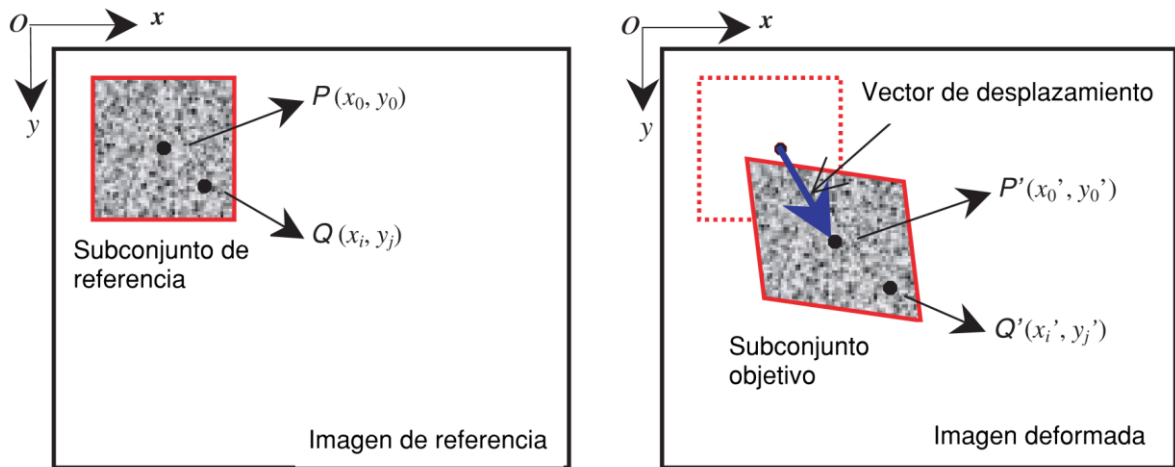


Imagen 19. Ilustración esquemática de un subconjunto cuadrado de referencia antes de la deformación y un subconjunto objetivo (o deformado) después de la deformación (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

- Función de forma / función de mapeo de desplazamiento: Es razonable suponer que la forma del subconjunto de cuadrados de referencia se cambia en la imagen deformada. Sin embargo, basándose en el supuesto de la continuidad de deformación de un objeto sólido deformado, un conjunto de puntos vecinos en un subconjunto de referencia permanece como puntos vecinos en el subconjunto objetivo. Por lo tanto, como se muestra esquemáticamente en la Imagen 19, las coordenadas del punto $Q(x_i, y_i)$ alrededor del centro del subconjunto $P(x_0, y_0)$ en el subconjunto de referencia pueden asignarse al punto $Q'(x'_i, y'_j)$ en el subconjunto objetivo según la llamada función de forma o función de mapeo de desplazamiento.

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i + \xi(x_i, y_j) \\ y'_j &= y_j + \eta(x_i, y_j) \end{aligned} \quad (i, j = -M : M).$$

Si solo existiera una traslación de cuerpo rígido en el subconjunto de referencia y el subconjunto deformado, en otras palabras, los desplazamientos de cada punto en el subconjunto son iguales, entonces se puede usar una función de forma de orden cero:

$$\xi_0(x_i, y_j) = u \quad \eta_0(x_i, y_j) = v.$$

La función de forma de orden cero no es suficiente para representar el cambio de forma del subconjunto deformado. Por lo tanto, la función de forma de primer orden

que permite la traslación, rotación, corte, deformaciones normales y sus combinaciones del subconjunto es la más comúnmente utilizada:

$$\xi_1(x_i, y_j) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y$$

$$\eta_1(x_i, y_j) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y.$$

Criterio de correlación: Como ya se mencionó, para evaluar el grado de similitud entre los subconjuntos de referencia y los deformados, un criterio de correlación (definido en el grupo “criterio de correlación cruzada (CC)” o el grupo “criterio de correlación de la suma de la suma al cuadrado (SSD)”) se debe definir por adelantado antes del análisis. Estos criterios se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 1. Criterios de Correlación Cruzada comúnmente usados (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

Criterio de Correlación CC	Definición
Correlación Cruzada (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)]$
Correlación cruzada normalizada (NCC).	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)}{\bar{f}\bar{g}} \right]$
Correlación cruzada normalizada-cero (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}$

Tabla 2. Criterios de Correlación de Suma de la diferencia al cuadrado comúnmente usados (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

Criterio de Correlación SSD	Definición
Suma de diferencias al cuadrado (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$
Suma de diferencias al cuadrado normalizada (NSSD).	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
Suma de diferencias al cuadrado normalizada-cero (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$

Donde,

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j), \quad \bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2}, \quad \Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2},$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j), \quad \bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j)]^2}, \quad \Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}.$$

$f(x_i, y_j)$ = Punto inicial.

$g(x'_i, y'_j)$ = Punto desplazado.

Es posible demostrar que el criterio de correlación ZNCC o ZNSSD ofrece el rendimiento a prueba de ruido más robusto y es insensible al desplazamiento y la escala lineal en la iluminación (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009). Del mismo modo, en la correlación NCC o NSSD el criterio es insensible a la escala lineal en iluminación, pero sensible a la compensación de la iluminación. El criterio de correlación CC o SSD es sensible a todas las fluctuaciones de la iluminación.

4.3.4. Medición de campo de desplazamiento.

Debido a la naturaleza discreta de la imagen digital, los desplazamientos de enteros con una precisión de 1 píxel se pueden calcular fácilmente. Para mejorar aún más la precisión de la medición de desplazamiento, se deben utilizar ciertos algoritmos de registro de subpíxeles.

En general, para lograr la precisión de subpíxeles, la implementación del 2D-DIC comprende dos pasos consecutivos, a saber, la estimación de la deformación inicial y la medición del desplazamiento de subpíxeles. En otras palabras, el método 2D-DIC normalmente requiere una estimación inicial precisa de la deformación antes de lograr una precisión de subpíxel (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

Suposición inicial de deformación.

Generalmente, la deformación o rotación relativa entre el subconjunto de referencia y el subconjunto deformado es bastante pequeña, por lo que es fácil obtener una estimación precisa de los desplazamientos iniciales mediante un esquema de búsqueda simple implementado en el dominio espacial o en el dominio de la

frecuencia. En el dominio espacial, las ubicaciones precisas del subconjunto de destino se pueden determinar mediante una rutina de búsqueda final, píxel por píxel, realizada dentro del rango especificado en la imagen deformada.

Las dificultades ocurren en ciertos casos cuando se presenta una gran rotación y/o una gran deformación entre los subconjuntos de referencia y objetivo, como se muestra esquemáticamente en la Imagen 20, en la que algunos píxeles del subconjunto de referencia salen del área del subconjunto supuesto dentro de la imagen deformada; en consecuencia, la similitud entre el subconjunto de referencia y el subconjunto deformado supuesto disminuirá sustancialmente. Como se puede ver en la Imagen 20(a), si solo existe una traslación rígida del cuerpo entre los subconjuntos de referencia y los deformados, se puede encontrar un solo pico en la distribución de coeficientes de correlación. Por el contrario, mientras se produce una rotación relativa de 20° entre la imagen de referencia y la imagen deformada, no habrá ni un solo pico agudo en el mapa de distribución de correlación como se indica en la Imagen 20(b), y por lo tanto dará como resultado una falla en la búsqueda de desplazamiento del píxel entero.

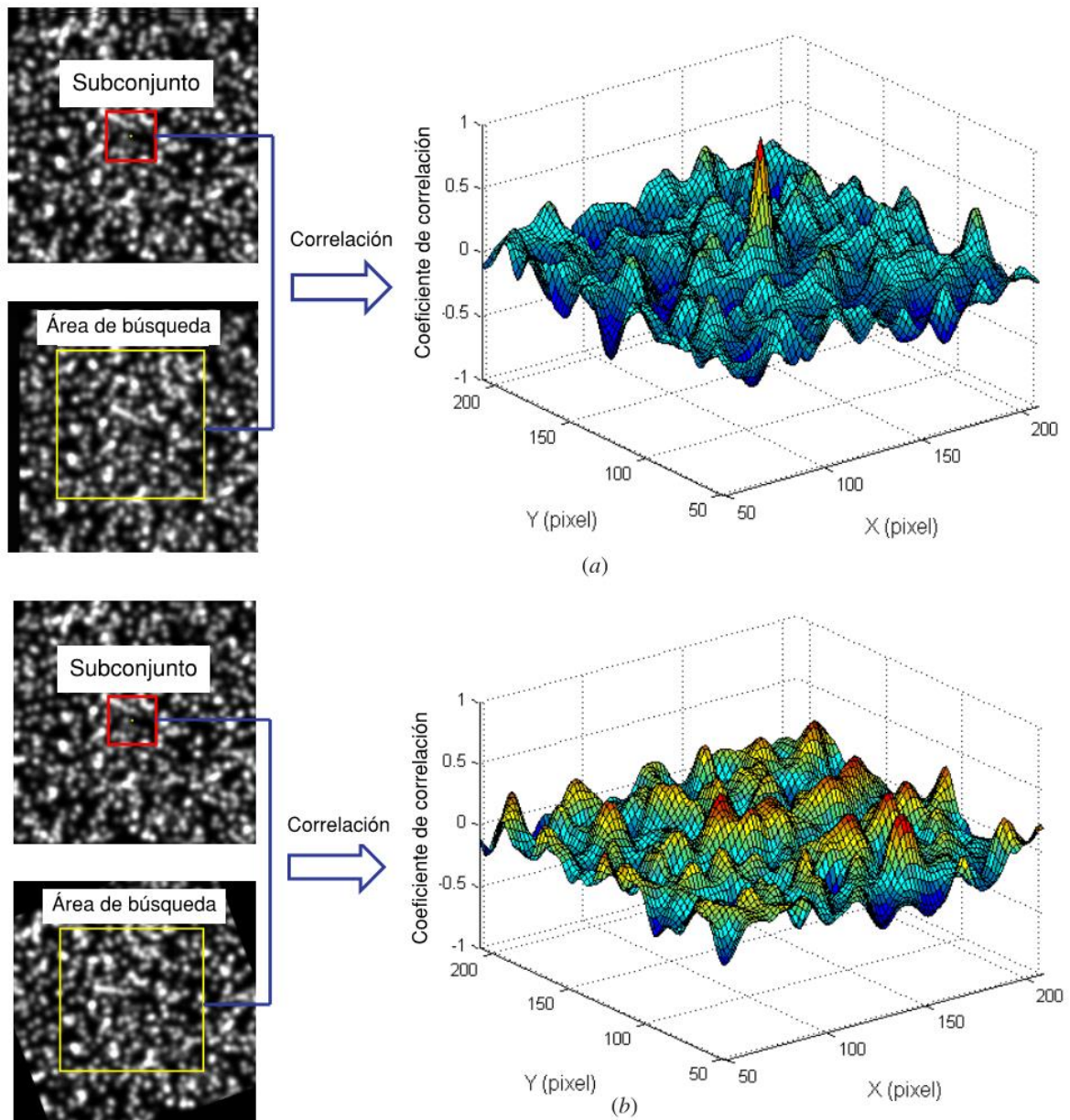


Imagen 20. Distribución de coeficientes de correlación cruzada de campo completo calculada cuando la imagen deformada se somete a (a) traslación de cuerpo rígido y (b) rotación relativa de 20° (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

Cálculo de la ruta.

Antes de la implementación del análisis DIC, la región de interés debe especificarse o definirse en la imagen de referencia. Los puntos espaciados regularmente dentro de esta región se consideran como puntos a calcular. El cálculo de correlación convencional generalmente comienza con el punto superior izquierdo de la región de

interés. Luego, el análisis de cálculo se realiza punto por punto a lo largo de cada fila o columna.

Normalmente, para acelerar el cálculo y ahorrar tiempo de cálculo, los desplazamientos y las deformaciones calculados del punto actual se utilizan como la estimación inicial del siguiente punto según el supuesto de deformación continua. En este sentido, el cálculo DIC convencional es un enfoque dependiente de la trayectoria.

Este enfoque dependiente de la trayectoria puede dar lugar a resultados erróneos en los siguientes casos.

- Primero, si las imágenes digitales de un objeto de prueba práctico contienen áreas discontinuas como grietas, agujeros u otra área discontinua o si se define una región de interés irregular en la imagen de referencia, la transferencia de la estimación inicial no proporcionará una estimación inicial confiable para el siguiente punto en algunos lugares.
- Segundo, si ocurre una deformación discontinua aparente en la imagen deformada, la transferencia de la conjetura inicial también falla.
- Tercero, los puntos de datos erróneos que ocurren ocasionalmente también proporcionarán una estimación inicial errónea para el siguiente punto.

En todos estos casos, si un punto se calcula incorrectamente, los resultados de los puntos incorrectos se pasarán al siguiente punto, lo que lleva a la propagación del error.

Sin embargo, la técnica descrita anteriormente solo proporciona desplazamientos con precisión de nivel de píxel o aproximación inicial del vector de deformación. Para mejorar aún más la precisión de DIC, se debe usar un cierto tipo de algoritmo de registro de sub-píxeles, como los que se enlistan a continuación (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009).

- Algoritmo de búsqueda grueso.
- Algoritmo de búsqueda de picos.
- Algoritmo de correlación cruzada de dominio espacial iterativo.
- Algoritmo basado en gradiente espacial.
- Algoritmos genéticos.
- Método de elementos finitos y algoritmo B-spline.

4.3.5. Estimación de campo de deformación.

Ahora, se pueden obtener los desplazamientos de campo completo a la precisión de subpíxeles utilizando los algoritmos descritos anteriormente. Sin embargo, como en muchas tareas experimentales de la mecánica de sólidos, como las pruebas mecánicas de análisis de esfuerzos de estructuras y materiales, las distribuciones de tensiones de campo completo son más importantes y deseables.

La técnica más práctica para la estimación de la tensión es la técnica de ajuste de mínimos cuadrados local puntual. Para obtener las deformaciones de los puntos ubicados en los límites de cálculo, se realiza una extensión de continuidad del campo de desplazamiento en el límite de la imagen.

4.3.6. Resumen.

En resumen, el procedimiento para aplicar la técnica de Correlación Digital de Imágenes se define en los siguientes pasos:

1. **Sistema de Imagen:** Consiste en el montaje del escenario que contiene el espécimen, la cámara y la iluminación. El espécimen debe contar con un patrón de manchas impregnado en su superficie y adicionalmente tener listo el montaje de simulación de cargas laterales.
2. **Calibración de la cámara:** Consiste en determinar la distancia focal de la cámara fotográfica, de manera que se obtenga un tamaño de píxel adecuado con la iluminación requerida.
3. **Adquisición de Imagen:** Consiste en adquirir todas las imágenes posibles del proceso de carga sobre la muestra.
4. **Registro de Imagen:** Consiste en el análisis de las imágenes, registrando su variación en el tiempo mediante una grilla. Se registra la variación mediante la imagen de referencia (sin deformación) y la imagen deformada.
5. **Campos de desplazamiento y deformación:** Consiste en la obtención de los campos de desplazamiento y deformación, a través de un software que correlaciona cada imagen. A continuación, en la Imagen 21 se muestra de manera esquemática como se aplica la técnica del DIC en 2D.

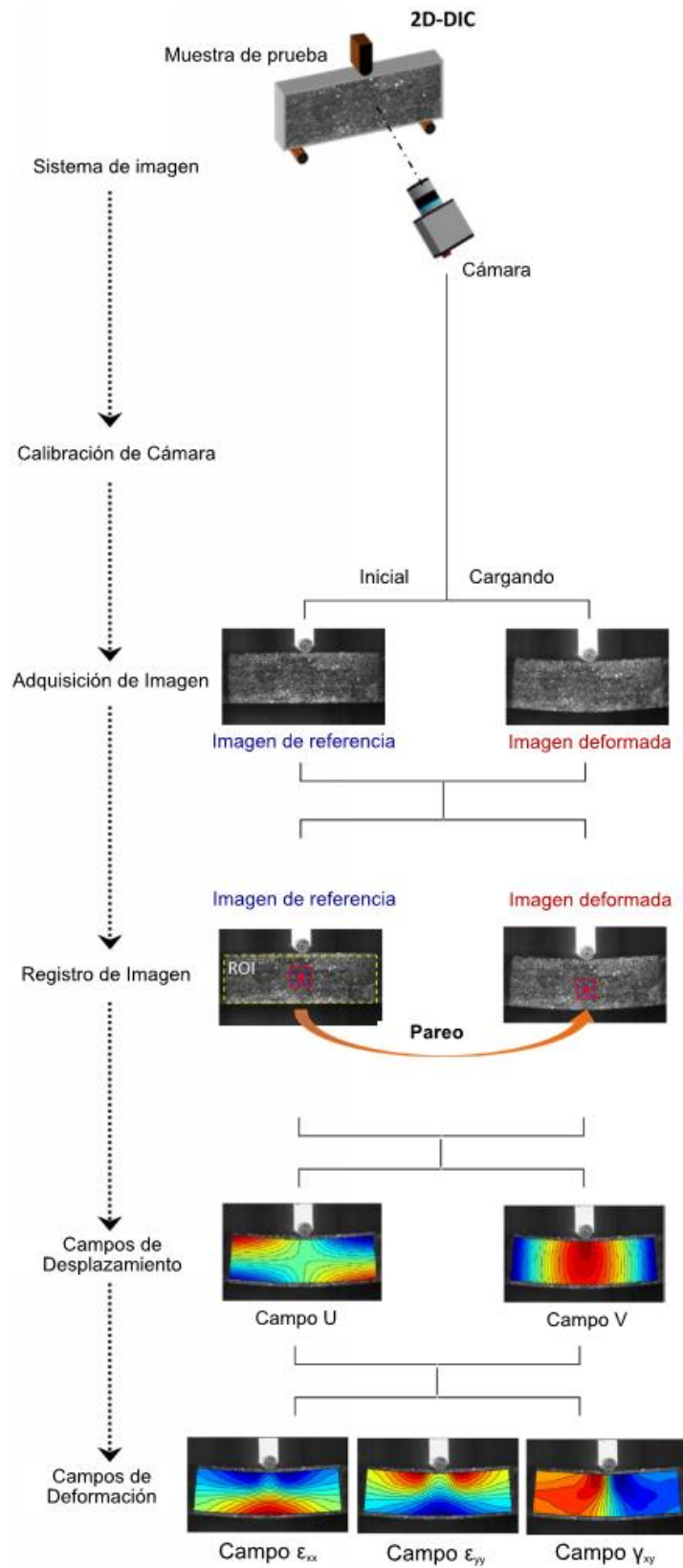


Imagen 21. Esquema de la aplicación de la Técnica DIC en 2D (Pan B. , 2018).

4.4. Ventajas y desventajas de la técnica DIC.

Como se mencionó anteriormente, la técnica de Correlación Digital de Imágenes ha sido empleada en los últimos años para el análisis de diversos problemas en el campo de la mecánica experimental. Esta técnica presenta varias ventajas respecto a otros métodos ópticos interferométricos para la medición de desplazamientos y deformaciones (López-Alba, López-García, Dorado, & Díaz, 2012):

- El montaje necesario es sencillo, una cámara digital CCD y los elementos mecánicos para fijarla. Las probetas se preparan de forma que pueda ser aplicada la técnica, en algunas ocasiones la propia textura del material permite la aplicación de la técnica óptica directamente.
- La luz necesaria para la realización de los ensayos puede ser luz natural, aunque en ocasiones se utiliza fuentes de luz externas para mejorar la calidad de las imágenes. Por lo tanto, es adecuado tanto para aplicaciones de laboratorio como de campo.
- Amplio rango de sensibilidad y resolución de medición: dado que el método 2D-DIC trata con imágenes digitales, las imágenes digitales grabadas por varios dispositivos de adquisición de imágenes digitales de alta resolución espacial pueden procesarse directamente.
- Es versátil, puede aplicarse a diferentes problemas, es no invasiva y llega a tener hasta 0.01 píxel de precisión para la medida de desplazamientos y 0.01% para la medida de deformaciones.
- Los algoritmos que implementa la técnica tienen bajos requerimientos computacionales, puede incluso realizarse análisis en tiempo real.
- Igualmente, la técnica presenta algunas desventajas como es la dependencia de la calidad de las imágenes tomadas en los ensayos y las mediciones de deformaciones donde la superficie presente roturas, ya que conllevan pérdida de información.

- Otras desventajas son que la superficie del objeto plano de prueba debe tener una distribución de intensidad de gris aleatoria; las mediciones dependen en gran medida de la calidad del sistema de imagen y en la actualidad, la precisión de la medición de tensión del método 2D DIC es menor que la de las técnicas interferométricas y no se recomienda como una herramienta eficaz para la medición de deformaciones pequeñas no homogéneas.
- Diversas aplicaciones han sido desarrolladas en distintos campos tanto de la industria como en la investigación debido a la mejora en los algoritmos de cálculo empleados y desarrollo de la técnica.

4.5. Últimos avances en la técnica del DIC.

A continuación, se enlistan una serie de avances de diferentes estudios, que indican cuán importante ha sido la técnica DIC en los últimos años y como ha ido evolucionando, hasta convertirse en una metodología aceptable y de gran precisión en el estudio mecánico de los materiales.

1. La técnica DIC ha sido ampliamente aceptada como una práctica experimental de rutina para el desplazamiento de campos completos y las mediciones de tensiones en la investigación académica y los laboratorios universitarios, y demuestran un potencial cada vez mayor en diversos campos de ingeniería y aplicaciones industriales. (Pan B. , Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals, 2018).
2. En la comunidad de mecánicos experimentales, DIC ha sido considerado como un avance revolucionario; el más importante desde la galga extensométrica. Continuará siendo la herramienta de medición de deformación más práctica y poderosa en el futuro inmediato encontrando cada vez más aplicaciones en muchas áreas nuevas en el futuro. (Pan B. , Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals, 2018).
3. La técnica Correlación de Imágenes Digitales (DIC) ha sido continuamente refinada y ampliamente utilizada en diferentes campos en las últimas tres décadas. Debido a sus ventajas comparables, tales como la configuración

experimental simple, la implementación fácil, la robustez fuerte contra la variación de la vibración y la luz ambiental y el amplio rango de aplicabilidad con ajustes temporales y ajustables (Dong & Pan, 2017).

4. En las resoluciones espaciales, la técnica DIC ha sido ampliamente aceptada como una herramienta potente y flexible para la medición de la forma, el movimiento y la deformación de diversos materiales y estructuras, en diversas escalas temporales y espaciales, y en diferentes entornos experimentales (Dong & Pan, 2017).
5. La correlación de imágenes digitales (DIC) es una técnica óptica versátil que puede extender su aplicación a las operaciones de monitoreo estructural ya que sus capacidades son, en teoría, escalables para cualquier tamaño.
6. El uso de la correlación de imágenes digitales (DIC) proporciona una posibilidad de medición de campo completo, casi continua, que sería equivalente a instalar innumerables sensores en cada dirección. Por lo tanto, esta podría ser una técnica de monitoreo más fácil, económica y competitiva que las ya existentes.
7. La principal desventaja de esta técnica radica en la necesidad de un entorno controlado que puede no ser una posibilidad para todos los sujetos de monitoreo.
8. La presencia de vibraciones en el suelo u otras condiciones severas puede provocar un movimiento relativo en las cámaras que puede influir en los resultados medidos o variar los parámetros de calibración iniciales, que a su vez pueden invalidar los datos calculados.
9. La técnica 2D-DIC puede considerarse como una técnica efectiva para medir desplazamientos y deformaciones de campo completo con un alto nivel de precisión y resolución espacial incluso en el caso de especímenes grandes y campos de deformación complicados.
10. El uso de cámaras convencionales de bajo costo (en comparación con cámaras industriales especiales) hace que esta técnica sea asequible para la mayoría de los laboratorios de ingeniería estructural.
11. Para promover el interés en la investigación y una mejor aplicación de las técnicas DIC, se enlistan a continuación los posibles desarrollos que podrían hacer que DIC sea una técnica más útil e incisiva (Pan B. , Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals, 2018):

- a. Se debe desarrollar un marco DIC inteligente, totalmente automático, de alta precisión y eficiencia, que integre todos los siguientes aspectos:
- Proporcionar una estimación precisa de la conjetura inicial de los puntos de semilla de una manera automática y rápida.
 - Seleccionar de forma adaptativa el tamaño óptimo de subconjunto y la función de forma para mediciones de campo de desplazamiento precisas.
 - Seleccionar de forma adaptativa el tamaño óptimo de la ventana de tensión y los polinomios de ajuste para una determinación precisa de la tensión de la tensión.
- b. Introducción de nuevos sistemas de imágenes y cuantificación y corrección de errores de imagen:
- Combinar nuevos dispositivos de imágenes (p. Ej., Cámaras panorámicas, cámaras plenópticas, endoscopios, electrografía ultrasónica, imágenes fotoacústicas, tomografía de coherencia óptica, imágenes de neutrones, imágenes de resolución súper) con DIC para ofrecer nuevas herramientas para la deformación cuantitativa o alto rendimiento (es decir, múltiples dispositivos físicos). Cantidades) Mediciones en nuevas áreas.
 - Comprender el principio de creación de imágenes y el modelo de creación de imágenes de los nuevos dispositivos de generación de imágenes, identificar y cuantificar sus fuentes de error y desarrollar enfoques para mitigar o corregir estas fuentes de error para proporcionar una medición de deformación confiable y precisa.
- c. Integración con herramientas modernas de diseño y simulación, y métodos inversos:
- Combinar DIC con herramientas CAD (dibujo asistido por computadora) y software FEM (elementos finitos) para obtener un conjunto integrado de herramientas de diseño, análisis y medición.

- Integrar las técnicas DIC con varios métodos inversos para obtener una identificación perfecta y precisa de múltiples parámetros constitucionales.

12. Para ilustrar la popularidad de las técnicas de DIC, la Imagen 22 muestra el número de documentos recuperados utilizando “Web of Science” (Índice de citas de ciencia expandido) ingresando como temas las siguientes palabras clave: correlación de imagen digital, galgas de deformación, interferometría de moiré e interferometría de patrón de manchas electrónico; respectivamente en los últimos 16 años (de 2000 a 2015).

Se ha encontrado que la técnica DIC han tenido un alto crecimiento en la investigación metodológica y aplicaciones desde 2005, que se materializan en el número aumento exponencial de publicaciones. De hecho, como una técnica óptica no interferométrica representativa, DIC se ha vuelto cada vez más popular en comparación con sus homólogos interferométricos. Más aún, su popularidad en publicaciones académicas incluso supera la técnica de medición eléctrica de galga extensiva ampliamente utilizada desde 2009. Se puede decir que el método DIC ha sido y seguirá siendo la herramienta de metrología más popular e importante de la Comunidad de Mecánicos Experimentales (Dong & Pan, 2017).

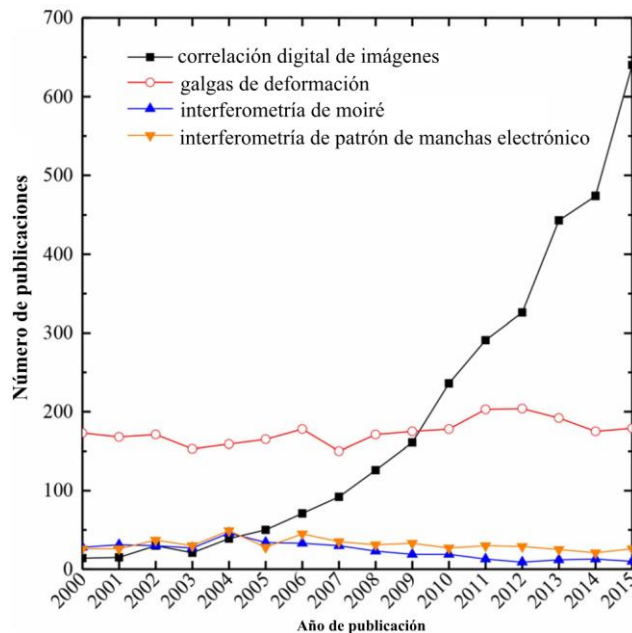


Imagen 22. Número de artículos que involucran técnicas de medición de deformación típicas durante los últimos 16 años (desde 2000 hasta 2015) (Dong & Pan, 2017).

5. Implementación de la Correlación Digital de Imágenes.

A continuación, se describen todos los pasos suscitados antes de la falla del muro, con el fin de implementar la técnica denominada Correlación Digital de Imágenes, lo cual dará paso a la obtención de imágenes que permitirá analizar los resultados de desplazamientos y deformaciones y por último realizar la respectiva comparación de los resultados de la técnica con los resultados obtenidos mediante instrumentación.

Pasos:

1. Muro de mampostería confinada reforzada (MCR)
 - a. Diseño.
 - b. Construcción.
2. Preparación de la muestra.
 - a. Instrumentación.
 - b. Montaje de los mecanismos para la falla.
 - c. Descripción del equipo a utilizar.
 - d. Distancia de trabajo
 - e. Patrón de manchas.
3. Registro de imágenes
 - a. Protocolo de carga.
 - b. Cargas en la estructura.
 - c. Adquisición de imágenes.
4. Procesamiento digital de las imágenes adquiridas
 - a. Programa (software) utilizado.

5.1. Muro de mampostería confinada reforzada

Como se indicó anteriormente en el apartado de alcances y limitaciones, este proyecto formó parte de una investigación que involucró estudiantes de grado y estudiantes de posgrado de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica y el cual contó con financiamiento del CONICIT. Las investigaciones se centraron en obtener resultados del comportamiento de la mampostería, utilizando el sistema constructivo habitual en la región, el cual consiste en confinar la mampostería a través de elementos viga-columna de concreto reforzado y a su vez, reforzar los paños de los mampuestos con barras verticales y barras horizontales.

5.1.1. Diseño.

Como parte del trabajo, el muro utilizado en esta investigación fue llevado a cabo por un estudiante de grado (Picado Arguedas, 2019) (Sánchez Vargas, 2019) y validado por el director de su proyecto de graduación. El mismo fue diseñado para que soportara cargas en su plano, construido en el Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme-UCR) con mano de obra calificada y materiales de calidad, y su falla fue aprovechada por los diferentes estudiantes para realizar investigaciones implementando técnicas como micromodelado, correlación digital de imágenes (que corresponde a este trabajo), así como validar las metodologías habituales como el elemento finito y el análisis convencional estructural por factores de carga.

La investigación consistió en desarrollar varios conjuntos de muros, en los cuales fueron variados su relación altura/longitud (H/L), desde 0.50 hasta 2.0. Para este estudio, utilizaremos un muro con una relación teórica $h/L = 2.0$.

A continuación se muestra el resumen del diseño propiamente del muro (Picado Arguedas, 2019).

- Sistema Constructivo: Mampostería confinada reforzada.
- Dimensiones (ver Imagen 23):
 - Muro: 284.5 cm (alto) x 140 cm (largo) x 15 cm (espesor).
 - Cimiento: 240 cm (largo) x 125 cm (ancho) x 25 cm (altura).
 - Viga corona: 140 cm (largo) x 45 cm (peralte) x 15 cm (espesor).

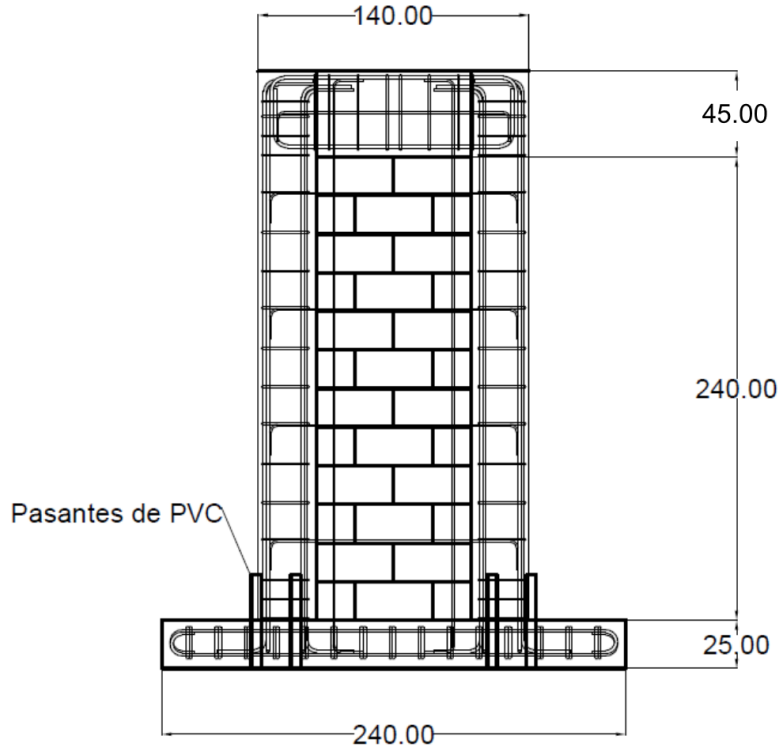


Imagen 23. Dimensiones del muro.

- Resistencia a la compresión de los Mampuestos: Bloques de concreto clase A ($f'_m = 100 \text{ kg/cm}^2$ valor teórico / $f'_m = 298 \text{ kg/cm}^2$ valor experimental).
- Resistencia a la compresión del concreto:
 - Relleno: $f'_c = 175 \text{ kg/cm}^2$ valor teórico / $f'_c = 197 \text{ kg/cm}^2$ valor experimental).
 - Columnas: $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ valor teórico / $f'_c = 275 \text{ kg/cm}^2$ valor experimental).
 - Cimiento: $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$ valor teórico / $f'_c = 452 \text{ kg/cm}^2$ valor experimental).
- Acero de refuerzo: Según norma ASTM A615 para grado 40 (#3, $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$ valor teórico / $f_y = 3412 \text{ kg/cm}^2$ valor experimental) y ASTM A706 para Grado 60 (#4, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ valor teórico / $f_y = 4585 \text{ kg/cm}^2$ valor experimental), (#5, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ valor teórico / $f_y = 4529 \text{ kg/cm}^2$ valor experimental) y (#6, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ valor teórico / $f_y = 4901 \text{ kg/cm}^2$ valor experimental),

- Paño de mampostería: acero horizontal y vertical en barras Corrugadas #3 (9.5 mm) – Grado 40, ambos a cada 60 cm el horizontal fue colocado en la sisa y el vertical en la celda (solo rellena donde existe acero).
- Columnas (ver Imagen 24):
 - Acero vertical 6 barras corrugadas #5 (15.9mm) – Grado 60.

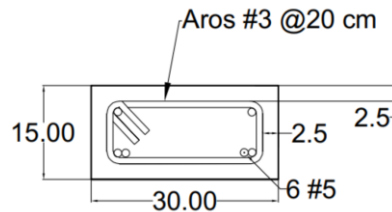


Imagen 24. Detalle de refuerzo en columna de concreto.

- Cimiento (ver Imagen 25) :
 - Acero longitudinal 18 barras corrugadas #5 (15.9mm) – Grado 60.
 - Aros #5 a cada 15 cm (15.9mm) – Grado 60.
 - Pasantes para pernos de anclaje al piso fuerte: 8 ductos de PVC de 38.1mm de diámetro, confinados por 2 aros de barra #3 (9.5 mm) – Grado 40.

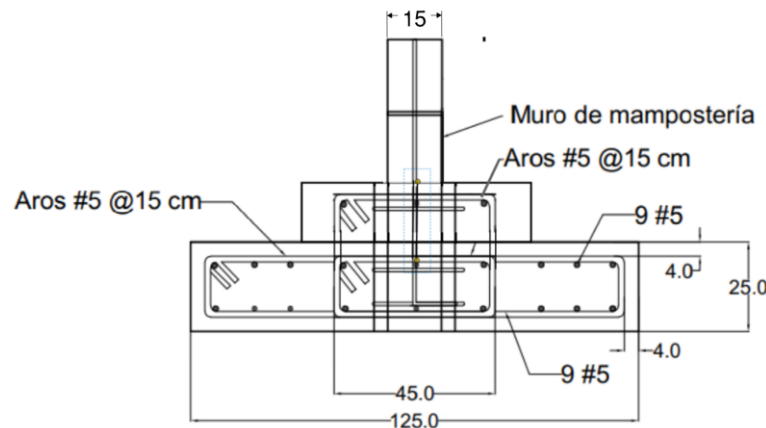


Imagen 25. Detalle de refuerzo en cimiento de concreto.

- Viga Corona (ver Imagen 26):
 - Acero horizontal 4 barras corrugadas #6 (19.1mm) – Grado 60 + 2 barras #3 (9.5 mm) – Grado 40.

- Aros #3 (9.5 mm) – Grado 40 + gancho #3 (9.5 mm) – Grado 40 a cada 20 cm

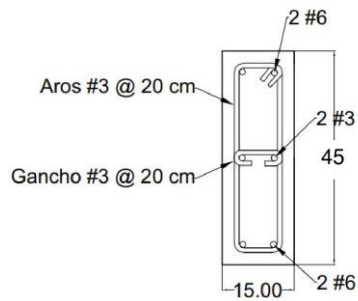


Imagen 26. Detalle de refuerzo en viga corona de concreto.

- Tipo de diseño: Muro de Corte.
- Relación de aspecto real (ver Imagen 27):
 - $H_{\text{muro}} = 2400 \text{ mm}$.
 - $H_{\text{viga}} = 450 \text{ mm}$
 - $H_{\text{viga de carga}} = 395 \text{ mm}$
 - $L_{\text{muro}} = 1400 \text{ mm}$

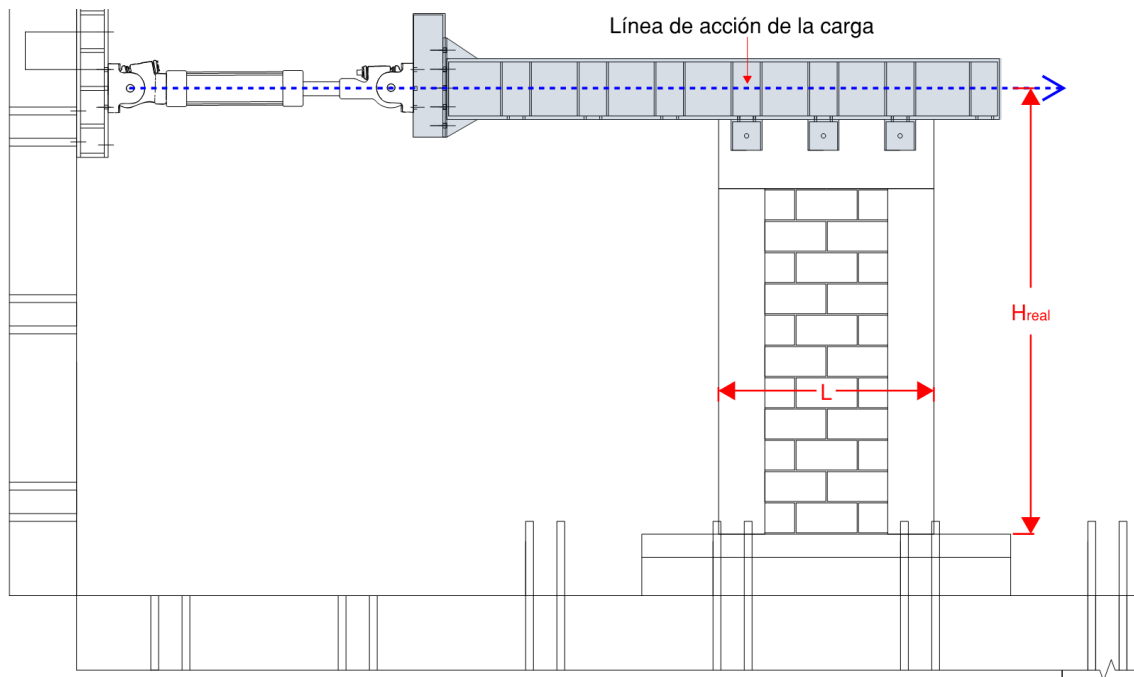


Imagen 27. Ajuste de la altura a la línea de acción de la carga.

$$H/L_{real} = \frac{H_{muro} + H_{viga} + 0.5 \cdot H_{viga \text{ de carga}}}{L} = \frac{2400mm + 450mm + 0.5 \cdot 395mm}{1400mm} = 2.18$$

5.1.2. Construcción.

Como ya se indicó en el apartado 5.1.1, el muro fallado fue construido como un paño de mampostería de concreto, confinado por una viga corona y dos columnas, ambas de concreto reforzado (ver Imagen 28). Los paños de mampostería se reforzaron tanto vertical como horizontalmente. La base consta de una fundación de concreto reforzado, con ductos de PVC que permitieron que fuera anclado al piso fuerte del laboratorio para simular una condición restringida, similar a una fundación empotrada en el terreno.



Imagen 28. Muro construido de mampostería confinada reforzada.

El proceso constructivo inició finales del 2018 y se completó a principios del 2019. La primera etapa consistió en la confección de las armaduras de la cimentación, se colocaron los ductos, el acero vertical, la colocación de galgas y luego se coló el cemento. En una segunda etapa se colocaron los mampuestos, luego se colaron las

columnas y la viga y una vez fraguado, se procedió a remover el encofrado y curar los elementos durante 28 días.

5.2. Preparación de la muestra.

5.2.1. Instrumentación del muro.

El muro se instrumentó con cinco transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT por sus siglas en inglés) el cual es un tipo de transformador eléctrico utilizado para medir desplazamientos lineales y cinco galgas extensiométricas o extensiómetros, como sensores para medir la deformación, presión, carga, par, posición, entre otros.

En la Imagen 29, se puede apreciar la ubicación de la instrumentación mencionada.

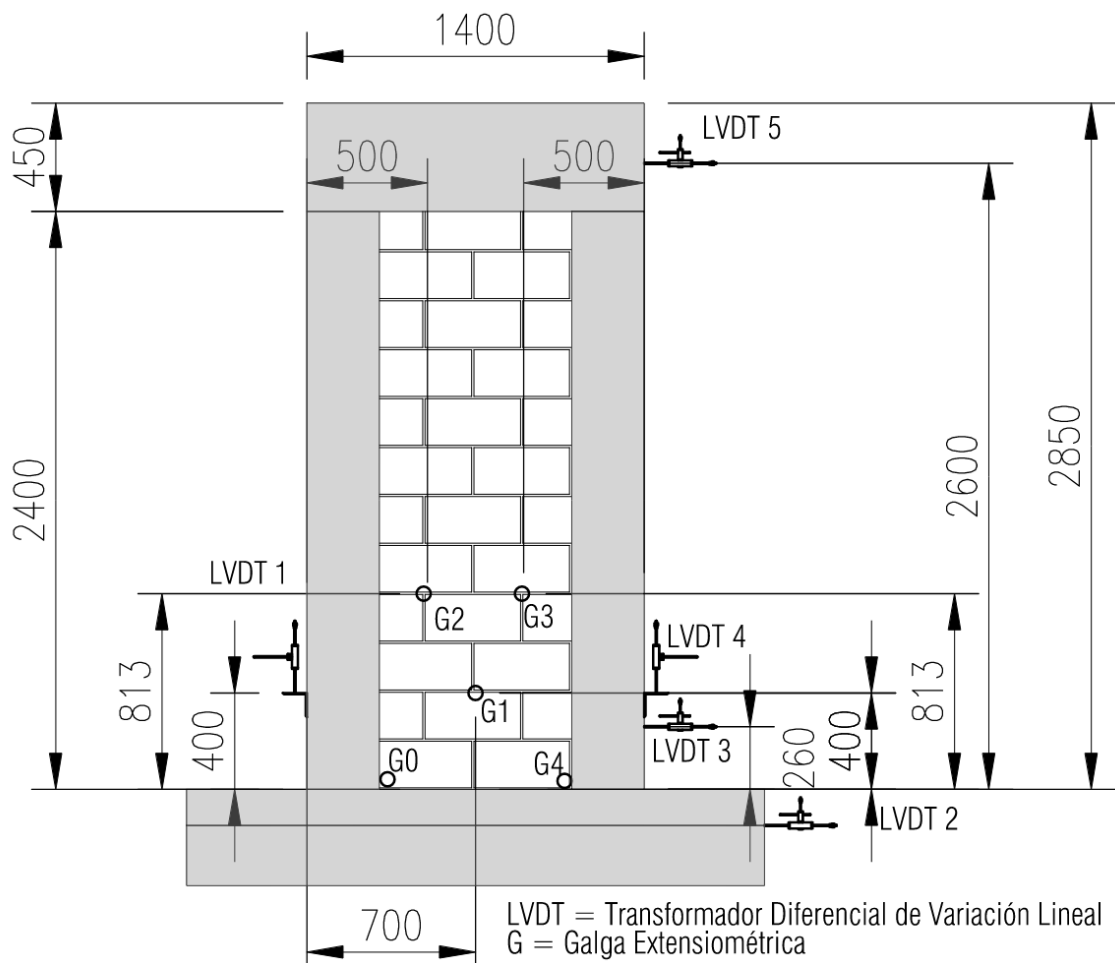


Imagen 29. Ubicación de los transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) y Galgas extensiométricas (cotas en milímetros).

5.2.2. Montaje de los mecanismos para la falla.

Para la simulación de las cargas laterales cíclicas se utilizó un pistón hidráulico, el cual se apoya en el muro de reacción o muro fuerte y a su vez, el muro es anclado mediante pernos al piso de reacción o piso fuerte. Adicionalmente, para evitar que el muro se vea sometido a movimientos que provoquen esfuerzos fuera del plano, se colocó un marco de restricción lateral al frente del mismo, en el lado derecho. En la Imagen 30 se puede ver el esquema de montaje del muro y en la Imagen 31 una fotografía del mismo montaje en el laboratorio.

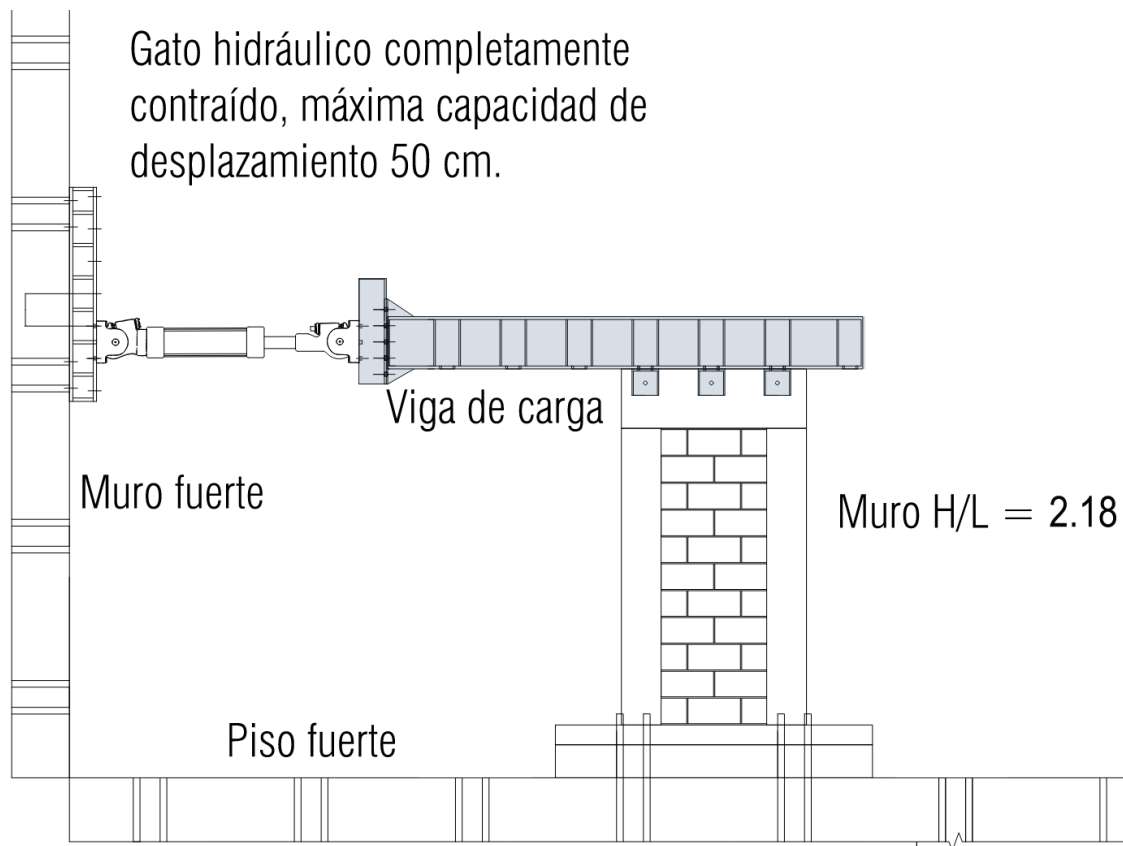


Imagen 30. Esquema de montaje del muro.

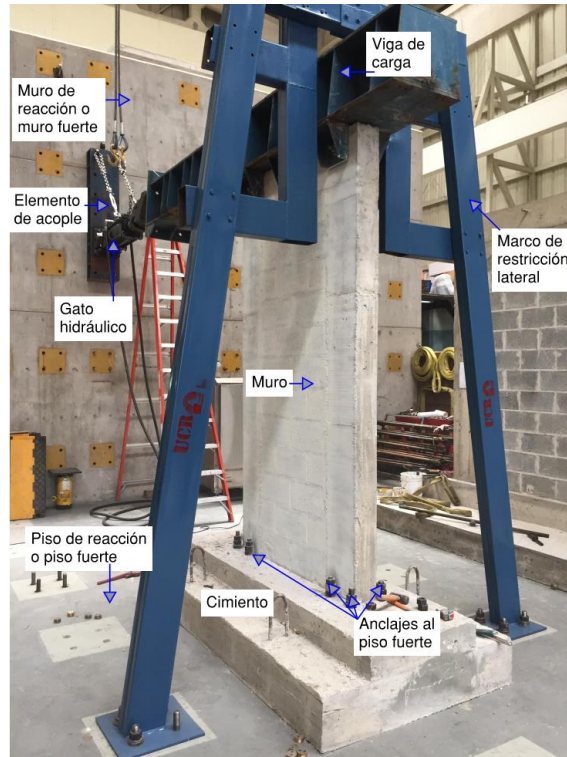


Imagen 31. Montaje del muro en el laboratorio.

5.2.3. Descripción del equipo utilizado.

Para esta prueba, se utilizó el siguiente equipo

Equipo fotográfico y trípode:

La cámara utilizada es Digital Compacta, de marca Sony, modelo Cyber-shot DSC-HX400V, la cual fue facilitada por la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural, del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme-UCR), Universidad de Costa Rica (ver Imagen 32).



Imagen 32. Cámara Digital Compacta Sony Cyber-shot DSC-HX400V.

Especificaciones de la Cámara utilizada:

Tipo de sensor: Sensor CMOS Exmor R® tipo 1/2,3 (ancho 6.17mm x alto 4.55mm – diagonal de 7,82 mm)

Número de píxeles (efectivos): 20,4 Megapíxeles.

Tipo de lente: Lente Zeiss® Vario Sonnar® T

Número F (apertura máxima): F2,8 (G) - 6,3 (T)

Distancia focal: $f=$ 4,3 - 215 mm

Ángulo de visión (equivalente en formato de 35 mm): 84-2 grados (24-1200 mm)

Rango de enfoque (desde la parte delantera de la lente): 1 cm - a infinito (W), 2,4 m - a infinito (T)

Zoom óptico: 50x

Zoom de imagen nítida (fotografía): Fotografía: 20 M aprox. 100x / 10 M aprox. 142x / 5 M aprox. 200x / VGA aprox. 810x / 15 M (16:9) aprox. 100x / 2 M (16:9) aprox. 270x; Video; Aprox. 100x

Zoom digital (imagen fija): Hasta 810 x (VGA)

Trípode: Trípode típico.

Iluminación: Lámparas.

Iluminación:

Equipo de iluminación, correspondiente a 2 lámparas tipo LED de la marca MANAX, facilitadas por el Programa de Ingeniería de Transportes (PITRA), del Lanamme-UCR (ver Imagen 33).



Imagen 33. Lámpara LED MANAX.

Características de la lámpara:

Tipo: LED.

Dimensiones: 240 mm x 145 mm x 160 mm.

Batería: 7,4 V, 4400 mAh

Lúmenes: (salida de luz): 900 lúmenes, 6000 K luz blanca fría.

Voltaje: 10 W.

5.2.4. Distancia de trabajo.

Para determinar la distancia de trabajo, se consideraron los siguientes aspectos:

Espacio disponible: Dado que el presente trabajo fue llevado a cabo en grupo, la falla del Muro $H/L=2.18$ se realizó hasta que uno de los muros en estudio, en específico el muro $H/L=0.5$, fue construido sobre el piso fuerte, dado que sus dimensiones no permitían una movilización de este. Para considerar esta condición, fue necesario estudiar las opciones que existían en el laboratorio para la ubicación de la cámara.

Para calcular cuánto espacio es el máximo disponible desde la cara del muro, la Imagen 34 muestra una de las dos posibilidades.

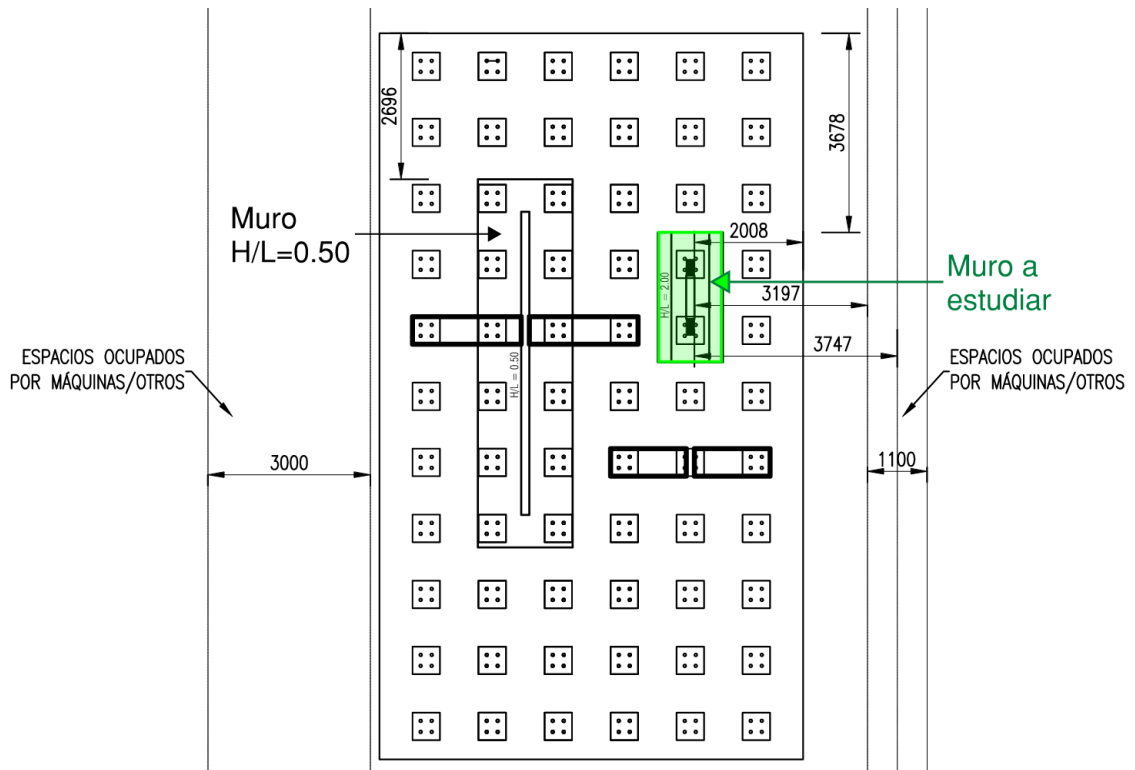


Imagen 34. Posibilidad 1 de 2, ubicación de los muros.

La Imagen 35 muestra la segunda posibilidad.

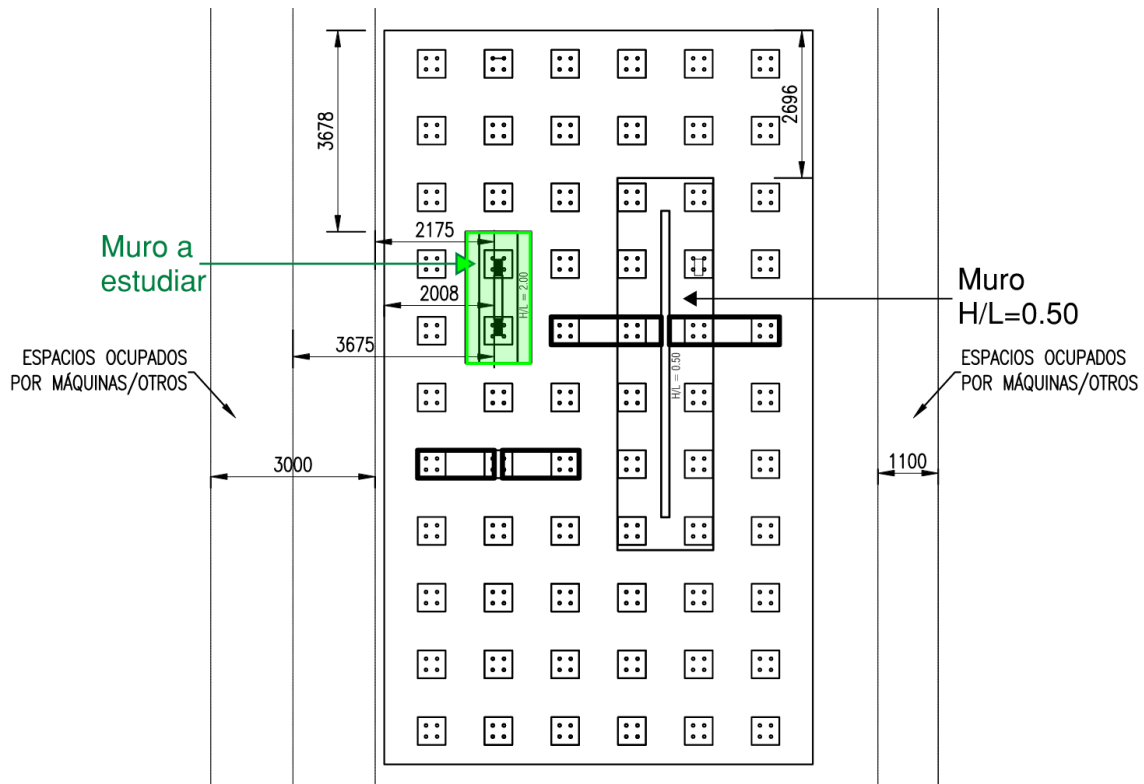


Imagen 35. Posibilidad 2 de 2, ubicación de los muros.

Colocación de la cámara: Para colocar la cámara, se consideró el espacio visual del laboratorio, bajo la condición anterior (es decir, con ambos muros construidos y colocados sobre el piso fuerte).

Analizando ambas posibilidades y considerando que, mediante coordinación previa era posible utilizar al menos la mitad de los espacios ocupados por máquinas u otros; en cualquiera de las dos posibilidades, el espacio máximo disponible es poco más de 3.5 metros, por lo que se estudió colocar la cámara en alguna de las distancias entre los 2.0 m a los 3.5 m desde la cara del muro, con el fin de determinar la óptima.

Campo de Visión (FOV): Para determinar el campo de visión descrito en el apartado 4.3.1.1 (ver Imagen 13), se deben conocer los siguientes parámetros tamaño de sensor de la cámara, distancia focal y distancia de trabajo (esta última es un insumo que se obtiene del espacio en el laboratorio). A continuación, se muestra la fórmula que permitirá obtener la dimensión vertical y horizontal del campo.

$$FOV = \frac{SS \cdot FD}{FL} \quad \text{[ecuación \#2]}$$

Donde

- FOV = Campo de visión (mm).
- SS = Tamaño del sensor (mm).
- FD = Distancia de trabajo (mm).
- FL = Distancia focal (mm).

Es importante aclarar que, para utilizar la ecuación #2, deben utilizarse los datos reales del sensor de la cámara y no sus equivalencias en “full frame”.

De las características de la cámara utilizada descritas en el apartado 5.2.3, se obtiene que la distancia focal varía desde los 4.3mm hasta los 215 mm; sin embargo, es importante determinar cuál es el valor por utilizar pues esta se relaciona de manera directa con el tipo de fotografía que se requiere. Por ello, para utilizar una distancia focal apropiada, se debe conocer la relación proporcional que tiene el sensor de la cámara a utilizar con el sensor de una cámara “full frame” [24mmx36mm], mejor conocida como cámara de 35mm (ver Imagen 36); lo anterior viene a raíz de que el sensor de la cámara de 35mm se utiliza como referencia para definir las relaciones con el tipo de fotografía y su distancia focal equivalente (ver Imagen 37). Esta relación se conoce como factor de recorte o factor de conversión.

TAMAÑO DE LOS SENSORES

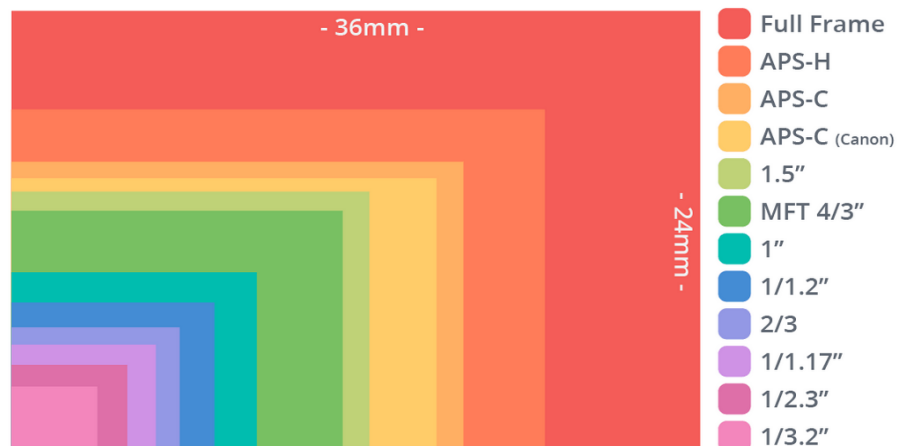


Imagen 36. Relación entre tamaños de los sensores de diferentes cámaras con el tamaño del sensor “Full Frame” (24mmx36mm). (Pérez, 2021)

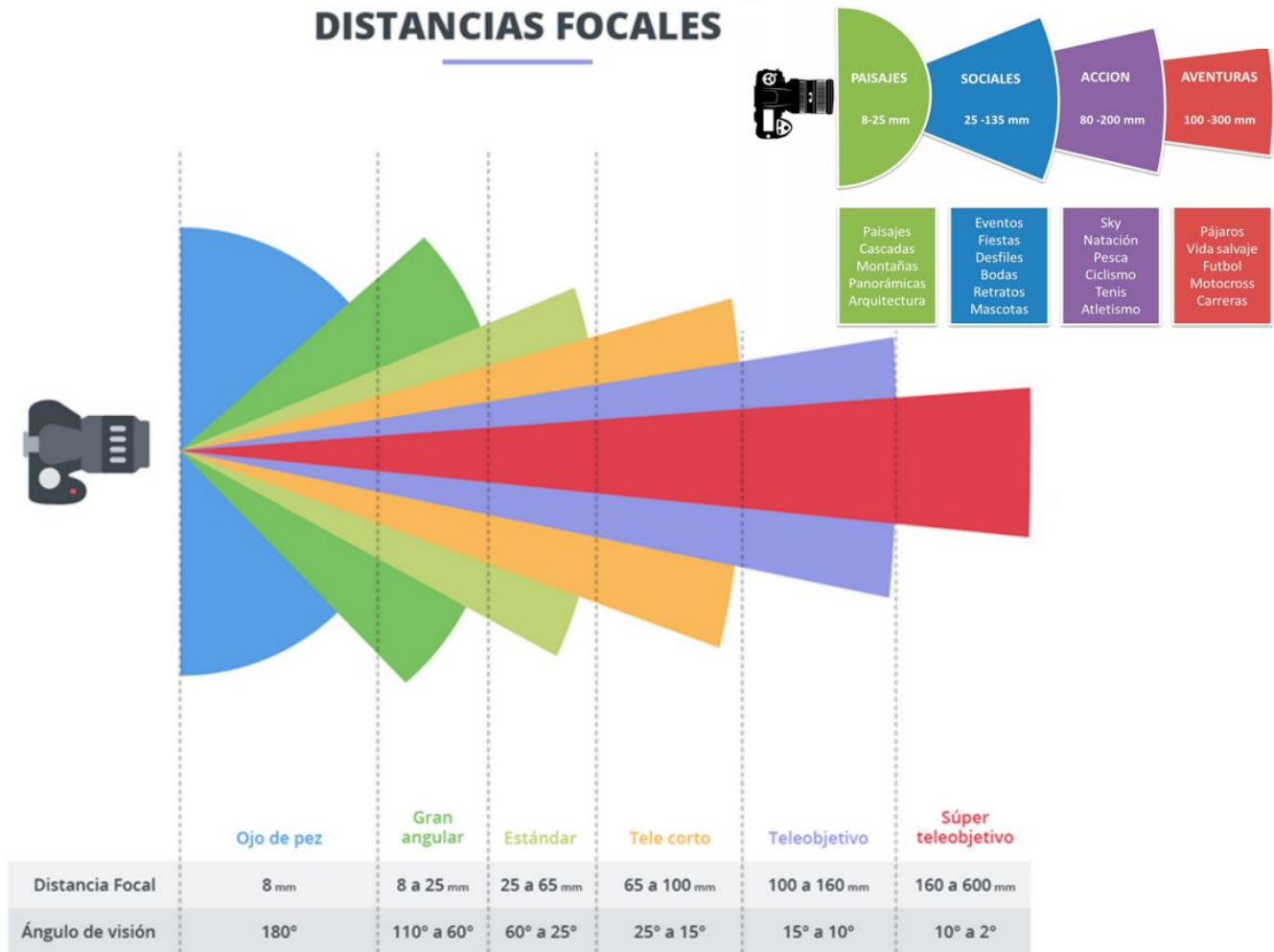


Imagen 37. Distancias focales, tipos de fotografía y ángulos de visión para una cámara “Full Frame”. (Pérez, 2021)

El factor de recorte es la relación entre un valor de la distancia focal “full frame” y su valor de distancia focal equivalente en la cámara utilizada. Como se indicó en el punto anterior, las distancias focales de la cámara utilizada varían de 4.3mm a 215mm. Así mismo, las características de la cámara indican que su equivalencia con respecto a la cámara “full frame” es de 24mm a 1200mm. Basta entonces con encontrar el factor de recorte comparando cualquiera de los dos valores con su correspondiente.

$$\text{Factor de Recorte} = \frac{\text{Distancia focal mínima Equivalente (mm)}}{\text{Distancia focal mínima cámara (mm)}} = \frac{24\text{mm}}{4.3\text{mm}} = 5.6 \quad [\text{ecuación \#3}]$$

Para la obtención de las fotografías, nos interesa que la misma se encuentre dentro de un rango estándar, aunque existe otros tipos de fotografía como ojo de pez, gran angular, telecorto, teleobjetivo y superteleobjetivo; estos se deben evitar para este trabajo, pues los ángulos de visión provocarán que la fotografía tenga dimensiones

deformadas (ver Imagen 37). Por tanto, basado en la teoría de la fotografía, se tiene experimentalmente que una foto normal-estándar, tiene un objetivo o distancia focal de entre 25mm y 65 mm, siendo que 50 mm es un valor que se recomienda para obtener una fotografía con una condición sin deformación del espacio. De esta manera, conociendo el factor de recorte, se puede conocer cuál es la distancia focal de la cámara utilizada que equivale a la recomendación de 50 mm.

$$\text{Distancia focal Sony Cyber Shot (recomendada)} = \frac{50\text{mm}}{5.6} = 8.96\text{mm}$$

Lo anterior indica que con una distancia focal de 8.96 mm en la cámara Sony Cyber-Shot, se tendrá una distancia focal equivalente “full frame” de 50mm que permitirá una distancia óptima al objetivo, sin embargo, es necesario aclarar que esto es un punto teórico de arranque, es decir, que la cámara puede utilizar cualquier valor del rango entre 25mm y 65mm, al final el ejecutor debe elegir el que mejor se ajuste a los requerimientos de espacio.

Para determinar el rango completo de zoom de una fotografía tipo normal-estándar y así tener definidos los valores en los que se puede ajustar la cámara en laboratorio y que estén dentro de una distancia focal aceptable, es necesario conocer los valores de zoom óptico de la cámara (el cual define a “1x” como el valor de distancia focal mínimo y todos los demás valores se expresan en función de la misma variable “x”), dado que es la forma que comercialmente se utiliza para expresar al usuario la distancia focal. A manera de ejemplo se tiene la siguiente fórmula que expresa el valor de distancia focal obtenido para un objetivo o distancia focal de 50mm y su relación con la distancia focal mínima de 4.3mm (definida como “1x”), por lo que se tiene el valor de zoom óptico para ese dato en particular:

$$\text{Zoom óptico} = \frac{\text{Distancia focal Sony Cyber Shot}}{\text{Distancia focal mínima cámara}} = \frac{8.96\text{mm}}{4.3\text{mm}} = 2.1x$$

A continuación, en la Tabla 3, se tabulan todas las relaciones para los diferentes objetivos, obteniendo el valor comercial de zoom Óptico y sus equivalencias de distancia focal con el sensor de la cámara utilizada (Sony Cyber-Shot HX400v), el sensor estándar (Cámara “full frame” (35mm)) y el tipo de fotografía, dentro del rango de Gran Angular a Normal-Estándar.

Tabla 3. Zoom Óptico de la Cámara Sony Cyber-Shot DSC HX400v y sus relaciones.

zoom óptico	Sony-Cyber Shot HX400v Distancia focal (mm)	Equivalente "Full frame" (35mm) Sensor (24mmx36mm)	Tipo de fotografía
1x	4.3	24.0	NORMAL-ESTÁNDAR (límite)
1.1x	4.7	26.4	NORMAL-ESTÁNDAR
1.2x	5.2	28.8	NORMAL-ESTÁNDAR
1.3x	5.6	31.2	NORMAL-ESTÁNDAR
1.4x	6.0	33.6	NORMAL-ESTÁNDAR
1.5x	6.5	36.0	NORMAL-ESTÁNDAR
1.6x	6.9	38.4	NORMAL-ESTÁNDAR
1.7x	7.3	40.8	NORMAL-ESTÁNDAR
1.8x	7.7	43.2	NORMAL-ESTÁNDAR
1.9x	8.2	45.6	NORMAL-ESTÁNDAR
2x	8.6	48.0	NORMAL-ESTÁNDAR
2.1x	9.0	50.4	NORMAL-ESTÁNDAR
2.2x	9.5	52.8	NORMAL-ESTÁNDAR
2.3x	9.9	55.2	NORMAL-ESTÁNDAR
2.4x	10.3	57.6	NORMAL-ESTÁNDAR
2.5x	10.8	60.0	NORMAL-ESTÁNDAR
2.6x	11.2	62.4	NORMAL-ESTÁNDAR
2.7x	11.6	64.8	NORMAL-ESTÁNDAR (límite)
2.8x	12.0	67.2	TELEOBJETIVO
2.9x	12.5	69.6	TELEOBJETIVO
3x	12.9	72.0	TELEOBJETIVO

Por tanto, la cámara puede utilizar valores de zoom óptico entre 1x a 2.7x como máximo, para obtener una fotografía dentro de un rango normal, sin deformaciones.

Con la obtención de todos los parámetros anteriores, es posible conocer cuál es el Campo de Visión (FOV, por sus siglas en inglés), que se tiene para cada situación.

Para iniciar, se escogerá una distancia focal de 8mm para la Cámara Sony que al multiplicarla por el factor de conversión (8mm x 5.6 = 44.65mm equivalente FF – normal-estándar), se obtiene su equivalencia. Ahora, aplicando la relación que muestra la Imagen 13, se tiene el campo de visión de la siguiente manera.

Del apartado 4.3.1.1, se obtiene que las dimensiones del sensor son: ancho 6.17mm x alto 4.55mm. Para una distancia de trabajo de 2.0 m = 2000mm y una distancia focal de 8mm, es posible calcular el campo de visión utilizando la ecuación #2.

Campo de visión, dimensión de ancho:

$$FOV = \left(\frac{6.17mm \cdot 2000mm}{8mm} \right) = 1543mm$$

Campo de visión, dimensión de alto:

$$FOV = \left(\frac{4.55\text{mm} \cdot 2000\text{mm}}{8\text{mm}} \right) = 1138\text{mm}$$

De esta manera, se obtiene un campo de visión para cada una de las distancias de trabajo. En la Tabla 4, se muestran los diferentes campos de visión obtenidos para cada distancia de trabajo, con una distancia focal de 8mm.

Tabla 4. Campo de visión para distancias de trabajo de 2.0 a 3.5 m, con una distancia focal de 8mm.

Distancia de trabajo (mm)	Campo de visión	
	Ancho (mm)	Alto (mm)
2000	1543	1138
2500	1928	1422
3000	2314	1706
3500	2699	1991

En la Imagen 38, se trazan los diferentes campos de visión obtenidos (vista en planta y vista lateral), proyectados sobre el muro y con el sensor de la cámara colocada a una altura de 1.20 m sobre el suelo.

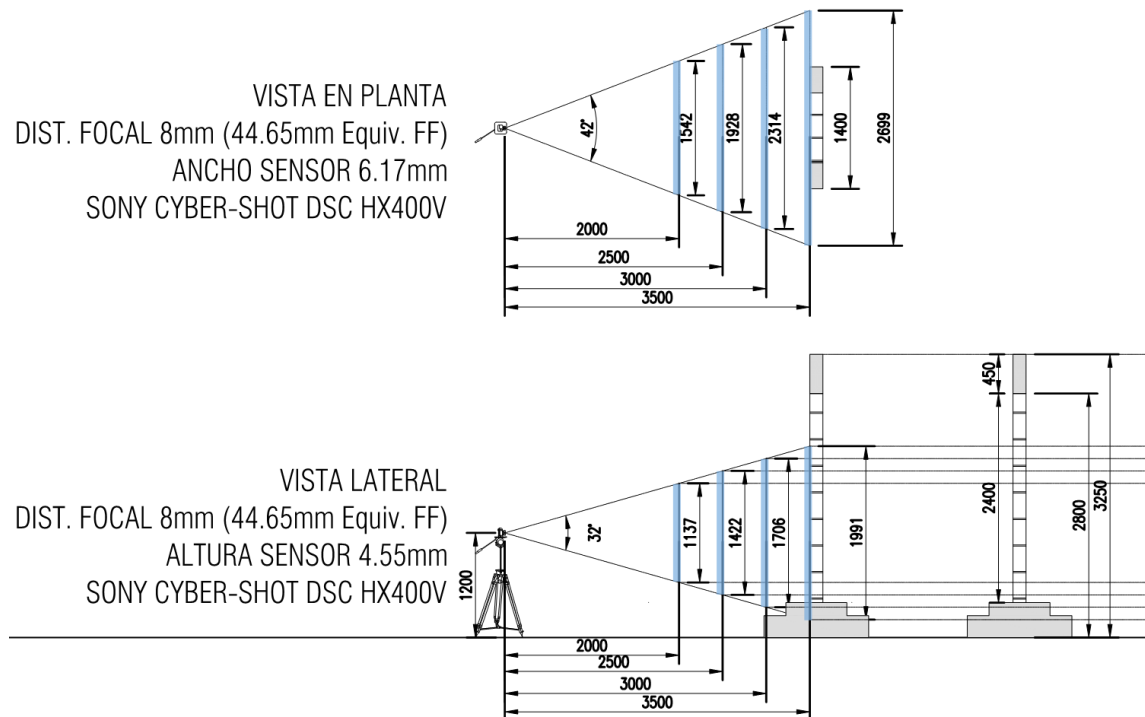


Imagen 38. Campos de Visión para Distancias de Trabajo entre 2.0 m y 3.5 m, con una distancia focal de 8mm (44.65mm equivalente "full frame"); proyectados sobre el muro H/L=2.18.

De la imagen anterior, la mejor proyección que cubre el muro es la distancia de trabajo de 3.5 metros. No obstante, es posible lograr una mejor cobertura de muro

manteniendo los 3.5 metros de distancia, variando la distancia focal y la altura de cámara.

En la Imagen 39, se muestra una primera opción con una distancia de trabajo de 3.5 m, pero variando la distancia focal a 6mm (33.49 mm equivalente FF – Normal-Estándar) y la altura de la cámara a 1500 mm y en la Imagen 40 se muestra una segunda alternativa, donde se utiliza la distancia focal mínima de 4.3mm (24 mm equivalente FF – Normal-Estándar) y se ajusta la altura de la cámara en 1.345m para lograr una cobertura óptima de la superficie del muro.

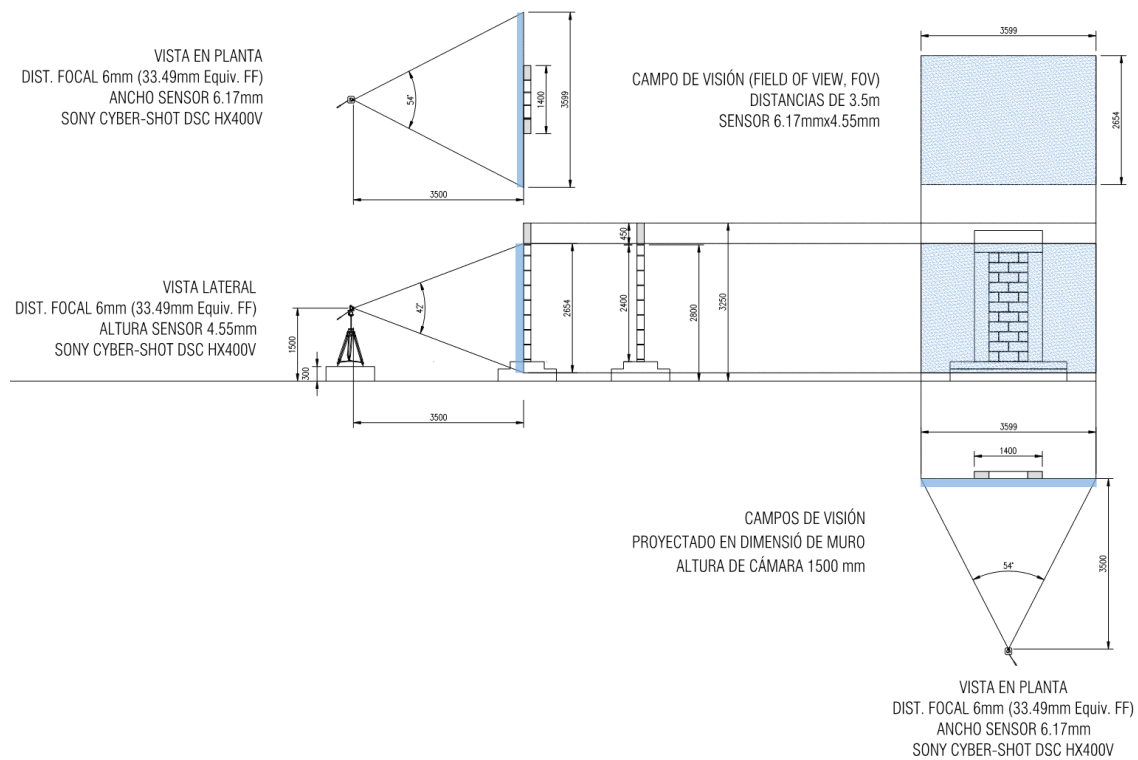


Imagen 39. Campo de Visión para una Distancia de Trabajo de 3.5 metros, Distancia focal de 6mm (33.49 mm equivalente FF) y Sensor de Cámara 6.17mm x 4.55mm. Altura de Cámara = 1500mm.

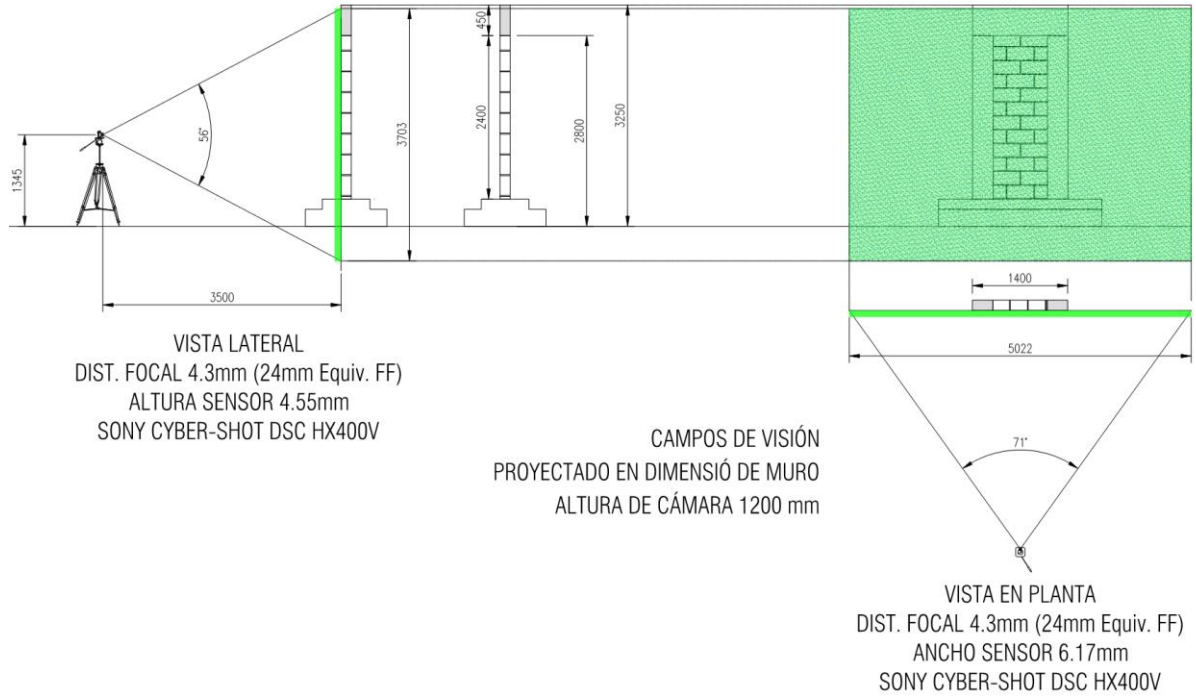


Imagen 40. Campo de Visión para una Distancia de Trabajo de 3.5 metros, Distancia focal de 4.3mm (24 mm equivalente FF) y Sensor de Cámara 6.17mm x 4.55mm. Altura de Cámara = 1345mm.

De las imágenes anteriores, queda demostrado que con la distancia de trabajo disponible en el laboratorio 3.5 m es posible darle una cobertura al muro; por tanto, el esquema que muestra la Imagen 40, constituye la propuesta de este trabajo como montaje del escenario. En la Tabla 5, se muestra el campo de visión obtenido.

Tabla 5. Campo de visión para una distancia de trabajo de 3.5 m, con una distancia focal de 4.3mm.

Distancia de trabajo (mm)	Campo de visión	
	Ancho (mm)	Alto (mm)
3500	5022	3703

5.2.5. Patrón de manchas.

5.2.5.1. Selección del patrón a utilizar.

Como se describe en el apartado 4.3.1.1, la superficie de la muestra debe cubrirse con un patrón de manchas, que actúa como portador de información de deformación, para adquirir una coincidencia confiable y precisa en el cálculo de correlación posterior. Además de su carácter indispensable en las mediciones DIC, los patrones de manchas también tienen una influencia importante en la exactitud y la precisión de la medición de desplazamientos de DIC.

Tomando en cuenta lo anterior, esta investigación calibró la muestra analizando la utilización de las dos siguientes opciones, con el fin de determinar la que mejor se adaptara a la prueba:

1. Aerógrafo y Rociado (“airbrushing and spraying”):

Uno de los métodos más comunes para la fabricación de patrones de mancha a macro escala. Consiste en usar una botella de rociador y tomar en cuenta que el diámetro de la boquilla, la distancia entre el sustrato y la boquilla, la presión del aire y la viscosidad de la solución (ver Imagen 41) son importantes, ya que pueden influir en la distribución del tamaño de la mancha y en la desviación estándar de la distribución del tamaño del patrón.

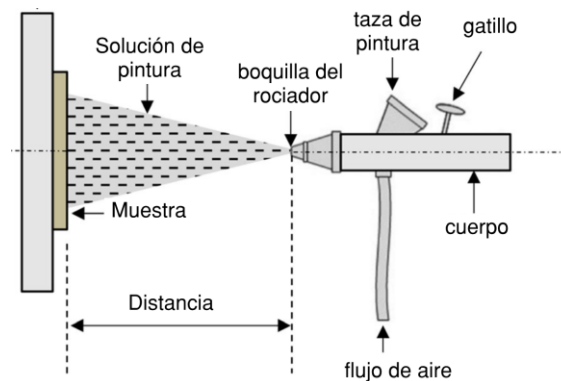


Imagen 41. Figura esquemática del método de fabricación de patrones de mancha por rociador (“spraying”) (Dong & Pan, 2017).

Para la utilización de esta opción, es necesario contar con un equipo especial de compresión de aire al cual se le debe adaptar una pistola de pintura y probar a diferentes presiones para generar un patrón de manchas que cumpla con los requerimientos propios de la técnica.

Sin embargo, en la elaboración de este trabajo, no fue posible contar con un equipo de este tipo en el laboratorio, adicionalmente que el costo de adquirirlo es alto en comparación con la segunda opción, por otro lado, según se menciona en el apartado 4.3.1.2, puede haber una gran cantidad de manchas de tamaño insuficiente entre las otras del tamaño correcto. Estas pequeñas manchas causarán problemas y pueden influir en el tamaño mínimo del subconjunto”. Y está comprobado que es, por lo general, la mayor dificultad al usar manchas pintadas con *spray* (Reu, 2015). Es muy difícil optimizar el aerosol para tener una estrecha distribución de las manchas con

tamaños muy grandes o pequeñas. Por estas razones, se procedió a valorar la opción de plantillas descrita en el siguiente punto.

2. Plantillas fabricadas de vinil autoadhesivo:

Esta opción consiste en utilizar una plantilla con puntos fabricados de manera aleatoria, con el tamaño exacto de la mancha (3-4 píxeles), de acuerdo con la distancia focal, tamaño del sensor y la distancia de trabajo. Según (Hosein Salmanpour & Mojsilović, 2016), este patrón es más sencillo de aplicar que el anterior y no es propenso al efecto alias, mencionado en el apartado 4.3.1.2

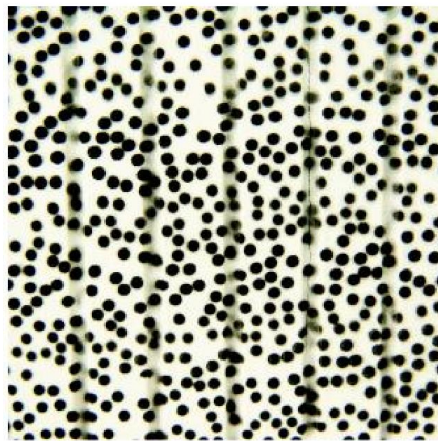


Imagen 42. Plantilla de vinil autoadhesivo.

Se debe considerar que, para mejorar el contraste, tal como se sugiere en (LePage, Shaw, & Daly, 2017), la secuencia óptima de pintura para los patrones de manchas DIC pintados, es una capa base de pintura blanca cubierta por manchas de pintura negra:

- Una capa base delgada de pintura blanca, aplicada solo lo suficiente para completar la cobertura de la superficie de la muestra.
- Cantidades aproximadamente iguales de cobertura para la capa base y las manchas (densidad de la mancha $p_s \approx 50\%$).
- Manchas de pintura negra con un tamaño uniforme de entre 3 a 5 píxeles para evitar el “alias” y lograr posiciones espaciales aleatorias para la singularidad del subconjunto.

Se procedió a analizar esta segunda opción y a realizar un experimento, el cual se describe a continuación:

Como cada mancha debe tener un tamaño ideal entre 3-4 píxeles para evitar el efecto alias, debe tenerse en cuenta que, para lograr este tamaño, el píxel al no tener una dimensión específica, este depende de la resolución de la cámara y el campo de visión. De esta manera, conociendo las dimensiones del campo de visión en milímetros y la resolución de la cámara en píxeles, es posible obtener la relación mm/píxel (factor M , ver apartado 4.2) y por ende conocer cuál debería ser el tamaño de la mancha o punto el cual sabemos que debe oscilar entre los 3 a 4 píxeles. Por ejemplo, para el campo de visión obtenido en la Tabla 5 (ancho 5022 mm x alto 3703 mm) con una resolución de cámara de 20 megapíxeles (ancho 5184 píxeles x alto 3888 píxeles), se tienen las siguientes relaciones por cada dimensión:

Relación de ancho (factor M horizontal)

$$= \frac{\text{ancho del campo de visión (mm)}}{\text{ancho de la resolución de cámara (píxeles)}} = \frac{5022\text{mm}}{5184\text{mm}} = 0.97 \frac{\text{mm}}{\text{píxel}}$$

Relación de alto (factor M vertical) = $\frac{\text{alto del campo de visión (mm)}}{\text{alto de la resolución de cámara (píxeles)}}$

$$= \frac{3703\text{mm}}{3888\text{mm}} = 0.95 \frac{\text{mm}}{\text{píxel}}$$

Con estas relaciones, se calcula entonces que 3 píxeles en ancho representan 3 píxel x 0.97mm/píxel = 2.91 mm y en alto representan 3 píxel x 0.95 mm/píxel = 2.86 mm; de la misma forma, 4 píxeles en ancho representan 3.90 mm y en alto 3.81 mm.

Se pueden entonces tabular para cada resolución posible de la cámara, los valores de ancho y alto para el campo de visión y la distancia focal definidas (ver Tabla 6).

Tabla 6. Tamaño promedio de los puntos del Patrón de Manchas, para una Distancia Focal de 4.3mm (24 mm equivalente FF), Distancia de Trabajo de 3500mm y Sensor de Cámara 6.17mm x 4.55mm.

Resolución (Megapíxeles)	Ancho (píxeles)	Factor M horizontal (mm/píxel)	3 píxeles (mm)	4 píxeles (mm)	Promedio (mm)	Alto (píxeles)	Factor M vertical (mm/píxel)	3 píxeles (mm)	4 píxeles (mm)	Promedio (mm)
20.2	5184	1.0	2.9	3.9	3	3888	1.0	2.9	3.81	3
17.9	5184	1.0	3	4	3	3456	1.1	3	4	4
15.1	5184	1.0	3	4	3	2920	1.3	4	5	4
15.1	3888	1.3	4	5	5	3888	1.0	3	4	3
12.4	11520	0.4	1	2	2	1080	3.4	10	14	12
10.0	3648	1.4	4	6	5	2736	1.4	4	5	5
9.4	4912	1.0	3	4	4	1920	1.9	6	8	7
8.9	3648	1.4	4	6	5	2432	1.5	5	6	5
7.7	7152	0.7	2	3	2	1080	3.4	10	14	12
7.5	3648	1.4	4	6	5	2056	1.8	5	7	6
7.5	2736	1.8	6	7	6	2736	1.4	4	5	5

Resolución (Megapíxeles)	Ancho (píxeles)	Factor M horizontal (mm/píxel)	3 píxeles (mm)	4 píxeles (mm)	Promedio (mm)	Alto (píxeles)	Factor M vertical (mm/píxel)	3 píxeles (mm)	4 píxeles (mm)	Promedio (mm)
5.0	2592	1.9	6	8	7	1944	1.9	6	8	7
4.5	2592	1.9	6	8	7	1728	2.1	6	9	8
3.7	1920	2.6	8	10	9	1920	1.9	6	8	7
1.0	920	5.5	16	22	19	1080	3.4	10	14	12

Con los tamaños tabulados, es posible definir cuál es la resolución que permitirá una mejor trabajabilidad al momento de fabricar el *stencil* o plantilla, dado que se debe considerar un tamaño de punto que sea posible de fabricar. En la Tabla 6, los tamaños promedio del punto aumentan conforme la resolución de cámara es menor, lo cual es esperable pues se reduce la cantidad de píxeles.

La resolución que mantiene el alto y ancho del punto muy similares, es la de 10 megapíxeles, la cual presenta un ancho y alto promedio de 5mm y un factor M en horizontal y vertical muy similar, por tanto, se define que esta será la resolución de trabajo con la cámara a utilizar con el fin de generar puntos de al menos 5 mm de diámetro.

Para el patrón de manchas, se elaboró un *stencil* o plantilla, con una mancha de tamaño promedio de 5 mm, así como las distancias entre ellas. Como punto fundamental de este patrón, aparte del tamaño del punto es que, como se indica en este mismo apartado, debe ser aleatorio sin una línea o tendencia marcada. Para lograrlo, se dibujó en computadora, el siguiente patrón (ver Imagen 43).

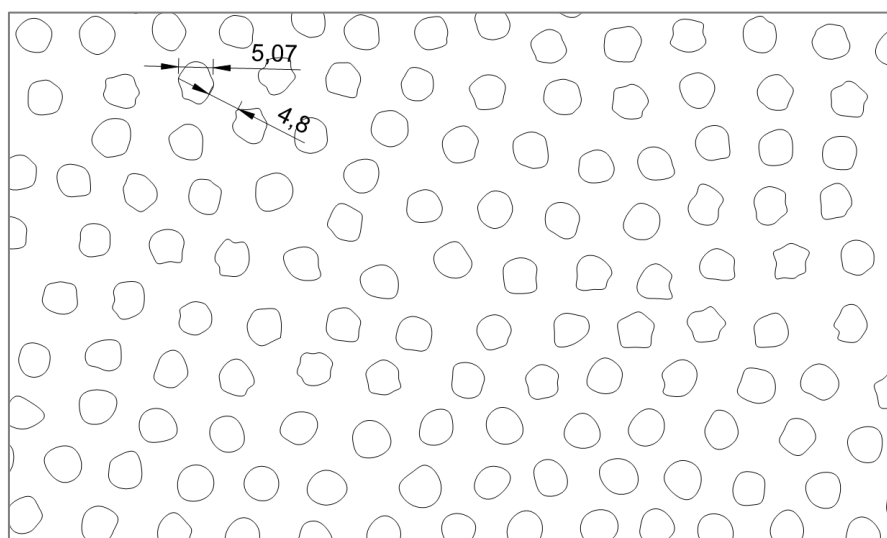


Imagen 43. Patrón de Manchas propuesto, para un tamaño de 5mm.

El patrón de la plantilla se fabricó de forma manual con el fin de cumplir con el principio de aleatoriedad con un patrón no periódico y la isotropía, de forma que no tuviera una direccionalidad sino posiciones espaciales aleatorias para la singularidad del subconjunto.

En este mismo apartado se indica que la secuencia óptima de pintura para los patrones de manchas DIC que se realizan de esta manera, es una capa base delgada de pintura blanca, aplicada solo lo suficiente para completar la cobertura de la superficie de la muestra, cubierta por manchas de pintura negra. Cantidades aproximadamente iguales de cobertura para la capa base y las manchas (densidad de la mancha $p_s \approx 50\%$) de pintura negra con un tamaño uniforme. Para esto se utilizó pintura acrílica en “spray” color blanco y color negro. En el siguiente apartado, se desarrollará su aplicación.

Otros elementos por considerar para el Patrón de Manchas (Reu, 2015)

Contraste (niveles de gris): El contraste se define como la diferencia en los valores grises entre las manchas oscuras y las brillantes. Existe un límite teórico para este valor, dado por la profundidad de bits de la cámara, pero también hay un límite práctico establecido por la iluminación y la calidad de la pintura.

Respecto al contraste, se debe evitar:

- Aumentar la ganancia de la cámara para mejorar el contraste: el aumento de la ganancia de la cámara aumenta el ruido; lo práctico es mejorar su iluminación en lugar de aumentar la ganancia.
- Saturar píxeles en una región de la imagen: es probablemente el error más fácil y peligroso de cometer y compromete los resultados más que tener un contraste ligeramente más bajo. Las regiones saturadas siempre tendrán resultados de baja calidad y es probable que la mayoría de los paquetes de software comerciales eliminen los datos por completo. Los destellos y los reflejos son otro tipo de saturación de píxeles y, a menudo, aparecen a medida que el objeto cambia de forma, incluso si no hay reflejos al comienzo de un experimento. También ocurren cuando la capa base de pintura es demasiado delgada o incompleta, y se mostrarán secciones muy pequeñas del material subyacente. Estos pequeños reflejos tienen dos problemas: en primer lugar, suelen estar saturados y, en segundo lugar, suelen tener un alias. Las pinturas brillantes también exacerban los problemas destacados y deben evitarse.

En conclusión, para cualquier Patrón de Manchas en el que se desea aumentar el contraste y reducir el ruido, la mejor manera de lograrlo es tener una buena pintura y una excelente iluminación. Esto se logra con la pintura (blanco y negro) y la iluminación utilizada que se describe en los siguientes apartados.

Nitidez del borde moteado (gradiente de contraste): Se busca en lo posible, obtener un borde “suave”. Se refiere específicamente al perfil de borde de las manchas en valores grises. Pueden existir manchas con bordes duros y suaves (ver Imagen 44), por lo general, se busca que el borde sea suave, dado que una mancha de este tipo tiene típicamente un par de píxeles de transición entre el blanco y las regiones negras. En cuanto a los bordes duros, el problema no está en la interpolación, sino en el muestreo del borde de las manchas por la cámara digital.

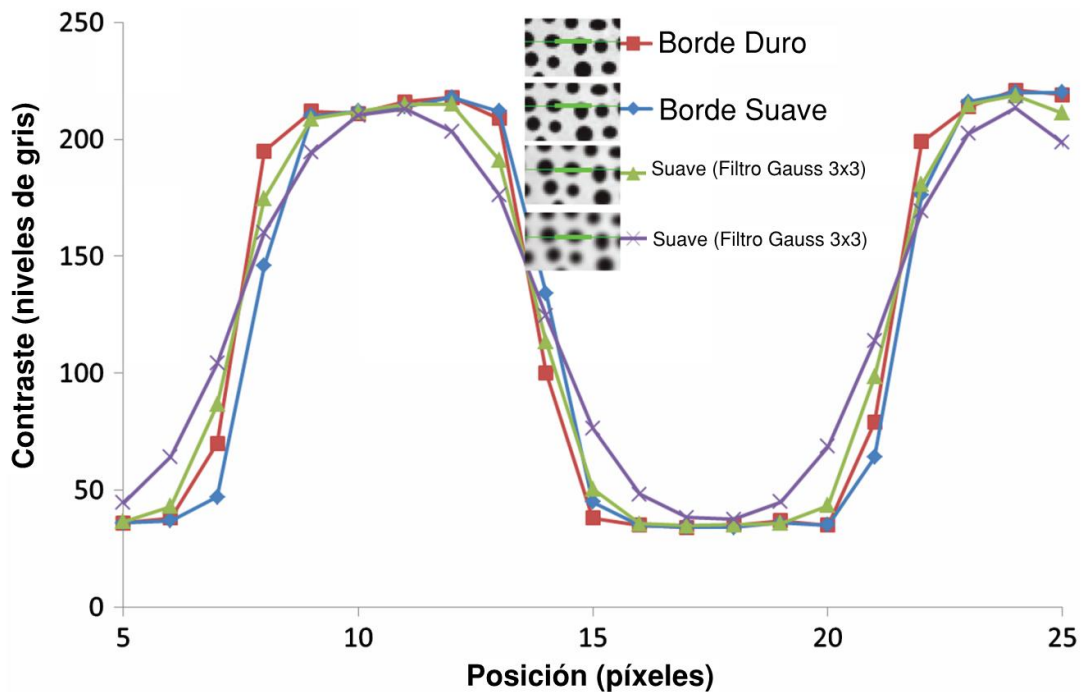


Imagen 44. Comparación de la nitidez de los bordes.

Densidad y distribución de manchas (cobertura): Lo ideal es tener áreas con manchas en blanco y negro del mismo tamaño. Con patrones impresos, esto se logra fácilmente (ver Imagen 43). Como ya se mencionó en la primera opción analizada, cuando se usan pinturas en aerosol u otras técnicas, esto es mucho más difícil. Un problema común con las pinturas en aerosol es el exceso de pulverización, donde una niebla fina

cubre un área que compromete el contraste y probablemente crea manchas propensas al efecto alias.

En el siguiente apartado se muestra la utilización de la plantilla obtenida.

5.2.5.2. Prueba experimental del Patrón de Manchas.

La prueba experimental consistió en dos procesos a saber, la corroboración de que la distancia de trabajo genera píxeles con los tamaños reales calculados en la Tabla 6 y la aplicación del patrón de manchas de previo en una superficie equivalente al muro con la plantilla.

Para la corroboración experimental de que la distancia de trabajo produciría imágenes con los tamaños calculados en la Tabla 6, se procedió a fabricar un patrón de manchas regulares de tamaños entre 1mm a 15mm en escala real (ver Imagen 45).

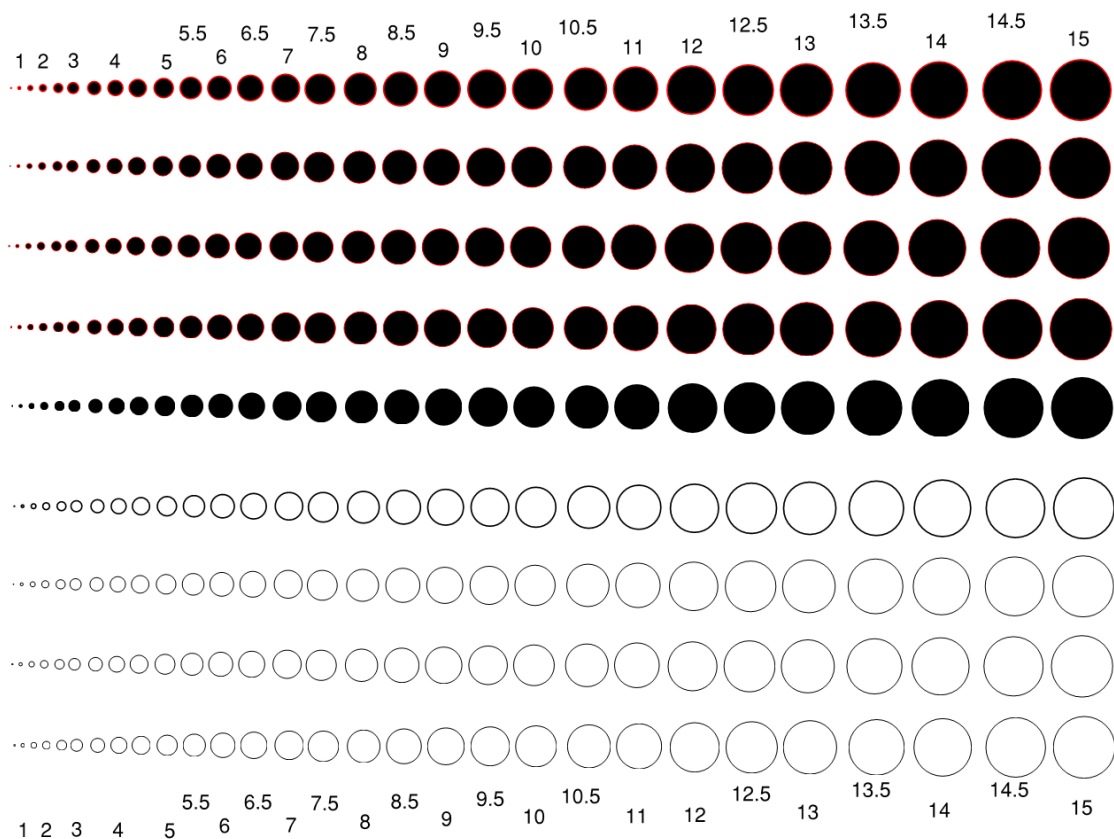


Imagen 45. Patrón de manchas regulares de 1mm a 15 mm de diámetro para imprimir en escala real.

El patrón anterior, fue impreso en Cartulina C12 de tamaño 304,8mm x 457,2mm (12 pulg x18 pulg) y llevado al laboratorio de forma previa y colocado en la cara del muro

(ver Imagen 46). Luego se colocó la cámara a una distancia de 3500 mm, ajustada a una distancia focal de 4.3mm, parámetros definidos en el apartado 5.2.4. Posteriormente, se ajustó la cámara para tomar fotografías con una resolución de 5, 10 y 20 megapíxeles.

La idea básica de realizar esta prueba consiste en utilizar diferentes tamaños de manchas para corroborar el cálculo que se realiza de los píxeles y así buscar un tamaño ideal para la mancha y una resolución de cámara que lo permita.



Imagen 46. Colocación del patrón regular experimental en la cara del muro.

Tomando la mancha o punto de 15 mm (como ejemplo) del patrón regular mostrado en la Imagen 45, para una fotografía tomada con una resolución de 5 megapíxeles y

según la Tabla 6, se tiene que dicho punto debe medir aproximadamente: $15 \text{ mm} / (1.9 \text{ mm/píxel}) = 7.74 \text{ píxeles}$ (ver Imagen 47).

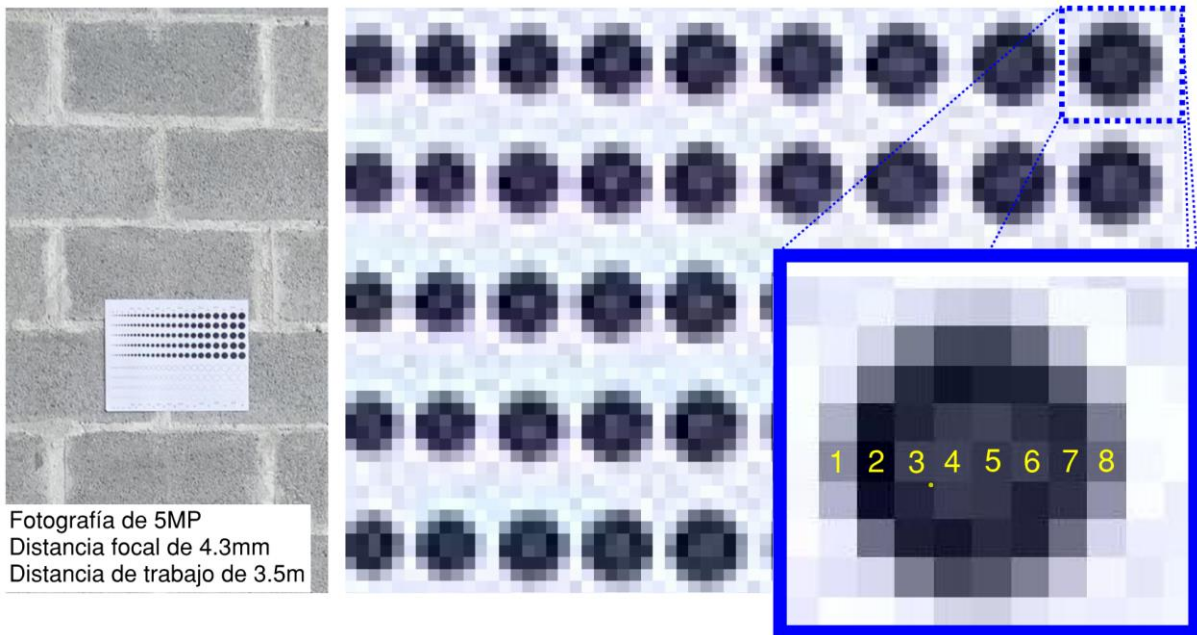


Imagen 47. Tamaño de punto de 15mm en fotografía de 5 megapíxeles, con una distancia focal de 4.3mm y una distancia de trabajo de 3.5mm ($15 \text{ mm} \approx 7.74 \text{ píxeles}$).

Se nota que efectivamente que el tamaño de 15 mm en realidad para dicha resolución corresponde entre 7 a 8 mm, obteniéndose bordes suaves que distinguen bien la mancha.

Para el caso de una resolución de 10 megapíxeles, el punto de 15mm debe medir en ancho aproximadamente: $15\text{mm} / (1.4 \text{ mm/píxel}) = 10.90 \text{ píxeles}$ (ver Imagen 48).

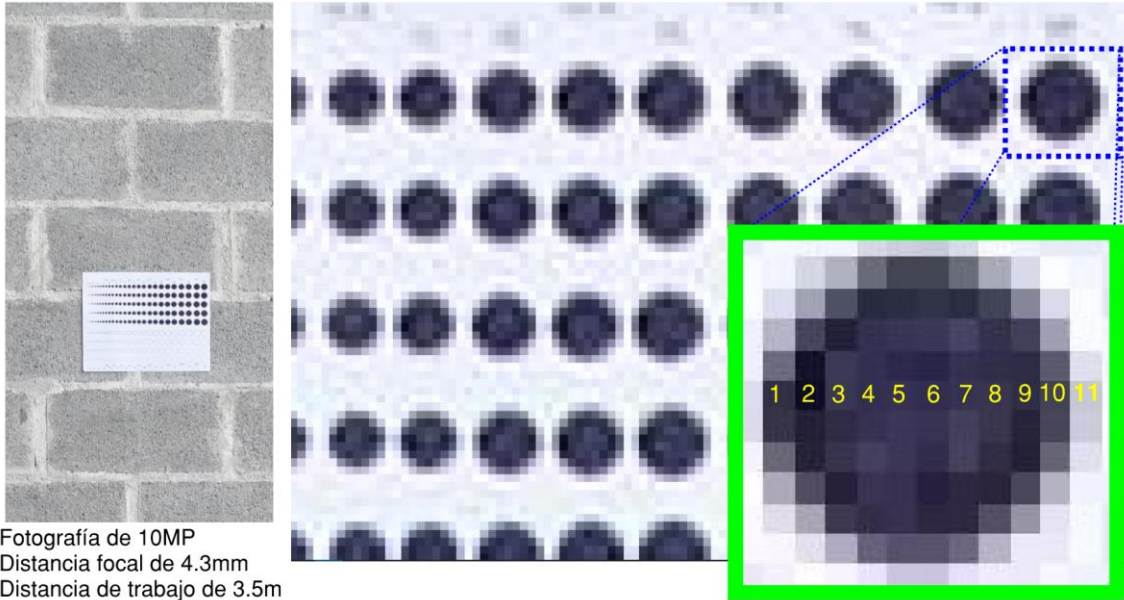


Imagen 48. Tamaño de punto de 15mm en fotografía de 10 megapíxeles, con una distancia focal de 4.3mm y una distancia de trabajo de 3.5mm (15 mm ≈ 10.90 píxeles).

De igual manera que el caso anterior, el tamaño de 15 mm para la resolución de 10 megapíxeles, corresponde entre 10 y 11 mm, obteniéndose bordes suaves que distinguen bien la mancha.

Para el caso de una resolución de 20 megapíxeles, el punto de 15mm debe medir en ancho aproximadamente: $15\text{mm} / (0.97 \text{ mm/píxel}) = 15.48 \text{ píxeles}$ (ver Imagen 49).

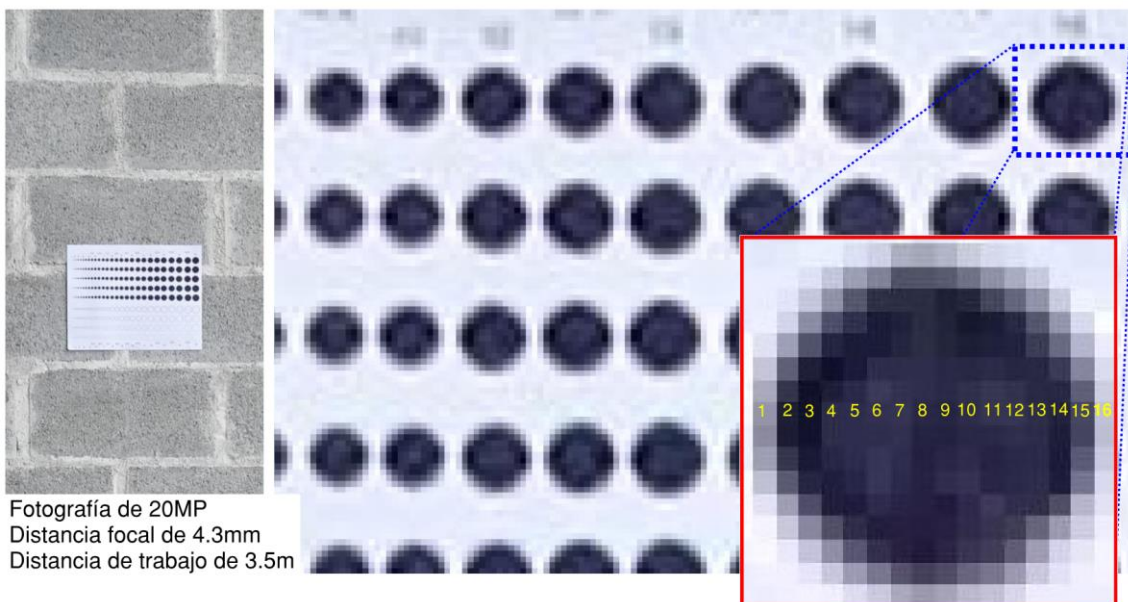


Imagen 49. Tamaño de punto de 15mm en fotografía de 20 megapíxeles, con una distancia focal de 4.3mm y una distancia de trabajo de 3.5mm (15 mm ≈ 15.48 píxeles).

Así mismo, el tamaño de 15 mm para la resolución de 20 megapíxeles corresponde entre 15 y 16 mm tal como fue calculado. De esta manera, se determina que el cálculo mostrado en la Tabla 6 es correcto y adicionalmente que el registro fotográfico logra captar de manera correcta el píxelaje solicitado.

Para realizar la prueba experimental de la aplicación del patrón de manchas, se procedió a fabricar una muestra en dos tipos de materiales, lámina de acrílico transparente y lámina de vinil autoadhesivo. Así mismo, se utilizó un bloque de mampostería clase A y pintura acrílica en *spray*, colores blanco y negro tipo mate, ambas.

Cabe recalcar que, para la fabricación de las plantillas, se exportó el patrón en formato digital al tamaño comercial de las láminas de vinil y de acrílico. Estos archivos se imprimieron con la ayuda de un plotter de corte o cortadora de vinilo, que se utiliza para la fabricación de calcomanías autoadhesivas.

Materiales: Lámina de vinil autoadhesivo perforada, lámina acrílica perforada, bloque de mampostería clase A y pintura en *spray* acrílica mate color negro y blanco

Procedimiento: Se aplicó la base de pintura blanca mate sobre la superficie del bloque y se esperó un tiempo de 25 minutos para secado. Luego se realizó una división central para separar los dos tipos de láminas. Así mismo, sobre la base de pintura blanca ya colocada, se les adhirió las láminas. Una vez colocadas, se pintó con pintura negra mate y se esperaron de nuevo 25 minutos para secado (tiempo sugerido por el fabricante de la pintura). De esta forma, se obtuvo de forma experimental, el patrón de manchas en una condición similar a la del muro (bloque de mampostería sin acabados).

En la Imagen 50, se ilustra el procedimiento paso a paso, llevado a cabo para la plantilla de vinil autoadhesivo.



Imagen 50. Procedimiento experimental para la plantilla o stencil fabricada en vinil autoadhesivo.

De igual manera en la Imagen 51, se presenta el procedimiento llevado a cabo para la plantilla de acrílico transparente.



Imagen 51. Procedimiento experimental para la plantilla o stencil fabricada lámina acrílica transparente.

De esta manera, se define que cualquiera de las plantillas, el patrón generado cumple con lo esperado y es posible llevarlo a cabo en el laboratorio. Sin embargo, se decide

utilizar el vinil autoadhesivo, dado que se logra una mejor adherencia entre el elemento y la superficie de concreto del mampuesto.

5.2.5.3. Aplicación a la muestra.

Continuando con el proceso, una vez definido como será fabricado el patrón de manchas, se procedió mediante el software computacional a ajustar el tamaño de este con las dimensiones reales del muro, de manera que se lograra una cobertura completa de la superficie de la mampostería. En la Imagen 52, se determina gráficamente que las dimensiones de la plantilla deben ser de 1200 mm x 2500mm, de forma que puedan colocarse al menos en dos secciones de 600mm x 2500mm.

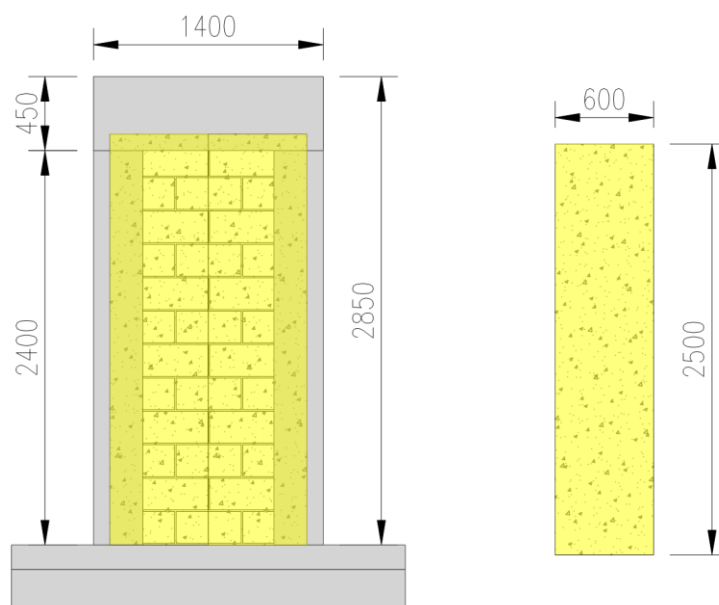


Imagen 52. Dimensiones de la plantilla o stencil de vinil autoadhesivo (600mmx 2500mm).

Una vez en el laboratorio, se procedió a la limpieza del muro y la aplicación de la pintura base color blanco (ver Imagen 53).



Imagen 53. Limpieza del muro y aplicación de la pintura base color blanco.

Luego de aplicar la pintura base blanca y darle un respectivo tiempo de secado de al menos 30 min, se procedió a colocar la plantilla o *stencil* cuidadosamente. Propiamente en el laboratorio y por un tema de flexibilidad del vinil, se definió colocar esta plantilla en secciones más pequeñas que las definidas, pero logrando el mismo resultado (ver Imagen 54).



Imagen 54. Colocación de la plantilla o stencil en secciones a la superficie del muro.

El paso siguiente consistió en la aplicación de la pintura de color negro sobre la plantilla de manera uniforme para darle el acabado de contraste que requiere la técnica. De igual manera se dio un tiempo de secado de aproximadamente 30 min para luego retirar la plantilla y obtener el patrón de manchas completo impregnado sobre la superficie (ver Imagen 55).



Imagen 55. Aplicación de pintura de color negro y acabado del patrón de manchas.

Finalmente, se procedió con la verificación del tamaño de las manchas y el acabado, el cual cumplió con todo lo esperado por la técnica DIC dado que se obtuvo un patrón de manchas contrastante, con un tamaño de mancha adecuado (3-4 píxeles) para la resolución elegida, isotrópico, aleatorio, con nitidez y cobertura (ver Imagen 56).

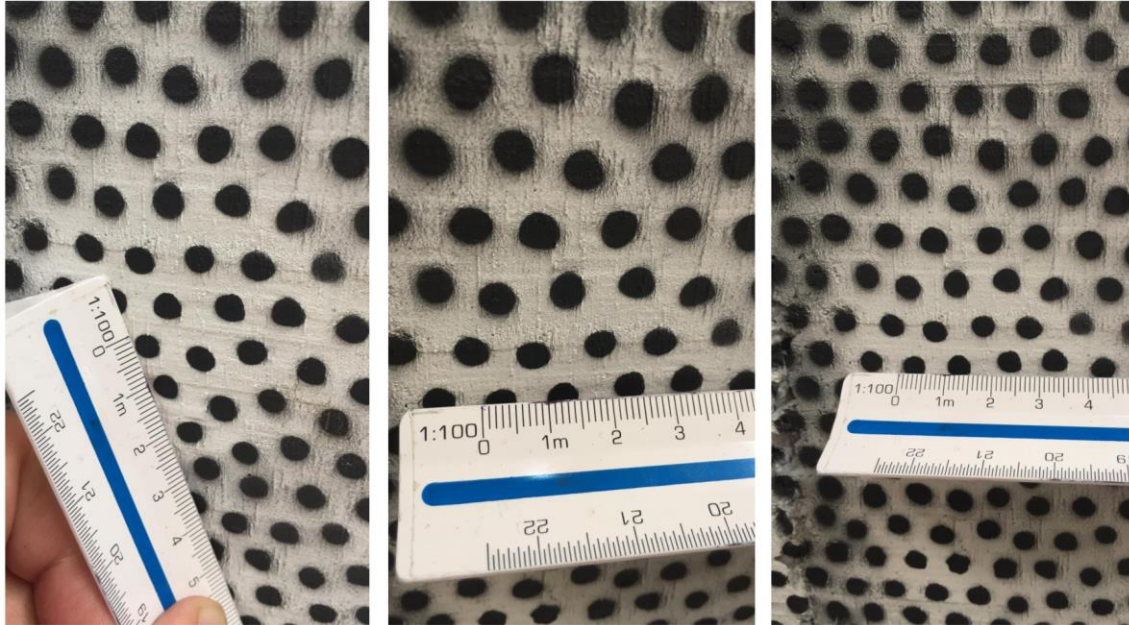


Imagen 56. Acabado del patrón de manchas impregnado en la superficie. Cumple con elementos como tamaño de mancha, isotropía, aleatoriedad, nitidez y cobertura.

5.3. Registro de imágenes.

5.3.1. Protocolo de carga.

El montaje anterior, se preparó para someter el muro a la prueba de carga tipo B (norma ASTM E2126-19, ver Tabla 7), la cual define un total de 26 ciclos de carga aplicado en 12 pasos, con tasas de aplicación (velocidad de carga) de 1, 2 y 4 mm/s con un rango de frecuencias entre 0.2 Hz y 0.5 Hz. Para realizar la prueba en el laboratorio, se facilitó un protocolo de carga (**Anexo 1**) que resume lo indicado en la norma en mención, con el fin de que los técnicos llevaran a cabo la falla de manera correcta.

Tabla 7. Método de prueba B. Amplitudes de los ciclos invertidos (según norma E2126-19).

Patrón	Paso	Número de ciclos	Amplitud, % Δ_m	Δ_m (mm)	Δ_m , positivo (mm)	Δ_m , punto de inicio (mm)	Δ_m , negativo (mm)	Velocidad (mm/s)
1	1	1	1.25	1.1700	0.59	0	-0.59	1.00
	2	1	2.5	2.3400	1.17	0	-1.17	1.00
	3	1	5	4.6800	2.34	0	-2.34	1.00
	4	1	7.5	7.0200	3.51	0	-3.51	1.00
	5	1	10	9.3600	4.68	0	-4.68	1.00
2	6	3	20	18.7200	9.36	0	-9.36	1.00
	7	3	40	37.4400	18.72	0	-18.72	2.00
	8	3	60	56.1600	28.08	0	-28.08	2.00

Patrón	Paso	Número de ciclos	Amplitud, % Δ_m	Δ_m (mm)	Δ_m , positivo (mm)	Δ_m , punto de inicio (mm)	Δ_m , negativo (mm)	Velocidad (mm/s)
	9	3	80	74.8800	37.44	0	-37.44	2.00
	10	3	100	93.6000	46.80	0	-46.80	4.00
	11	3	120	112.3200	56.16	0	-56.16	4.00
	12	3	140	131.0400	65.52	0	-65.52	4.00

Es importante mencionar que, el dato de desplazamiento último Δ_m fue obtenido mediante cálculo y luego ajustado por el registro de datos del Lanamme-UCR después de múltiples fallas de muros en MCR. Este dato también se puede obtener de realizar pruebas monótonas realizadas a especímenes de MCR de acuerdo con el método de prueba D de la norma ASTM E2126-19 (ASTM International, 2019).

Los datos de desplazamiento y deformación obtenidos de la instrumentación por el sometimiento del muro a carga lateral más adelante serán utilizados para compararlos con los datos obtenidos mediante la técnica de correlación digital de imágenes, la cual permite también obtener estos valores.

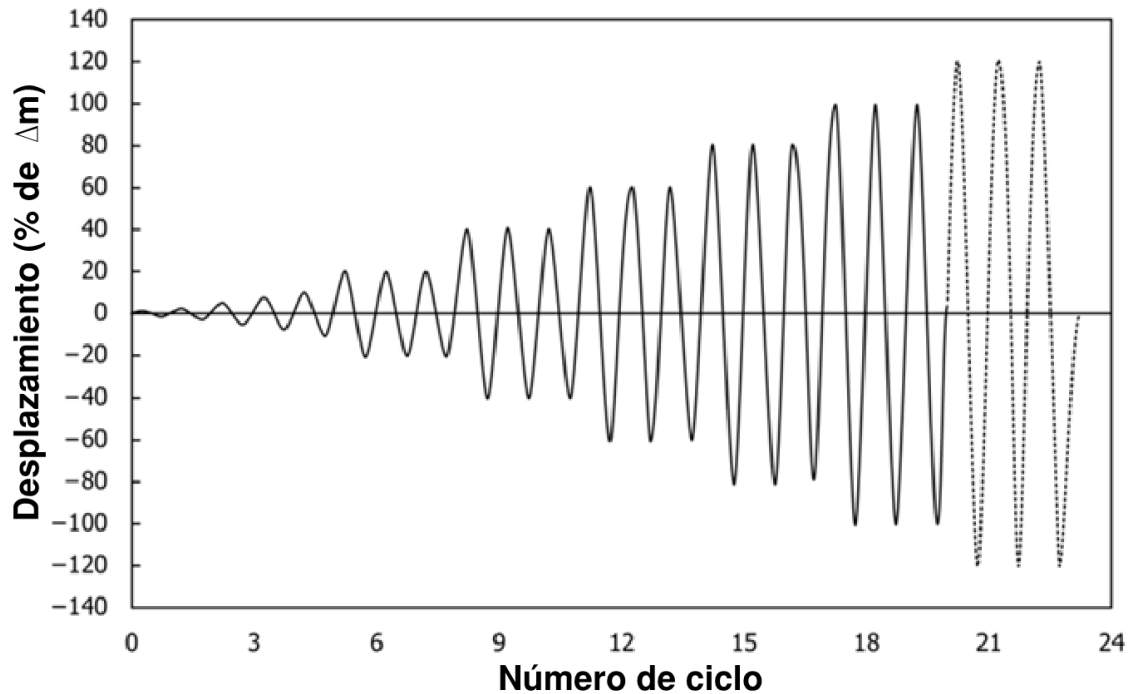


Imagen 57. Desplazamiento cíclico (Método de prueba B. Amplitudes de los Ciclos Invertidos). ASTM E2126-19.

5.3.2. Cargas en la estructura.

Durante la prueba, se pretende que las mediciones incluyan todas las fuerzas aplicadas junto con una imagen general y local del estado de deformación de la muestra, para lograr esto, se utilizarán los datos obtenidos mediante la Instrumentación y definición de parámetros de carga según se menciona en el apartado 5.1.2.

Así, con el fin de investigar la capacidad de desplazamiento del muro, este se verá sometido a una prueba cíclica-quasi-estática, además se documentarán la longitud, altura y espesor del muro, así como el esfuerzo de precompresión aplicado (σ_0), la resistencia promedio a la compresión de la mampostería (f'_m) y la fuerza de precompresión aplicada (V). Hay que tomar en cuenta que, para esta prueba, el paño de mampostería ha sido construido por mano de obra experimentada y como se indicó en el apartado 5.1.2, el muro ha estado almacenado en el laboratorio al menos 28 días antes de realizar la prueba, por lo que se esperan resultados acordes con la realidad.

Cada uno de los pasos se repetirá en forma de onda sinusoidal. La velocidad de carga se determinará de acuerdo con los objetivos de desplazamiento. Finalmente se pretende obtener los historiales de carga.

5.3.3. Adquisición de imágenes e intervalo de tiempo.

Se tomaron fotografías en la mayor secuencia posible, de manera que se obtuvo la mayor información de todo el proceso de falla con el equipo fotográfico montado sobre un pedestal.

Se lograron adquirir un total de 829 fotografías de todo el proceso de falla, de las cuales se seleccionaron 700 imágenes que son las que contienen el proceso sin intervenciones por parte de los técnicos o paradas intermedias de los ciclos de carga, así mismo se descartaron fotografías capturadas más allá de la falla que no aportaban a la investigación por los desprendimientos de material.

Este proceso se realizó de forma manual, dado que el equipo utilizado para toma de fotografías (apartado 5.2.3) no contaba con una forma automática para la toma de estas, por lo que tomando en cuenta todas las imágenes capturadas y la información de tiempo de cada archivo, se obtiene que el disparador de la cámara se activó en un intervalo promedio de $\Delta_t \approx 1.99$ segundos.

5.4. Procesamiento de las imágenes adquiridas.

5.4.1. Programa (software) utilizado.

El software utilizado en este proyecto corresponde a Matlab, creado por MathWorks; cuyo lenguaje de cálculo técnico desarrollado, es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, visualización y cálculo numérico.

Para llevar a cabo el procesamiento de imágenes con la técnica del DIC se emplearon dos códigos gratuitos para Matlab; el primero (**Anexo 2**), que no tiene un nombre definido pero que en adelante se denominará **Código A**, fue desarrollado en la Universidad de Johns Hopkins por Rob Thompson, Daniel Gianola y Chris Eberl (Eberl, 2021) y el segundo (**Anexo 3**), denominado **Código B**, corresponde al código de fuente abierta conocido como Ncorr, el cual fue desarrollado por el ingeniero Justin Blaber durante la finalización de su maestría en el laboratorio del doctor Antoniou en el Instituto de Tecnología de Georgia (Blaber, 2021).

5.4.2. Duración para procesamiento de las imágenes.

Respecto al tiempo empleado en esta investigación procesar las imágenes y obtener resultados es importante tomar en consideración que esto depende del equipo computacional que posea el investigador y el software con el que lo analice, así mismo la cantidad de imágenes y puntos a rastrear. El desarrollador del Código A indica que el proceso puede demorar entre segundos o hasta días.

Para esta investigación se contó con un procesador 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1165G7 @ 2.80GHz 1.69 GHz con 16.0 GB de RAM y para el procesamiento de 829 imágenes, entre la definición de parámetros, conversión de imágenes, etiquetado y corrida del software y tomando en cuenta que, de acuerdo con la resolución utilizada, la cantidad de píxeles por imagen que debe analizar el software es de aproximadamente 2 millones, tardó alrededor de 2.5 horas para un análisis completo del muro. Debe tomarse en cuenta que el proceso requiere de varias corridas y algunas sobre zonas específicas que alargan el proceso y lo hacen dependiente de los resultados que se estén buscando.

6. Resultados

6.1. Campos de desplazamiento.

Una vez que se llevó a cabo la prueba de carga en el laboratorio siguiendo el protocolo de carga establecido (ver apartado 5.3.1), se obtuvieron los resultados a través de los LVDT, los cuales se muestran a continuación. Estos datos se encuentran de forma completa en el **Anexo 4**.

Cabe aclarar que la colocación de los LVDT fue llevada a cabo por los técnicos del laboratorio, quienes cuentan con una amplia experiencia en el manejo de estos equipos. No obstante, siempre existen algunos factores que pueden provocar errores en la medición y para este proyecto no ha sido la excepción. Los resultados obtenidos por medio de esta instrumentación se vieron afectados, aunque en menor medida, por algunos factores externos como ajustes durante la prueba en los instrumentos y en los pernos. Aun así, la mayoría de los datos de desplazamiento que se lograron obtener, se tomaron como los parámetros base para la comparación de la técnica de correlación digital de imágenes con el método convencional.

6.1.1. Desplazamientos obtenidos de los LVDT.

Estos datos registran el tiempo y los intervalos de ejecución en segundos, para cada una de las mediciones, de igual forma también se cuenta con el registro de la fuerza aplicada a través del pistón hidráulico en kN, el desplazamiento generado por este y por cada uno de los LVDT en milímetros (ver Imagen 29).

La Tabla 8 muestra las mediciones de la fuerza máxima y mínima en kN para cada ciclo de carga y de los desplazamientos máximos y mínimos en milímetros, de igual forma para cada ciclo de carga. La Tabla 9, resume los resultados de la prueba, donde $H_{\max, p}$ y $H_{\max, n}$ son las fuerzas de cortante máximas al empujar y tirar, y $d_{H_{\max, p}}$ y $d_{H_{\max, n}}$ son los valores de desplazamiento correspondientes. Además, d_{\max} es el desplazamiento máximo obtenido durante la prueba. Todos los parámetros de desplazamiento se informan en términos de deriva, es decir, los valores de desplazamiento están normalizados por la altura de la muestra, $h_w = 2850$ mm (ver apartado 5.1.1 Diseño.).

Tabla 8. Mediciones de la fuerza y desplazamientos máximos y mínimos para cada ciclo.

Ciclo	Fuerza máxima obtenida en cada ciclo (kN)	Desplazamiento máximo obtenido en el ciclo (mm)	Fuerza mínima obtenida en cada ciclo (kN)	Desplazamiento mínimo obtenido en el ciclo (mm)
1	15.53	0.55	-9.80	-0.55
2	25.09	1.17	-19.24	-1.18
3	40.96	2.37	-31.84	-2.38
4	50.66	3.55	-42.10	-3.55
5	54.18	4.73	-45.68	-4.72
6	66.69	9.40	-67.11	-9.40
7	64.62	9.40	-64.40	-9.40
8	62.90	9.40	-62.99	-9.40
9	113.49	18.81	-113.40	-18.81
10	108.30	18.79	-108.21	-18.80
11	104.85	18.77	-105.22	-18.80
12	154.32	28.15	-147.36	-28.17
13	146.61	28.15	-137.80	-28.16
14	141.96	28.16	-133.10	-28.16
15	200.64	37.52	-187.79	-37.53
16	191.06	37.52	-176.37	-37.52
17	191.65	37.52	-180.63	-37.53
18	220.15	46.97	-211.35	-46.96
19	209.18	46.94	-200.44	-46.95
20	201.57	46.95	-189.46	-46.96
21	218.38	56.30	-241.33	-56.34
22	190.37	56.29	-230.06	-56.32
23	179.43	56.31	-221.86	-56.30
24	188.19	65.67	-239.34	-65.68
25	159.45	65.71	-193.23	-65.67
26	17.84	2.77	0.05	-26.05
Valor máximo o mínimo	220.15	65.71	-241.33	-65.68

Tabla 9. Resumen de los datos.

$h_w = 2850 \text{ mm}$

$H_{m\acute{a}x_p}$ [kN]	$d_{Hm\acute{a}x_p}$ [mm]	$d_{Hm\acute{a}x_p}/h_w$ [%]	$H_{m\acute{a}x_n}$ [kN]	$d_{Hm\acute{a}x_n}$ [mm]	$d_{Hm\acute{a}x_n}/h_w$ [%]	$d_{m\acute{a}x}$ [mm]	$d_{m\acute{a}x}/h_w$ [%]
220.15	46.97	1.65%	-241.33	-56.34	1.98%	65.71	2.31%

De la memoria de cálculo (**Anexo 5**), se obtiene que la capacidad nominal del muro en flexión es de 18.57 toneladas. Del resultado experimental, se tiene que capacidad máxima experimental fue de 241.33 kN [24.61 toneladas], obteniendo un 32.5% de capacidad adicional en comparación con la nominal, lo cual es aceptable.

Adicionalmente, en el protocolo de carga también se estimó que el desplazamiento asociado a la carga máxima esperada era de 52 mm y el desplazamiento último esperado de 93 mm. Experimentalmente se registró que para la capacidad máxima se tiene un desplazamiento de 65.68 mm, cuyo valor se encuentra entre los dos valores esperados.

6.1.1.1. Desplazamientos verticales en LVDT 1.

El LVDT 1, registra los desplazamientos verticales al costado derecho del muro a 40 cm por encima del cimiento (ver Imagen 29).

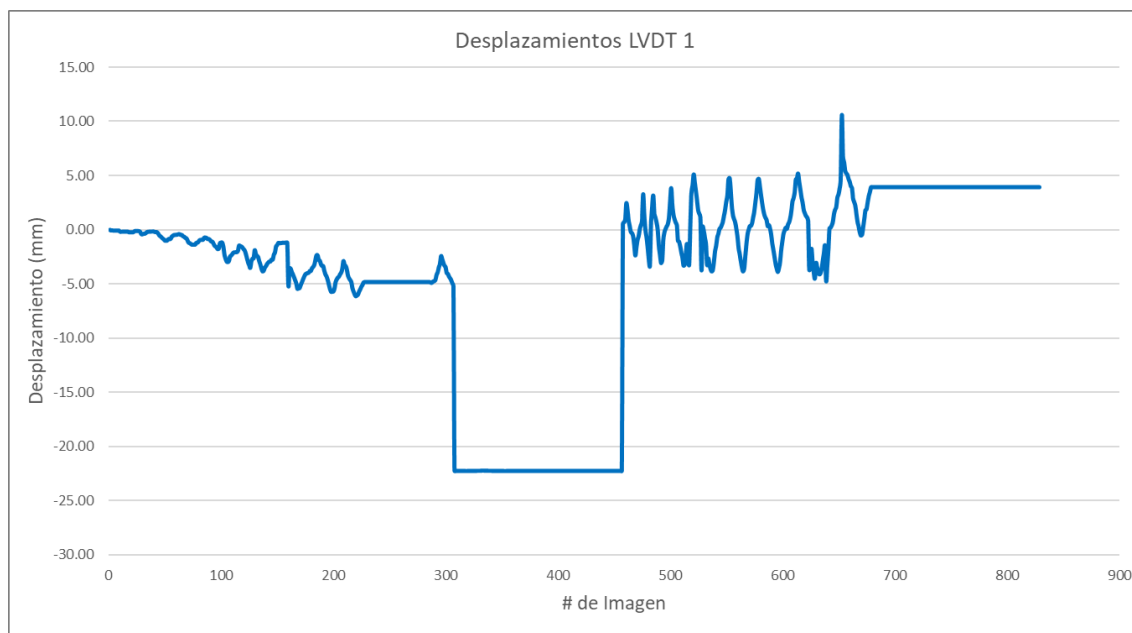


Gráfico 1. Gráfico # de imagen vs desplazamiento vertical (mm) obtenidos del LVDT 1. Lanamme-UCR.

El Gráfico 1, muestra los datos obtenidos para el LVDT 1 como una curva # de imagen vs desplazamiento vertical (mm). Se debe resaltar que en el intervalo que va desde la imagen 308 hasta la 457, se registra una medición constante de desplazamiento cercano a los -22.30 mm, lo cual podría deberse a algún error en la instrumentación,

una afectación por la aplicación de una fuerza externa e incluso a un detenimiento de la prueba para realizar ajustes.

En revisión realizada a las fotografías durante el proceso de falla del muro, se evidencia que el LVDT fue ajustado durante el proceso, debido probablemente a una descalibración específica del instrumento. Lo anterior constituye una fuente de error que justifica la diferencia de registro encontrada en los datos (ver Imagen 58).



Imagen 58. Ajuste del transformador diferencial de variación lineal 1 (LVDT 1), debido a una posible descalibración del instrumento.

Por otro lado, si graficamos la señal del pistón sobre la señal del LVDT (ver Gráfico 2), se evidencia claramente que la prueba se pausó, para realizar los ajustes indicados.

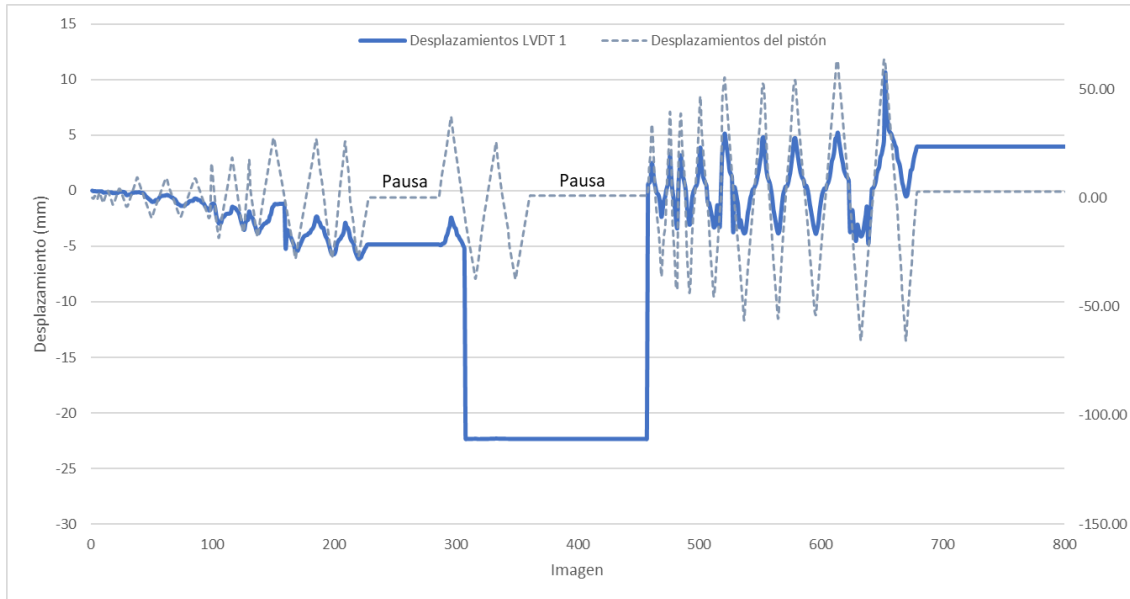


Gráfico 2. Gráfico de los desplazamientos obtenidos por el LVDT 1 versus los desplazamientos obtenidos por el pistón. Lanamme-UCR

Adicionalmente, los valores de desplazamientos máximos y mínimos se pueden observar en diferentes franjas de valores entre los 0 y -6 mm, una segunda franja que muestra el error mencionado para un desplazamiento de -22.30 mm, posteriormente los datos se estabilizan en un rango entre -3.8 mm y 4.8 mm para dar paso a un último rango de valores con el desplazamiento máximo de 10.61 mm.

La discrepancia de los desplazamientos no cumple con lo esperado según la metodología de prueba de carga tipo B con la norma ASTM E2126-19 (ver Imagen 57), por lo que estos resultados no serán tomados en cuenta en la comparación del método. Aunque es posible eliminar estos datos en un remuestreo, con el fin de mostrar una coherencia en la prueba con los distintos ciclos de carga, esto no se realizará, dado que el fin es verificar los resultados del DIC comparando todos los desplazamientos obtenidos por la instrumentación y la metodología en mención en un mismo intervalo de tiempo. Además, como parámetro de comparación, resulta interesante ver como el DIC registró los datos en el tiempo en que la instrumentación fue ajustada, debería asemejarse al patrón obtenido por el pistón.

Para estos mismos datos, en el Gráfico 3 se muestra la curva de histéresis respectiva, la cual grafica los desplazamientos (mm) vs la carga aplicada (kN).

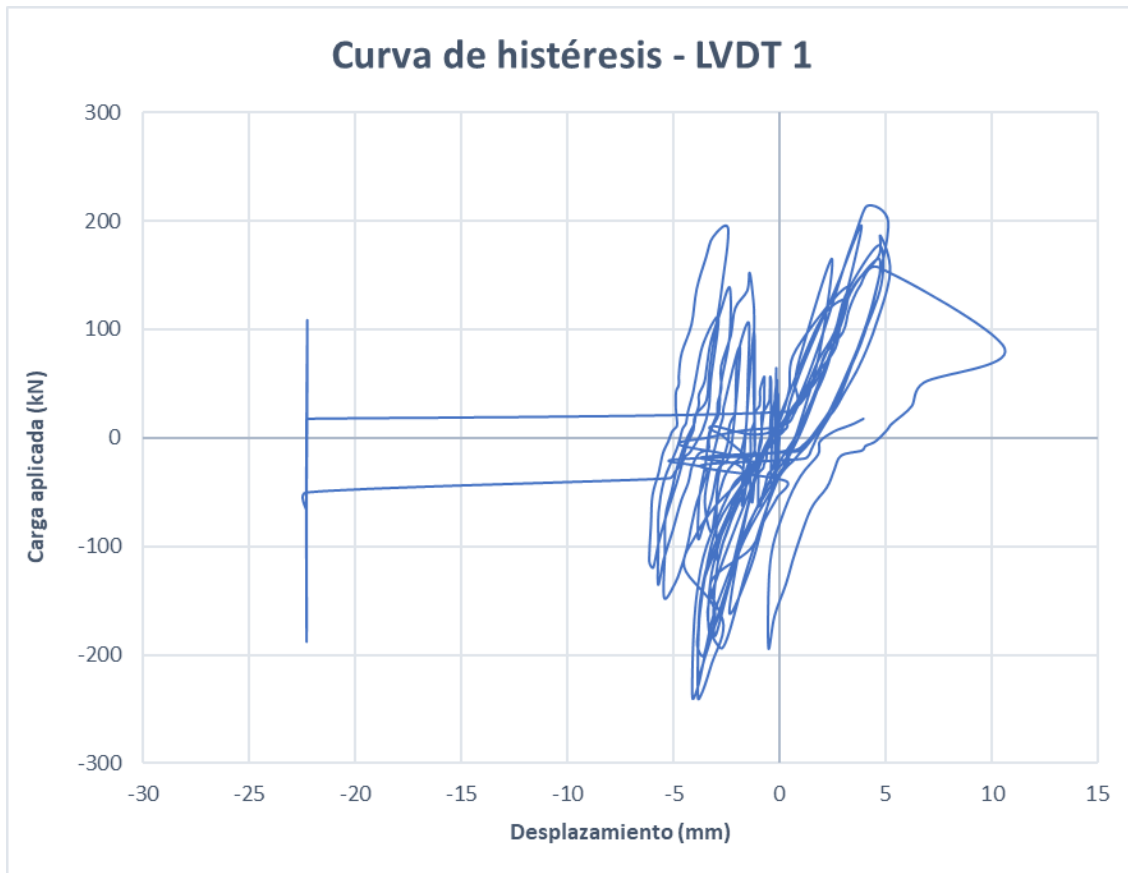


Gráfico 3. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del LVDT 1. Lanamme-UCR.

El gráfico anterior, también refleja el desplazamiento atípico de 22.30 mm mencionado, el cual es producto del ajuste realizado al LVDT en el momento de la falla.

6.1.1.1. Desplazamientos horizontales en LVDT 2.

El Gráfico 4 muestra los datos obtenidos para el LVDT 2 como una curva # Imagen versus desplazamiento horizontal (mm). Este instrumento registró los desplazamientos horizontales en la ubicación a nivel del cimiento, al costado derecho del muro.

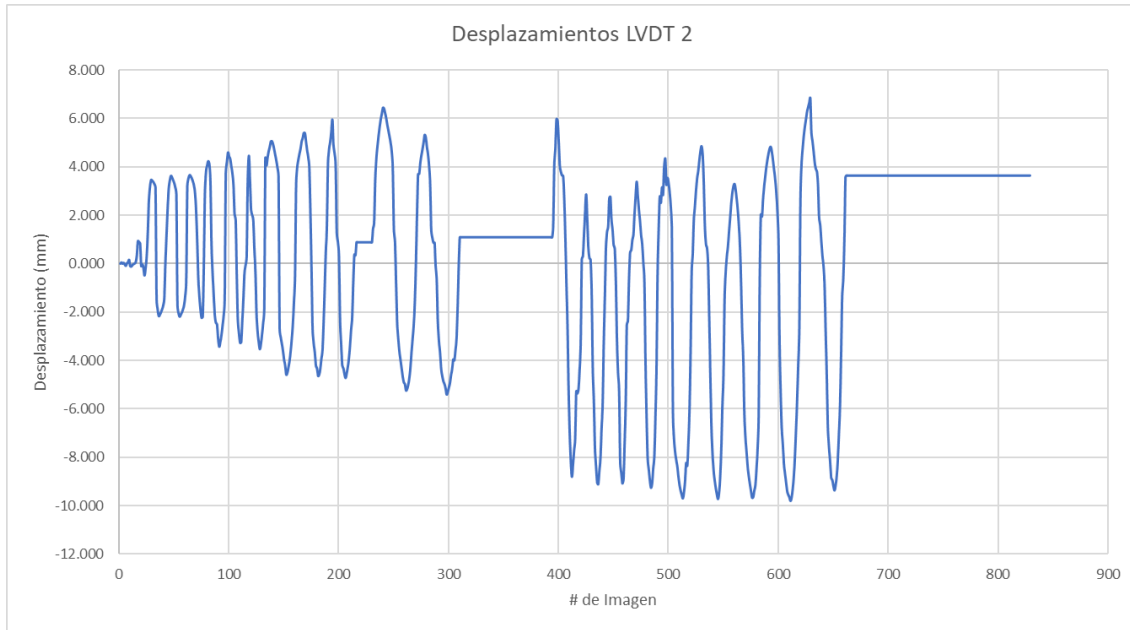


Gráfico 4. Gráfico tiempo (s) vs desplazamiento horizontal (mm) obtenidos del LVDT 2. Lanamme-UCR.

En este gráfico es de notar que, aproximadamente después de la imagen 313 aproximadamente, el patrón de desplazamiento que se mantenía en una franja entre los -5.1 mm y 6.3 mm, cambia y mantiene una zona constante; luego se empiezan a obtener datos con desplazamientos más grandes con datos que oscilan entre los -9.7 mm y 4.7 mm, para finalmente llegar a los desplazamientos mínimo y máximo de -9,81 mm y 6.93 mm aproximadamente. Esto es de esperar según la Imagen 57, dado que la carga va aumentando con respecto a los ciclos. De igual manera, en este gráfico se reflejan las pausas que se suscitaron en la prueba, con la diferencia de que no ocurre una lectura errónea de desplazamientos constantes, aunque si se da un efecto de cambio en el patrón, el cuál puede visualizarse mejor si se analiza graficando los ciclos de carga, como se verá a continuación. En el Gráfico 5 se muestran los desplazamientos máximos y mínimos por ciclo obtenidos para el LVDT en mención.

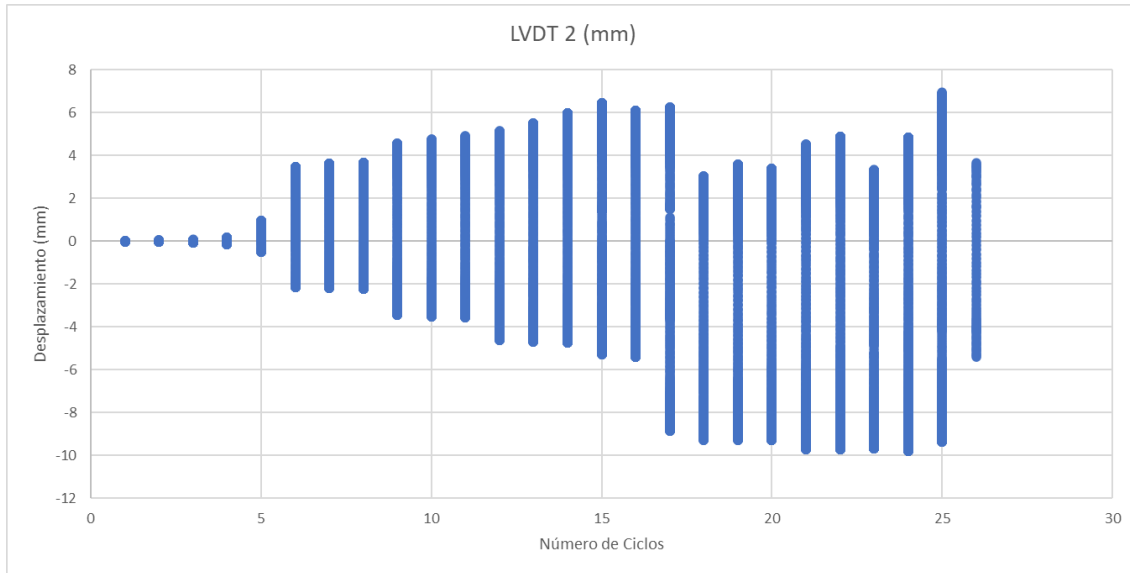


Gráfico 5. Desplazamiento (mm) vs número de ciclos obtenido del LVDT 2.

Del gráfico anterior, se determina que el cambio mencionado ocurre a partir del ciclo 17 (aunque también se notan los cambios en los demás ciclos), no obstante, los cambios bruscos de datos también pueden tener otra fuente de error y deberse a efectos de una deformación en la cimentación o desplazamientos más grandes por desajuste en los pernos que anclan el muro al piso fuerte. Por un lado, desde el punto de vista de rigidez, la probabilidad de que ocurra una deformación en el cimiento antes que el muro, es muy baja por lo que es muy posible que se deba a que se suscitó un cambio en la condición de anclaje del muro al piso fuerte que alteró la medición de datos, tal como se registró durante el proceso de falla del muro, dado que los operadores tuvieron que ajustar los pernos (ver Imagen 59), lo que podría ser fuente de error que incidió en la toma de las mediciones de desplazamientos.



Imagen 59. Ajustes realizados a los pernos que anclan el muro al piso fuerte, suscitados durante la falla. Lanamme-UCR.

De igual forma, se cuenta con la curva de histéresis que muestra los datos de desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN). Ver

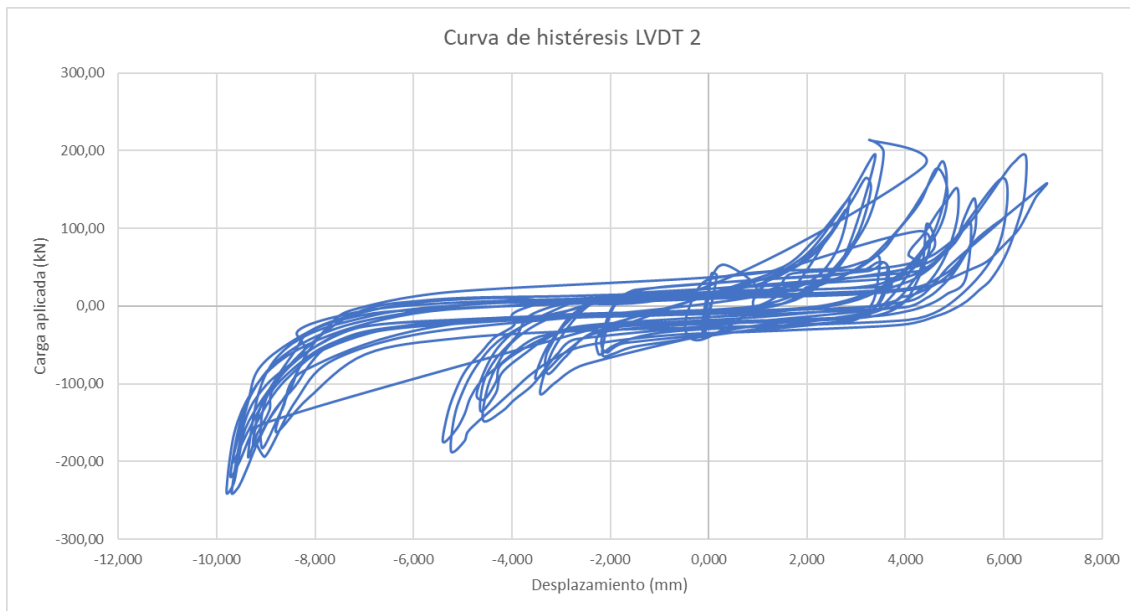


Gráfico 6. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del LVDT 2. Lanamme-UCR.

El gráfico anterior, también muestra lo detectado en el gráfico de desplazamiento respecto al desplazamiento constante en un intervalo de tiempo, dado que se notan la

superposición de al menos dos curvas histeréticas, lo que refleja un cambio en las condiciones de falla.

6.1.1.1. Desplazamientos horizontales en LVDT 3.

El Gráfico 7, muestra la curva tiempo (s) vs desplazamiento horizontal (mm) como resultado del LVDT 3. Este instrumento registró los desplazamientos horizontales en la ubicación a nivel de la columna a una altura aproximada de 26 cm por encima de la parte superior del cimient (ver Imagen 29).

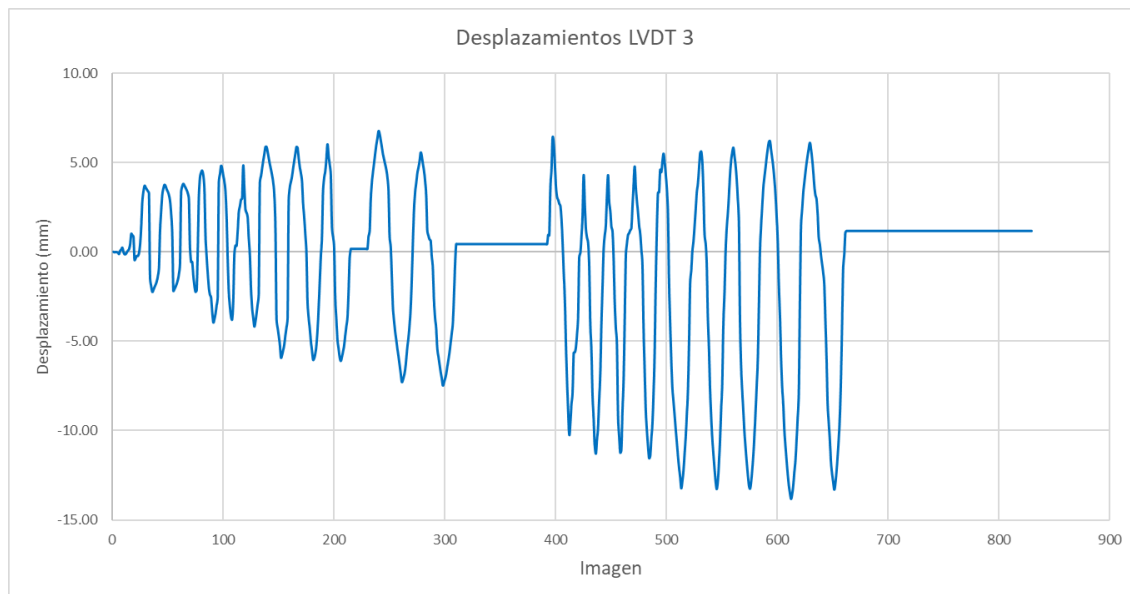


Gráfico 7. Gráfico tiempo (s) vs desplazamiento horizontal (mm) obtenidos del LVDT 3. Lanamme-UCR.

Similarmente al gráfico anterior, se nota que existen un cambio en las condiciones de la falla que provocan que los desplazamientos, después de la imagen 313 aproximadamente, registren mediciones en otro rango o franja, pasando de estar entre los -6 mm y 7 mm a valores entre los -11.5mm y 4.7mm, para luego establecerse en una tercera franja entre los -13.5mm y los 5.5 mm.

La curva de ciclos (ver Gráfico 8), muestra los desplazamientos máximos de cada ciclo, siendo que los valores mayores totales son de 6.83 mm y -13.83 mm.

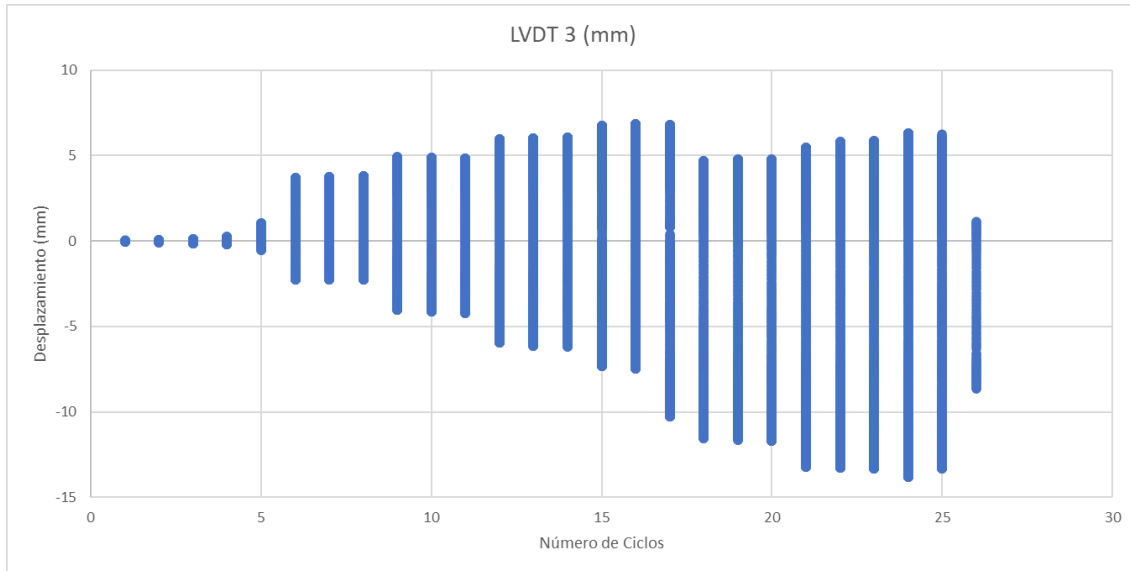


Gráfico 8. Desplazamiento (mm) vs número de ciclos obtenido del LVDT 3.

La curva de histéresis para este caso se muestra en el Gráfico 9. De igual manera, cabe mencionar que se nota la superposición de al menos dos curvas producto del cambio en el patrón de desplazamientos.

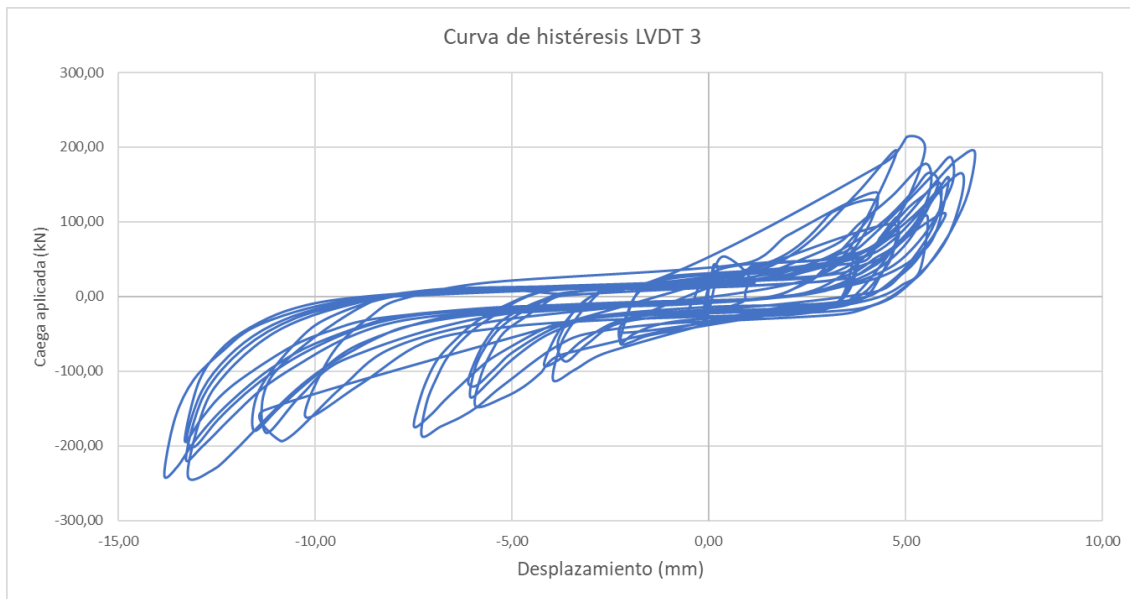


Gráfico 9. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del LVDT 3. Lanamme-UCR.

Luego de las primeras dos mediciones que mostraron el mismo cambio, se puede afirmar que el presentado en este LVDT corresponde a la pausa por los ajustes a los

pernos que debieron realizar los técnicos al momento de la falla, no así al instrumento como tal.

6.1.1.1. Desplazamientos verticales en LVDT 4.

El LVDT 4 registró los valores de desplazamientos horizontales en la ubicación a nivel de la columna a una altura aproximada de 40 cm por encima de la parte superior del cimient. Los datos de tiempo (s) vs desplazamiento (mm) se grafican a continuación (ver Gráfico 10).

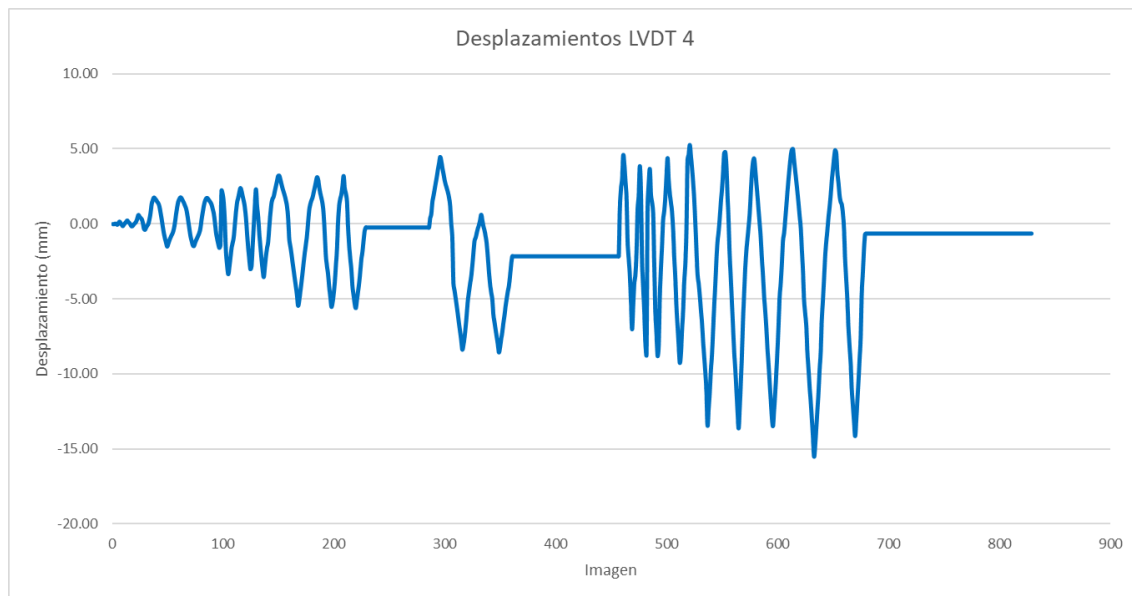


Gráfico 10. Gráfico tiempo (s) vs desplazamiento vertical (mm) obtenidos del LVDT 4. Lanamme-UCR.

El gráfico anterior muestra la particularidad que registra varias franjas de datos con rango que oscilan entre los 3.9 mm y -5.6 mm, no obstante, luego el patrón cambia y pasa a obtener datos entre los -8.5 mm y 1.6 mm, posteriormente cambia a una franja entre los -9.4 mm y 3.8 mm, para finalmente dar paso a la obtención de los desplazamientos máximos de -15.53 mm y 5.3 mm.

Adicionalmente, en el Gráfico 11 se muestran todos los desplazamientos obtenidos en los diferentes ciclos de carga, siendo que los máximos valores se obtienen en el ciclo 24.

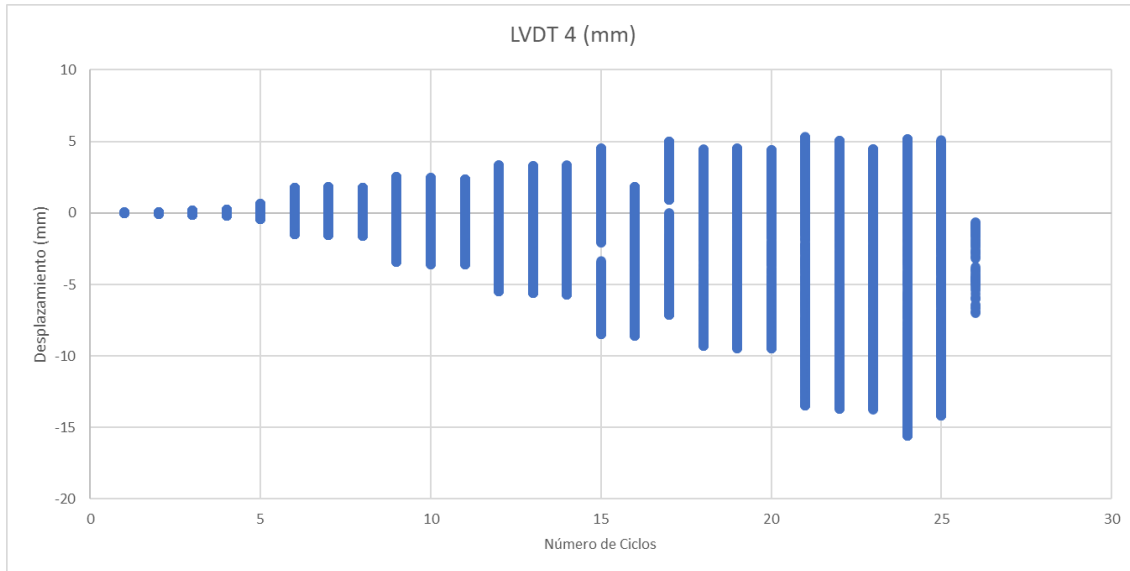


Gráfico 11. Desplazamiento (mm) vs número de ciclos obtenido del LVDT 4.

Continuando con los resultados, el Gráfico 12 muestra la curva de histéresis para los datos del LVDT 4.

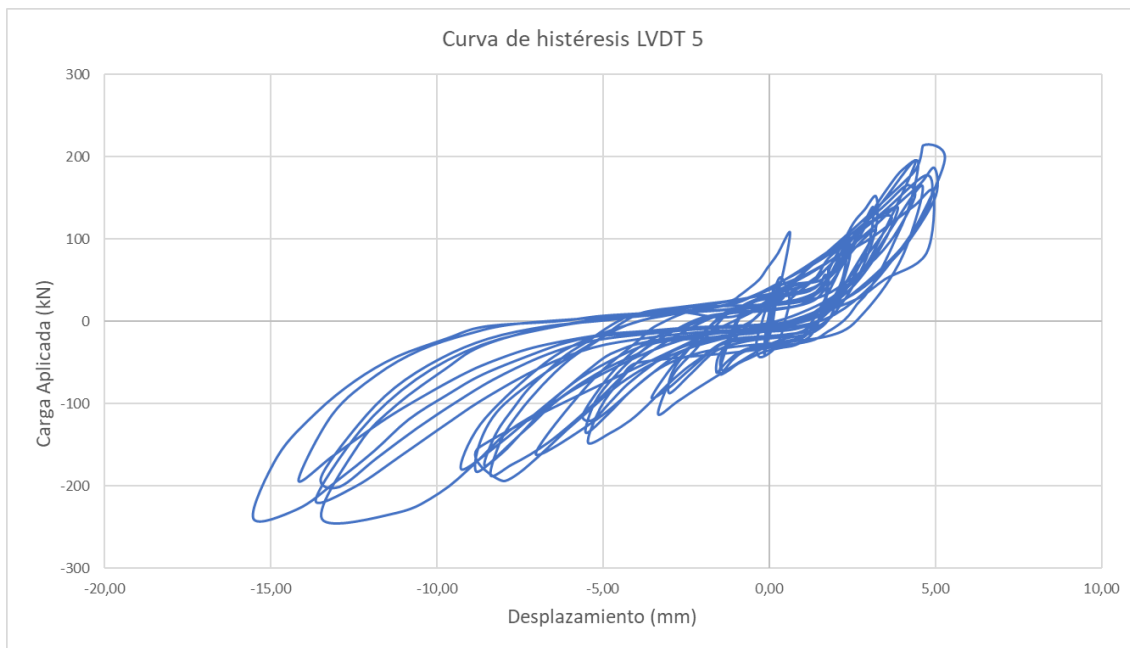


Gráfico 12. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del LVDT 4. Lanamme-UCR.

Este gráfico tiene un patrón más regular en comparación con los anteriores, no obstante, es posible observar los cambios en los patrones de carga superpuestos entre sí, debido a las variaciones de desplazamientos indicadas.

6.1.1.1. Desplazamientos horizontales en LVDT 5.

El LVDT 5 registró los valores de desplazamientos horizontales en la ubicación a nivel de la viga corona a una altura aproximada de 260 cm por encima de la parte superior del cimiento (ver Imagen 29). Los datos de tiempo (s) vs desplazamiento (mm) se grafican a continuación (ver Gráfico 13).

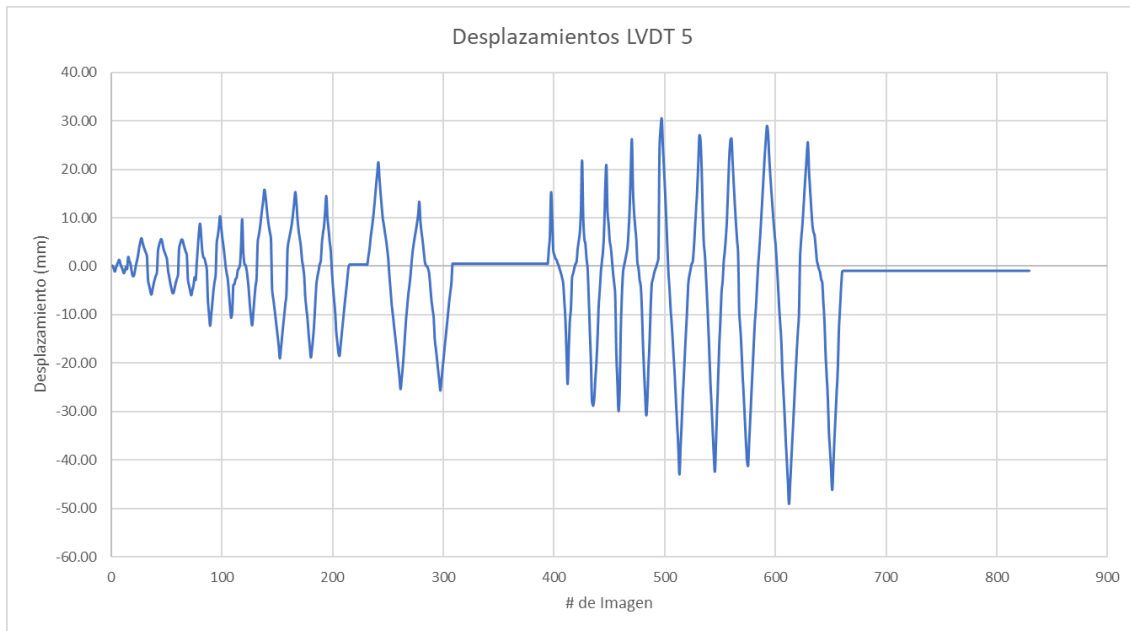


Gráfico 13. Gráfico tiempo (s) vs desplazamiento horizontal (mm) obtenidos del LVDT 5. Lanamme-UCR.

A diferencia de los gráficos anteriores, este es el que muestra los mayores desplazamientos para los LVDT llegando a valores de hasta -49 mm. Sin embargo, esto se encuentra dentro de lo esperado, dado que el LVDT está colocado en la parte superior que es donde eventualmente se suscitan los valores más altos para un muro en voladizo

De igual manera que los gráficos anteriores, mantiene una zona constante entre las imágenes 300 a 400 y es posible distinguir varias franjas de desplazamiento, con rangos entre los -19 mm y 13.9 mm, para luego obtener valores entre los -25.5 mm y 20.8 mm, posteriormente oscila entre los -32 mm y 26 mm, para dar paso a los desplazamientos más grandes registrados de -49.07 mm y 31.2 mm.

El Gráfico 14, muestra los valores de desplazamiento máximos obtenidos en cada ciclo de carga, siendo que los máximos valores se obtienen en los ciclos 21 y 24.

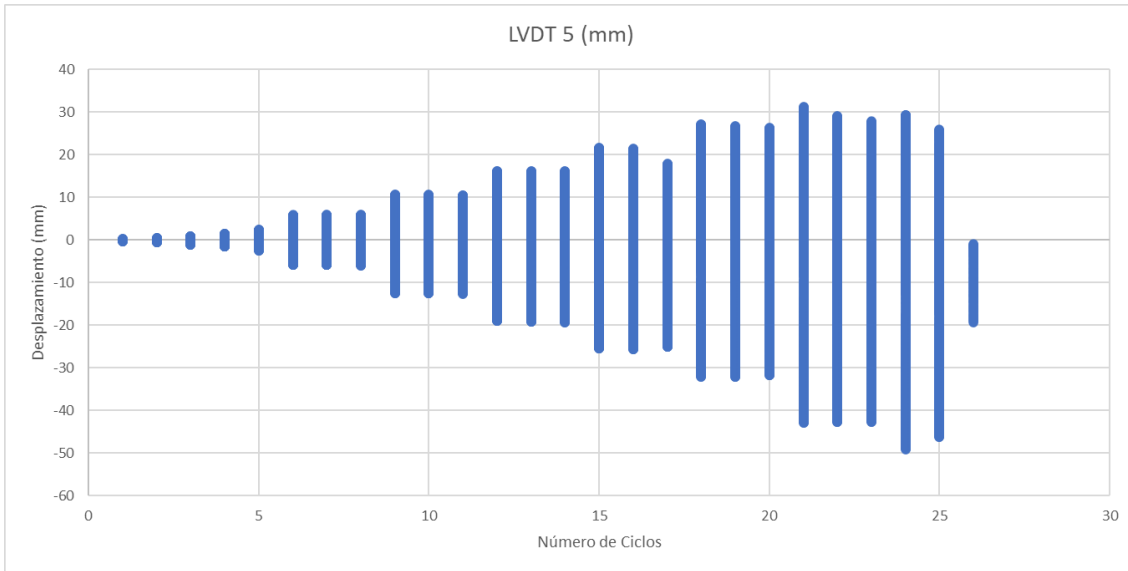


Gráfico 14. Desplazamiento (mm) vs número de ciclos obtenido del LVDT 5.

6.1.1.1. Resumen de los desplazamientos en LVDT.

Mediante el Gráfico 15 se muestran en comparación los datos de los desplazamientos horizontales obtenidos de los LVDT 2, 3 y 5.

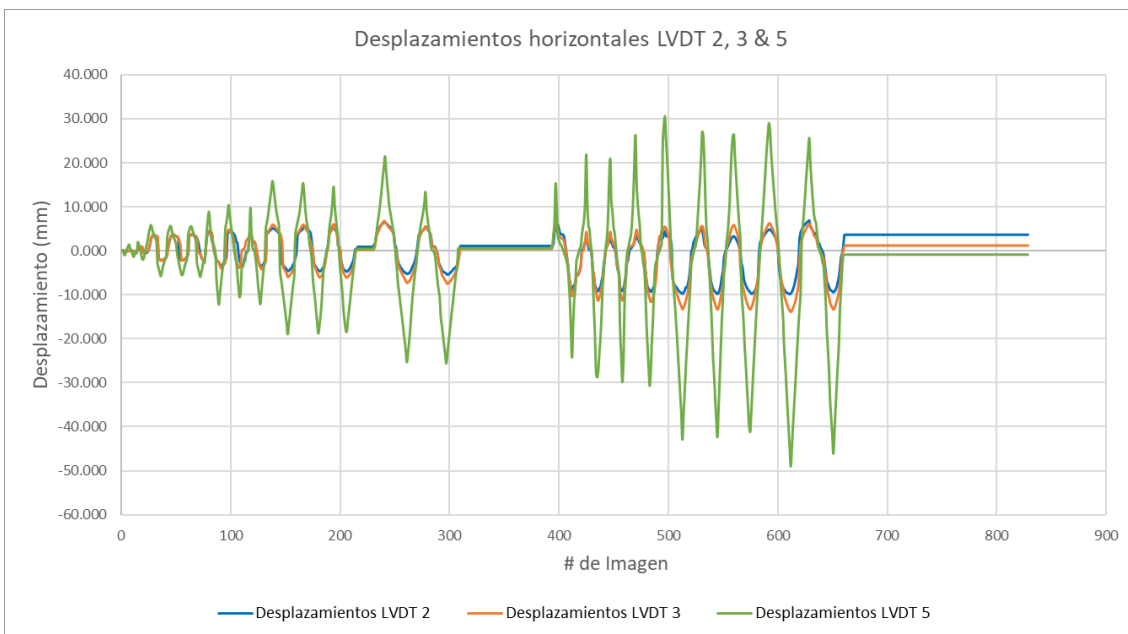


Gráfico 15. Comparación de los desplazamientos horizontales para LVDT 2, LVDT 3, LVDT 5.

Del gráfico anterior, es importante destacar que a medida que el LVDT se encuentra más cercano al punto más lejano del cimiento, se obtienen mayores valores, lo cual es de esperarse dada la condición de voladizo del muro; adicionalmente, el patrón se mantiene, lo que es un indicio de que las mediciones son consistentes entre sí.

De igual manera para los desplazamientos verticales, el Gráfico 16 muestra los datos comparativos de los LVDT 1 y 4. Para este caso, lo mejor es realizar una comparación de los valores máximos y mínimos obtenidos a través de los gráficos de ciclos.

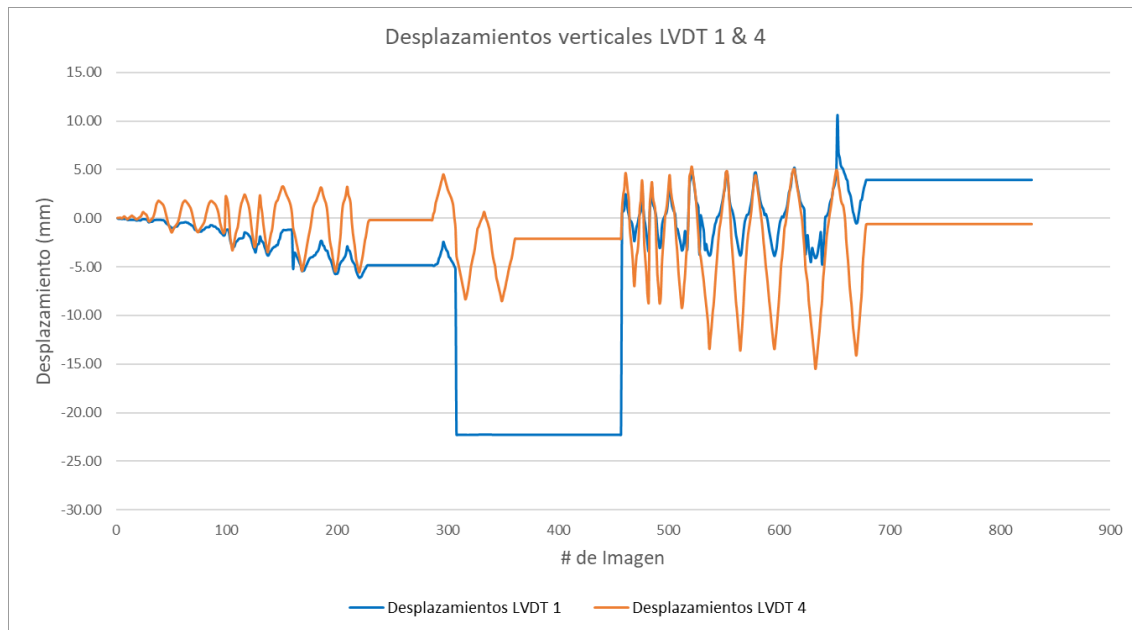


Gráfico 16. Comparación de los desplazamientos verticales del LVDT 1 y LVDT 4.

Tal como se mencionó en el apartado del LVDT 1, los datos obtenidos de esta medición confirman a través del gráfico la inconsistencia de mediciones. La mayoría de los datos de desplazamiento se muestran de un lado del eje y el valor constante de los -22.30 mm, constituye otro indicador.

6.1.2. Desplazamientos obtenidos de 2D-DIC.

Una vez realizado el procesamiento de las imágenes adquiridas, se obtienen las mediciones del campo de desplazamiento aproximando la ubicación de cada uno de los LVDT.

Para la obtención de los valores de desplazamiento, es importante describir la utilización del código utilizado en Matlab, que para esta primera parte se utilizó el

Código A, mencionado en el apartado 5.4.1. En el **Anexo 6** se detalla la utilización de este código para la obtención de los desplazamientos.

Para proceder con cada uno de los datos, es necesario definir una región de interés (ver apartado 4.3.3), para lo cual se procederá haciendo referencia a la numeración de cada LVDT, de manera que se tendrán datos para cada medición “n” (estando “n” en el intervalo de 1 a 5) según la siguiente nomenclatura: DIC LVDT n (ver Imagen 60).



Imagen 60. Región de interés o Zonas DIC LVDT n para cada medición. Lanamme-UCR.

Es importante destacar que, la región de interés al estar constituida por un subconjunto de puntos, para obtener los valores de desplazamiento del DIC deben promediarse

todos los valores encontrados en cada región de interés mediante la técnica, con el fin de obtener la mejor aproximación posible.

6.1.2.1. Desplazamientos verticales en zona DIC LVDT 1.

Para obtener las mediciones más cercanas al LVDT 1, se realiza un análisis para la región de interés DIC LVDT 1 (ver Imagen 60).

Esta región de interés es el subconjunto que el software requiere para obtener los desplazamientos, la cual se define como una grilla cuyo tamaño de resolución será de 30 x 30 píxeles (ver Imagen 61).

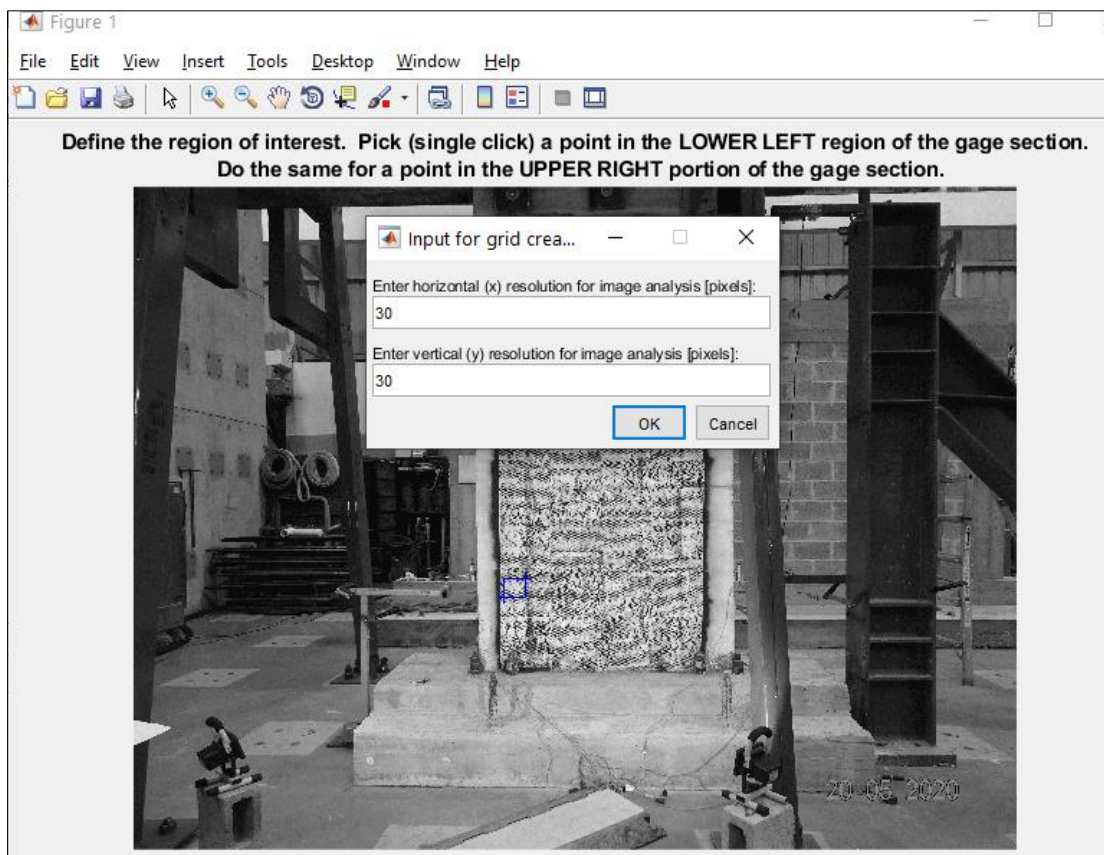


Imagen 61. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 1 (subconjunto 30 x 30 píxeles).

El software inicia el análisis rastreando todos los puntos elegidos en el subconjunto, de acuerdo con el procedimiento descrito en el **Anexo 8**. Los resultados numéricos se muestran en el anexo y se grafican a continuación en número de imagen vs desplazamiento.

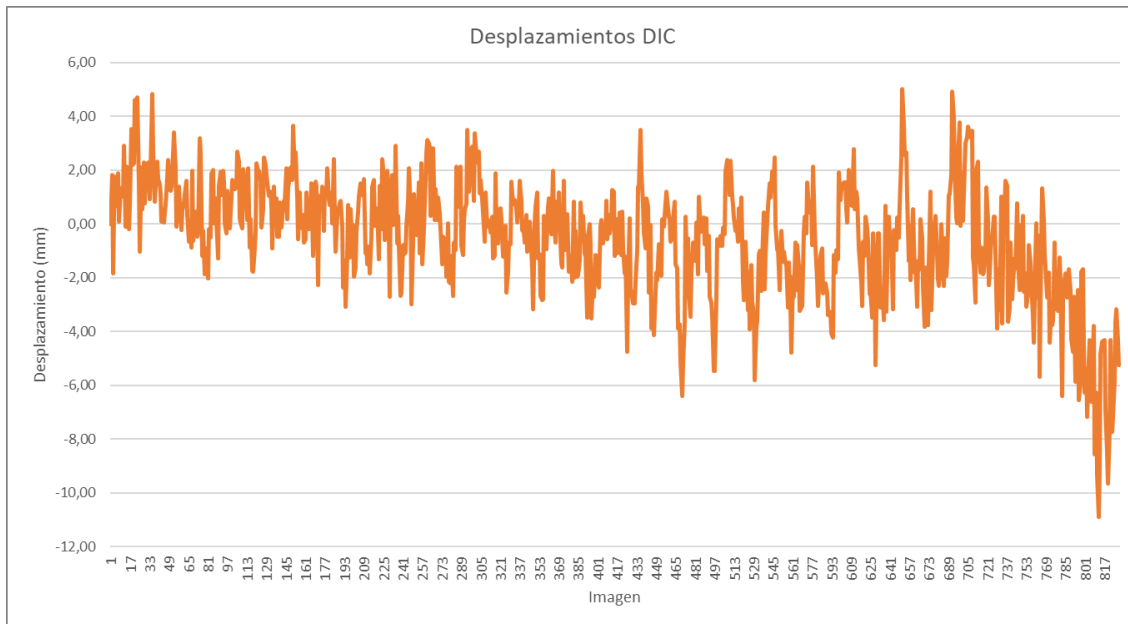


Gráfico 17. Desplazamientos vs imagen de la zona DIC LVDT 1.

Es importante aclarar que los datos de desplazamiento son originalmente extraídos del software en píxeles, pero posteriormente se convierten en milímetros utilizando el factor M en horizontal o vertical, según corresponda (ver apartado 4.2). El cálculo de este factor se muestra en el apartado 5.2.5.1.

Cabe recalcar, que al igual que los gráficos de desplazamiento para cada LVDT, se nota claramente como van incrementando los desplazamientos a medida que van incrementando la carga o avanzan las imágenes capturadas. Adicionalmente se logran distinguir que los desplazamientos permanecen dentro de una franja entre los ± 6 mm. Los desplazamientos máximos corresponden a 5.0 mm y -6.38mm, obteniendo un registro hasta los -10.90 mm cuando existe ruptura más allá de la falla.

6.1.2.1. Desplazamientos horizontales en zona DIC LVDT 2.

Para obtener las mediciones más cercanas al LVDT 2, se realiza un análisis para la región de interés DIC LVDT 2 (ver Imagen 60).

De igual manera, se define un tamaño del subconjunto de 30 x 30 píxeles (ver Imagen 62).

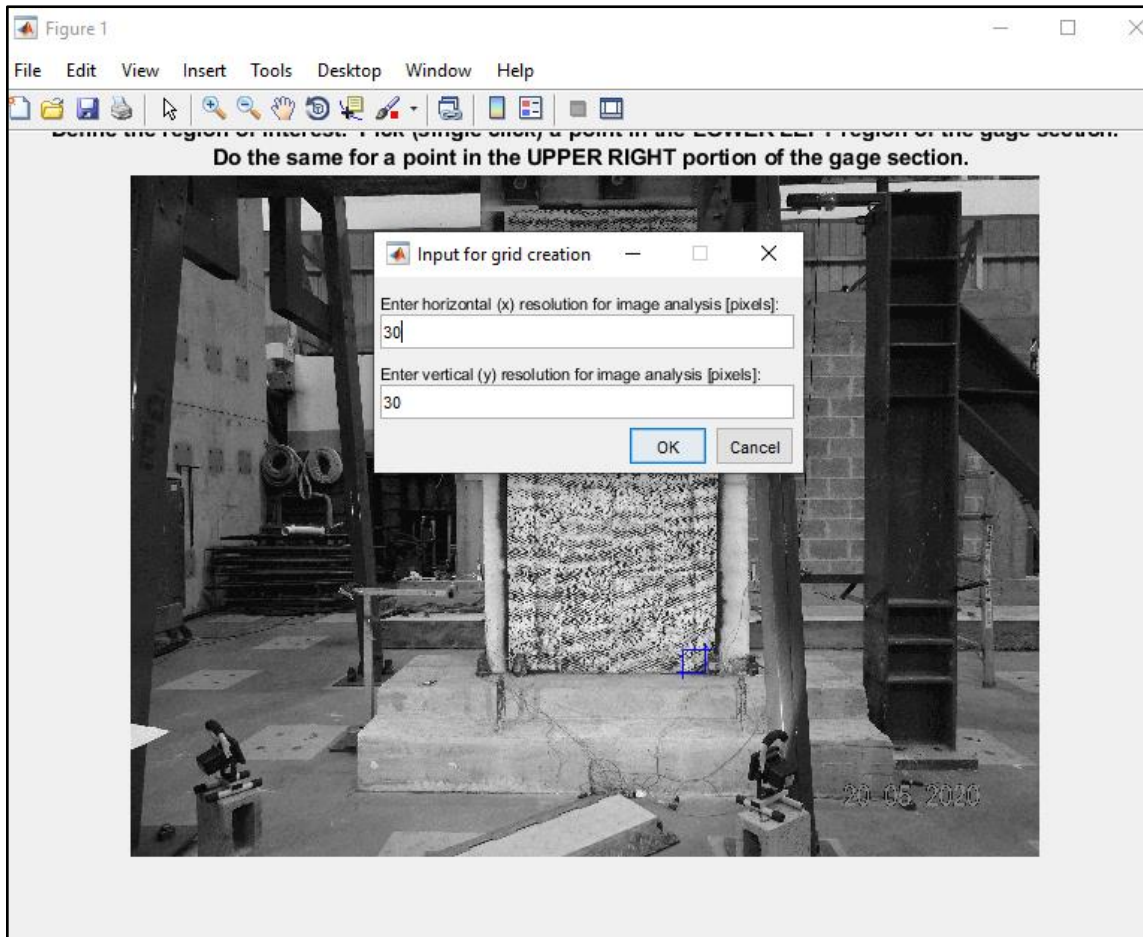


Imagen 62. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 2 (subconjunto 30 x 30 píxeles).

Los datos obtenidos, se grafican a continuación (ver Gráfico 18).

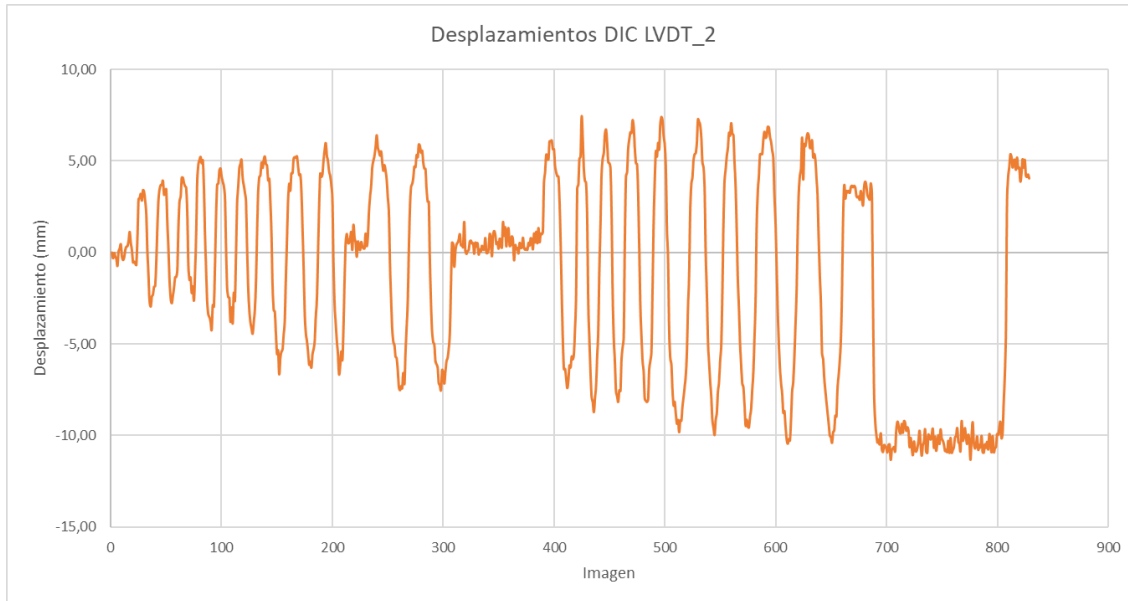


Gráfico 18. Desplazamientos (mm) vs imagen de la zona DIC LVDT 2.

En este gráfico se distinguen unas zonas donde el desplazamiento es constante con valores cercanos a cero, lo cual podría ser producto de detenimiento en el proceso de carga por ajustes o cambio. Los valores máximos y mínimos obtenidos corresponden a 7.45 mm y -10.92mm, obteniendo un registro hasta los -11.34 mm cuando existe ruptura más allá de la falla.

Cabe recalcar que los resultados del DIC no tienen una carga asociada. No obstante, cada archivo de imagen posee un registro de la hora en que fue tomada, de esta manera, es posible determinar la imagen de referencia y los intervalos de tiempo entre todas las imágenes. Tomando entonces la referencia del primer dato de desplazamiento de los LVDT para un tiempo cero, es posible sincronizarlo con el primer dato o imagen de referencia del DIC. De esta manera, a través de un remuestreo, es posible conocer la fuerza aplicada en cada imagen y por ende el desplazamiento DIC asociado, lo que permite construir la curva de histéresis respectiva con los datos que se cuentan.

En el Gráfico 19, se muestra la curva de histéresis mencionada.

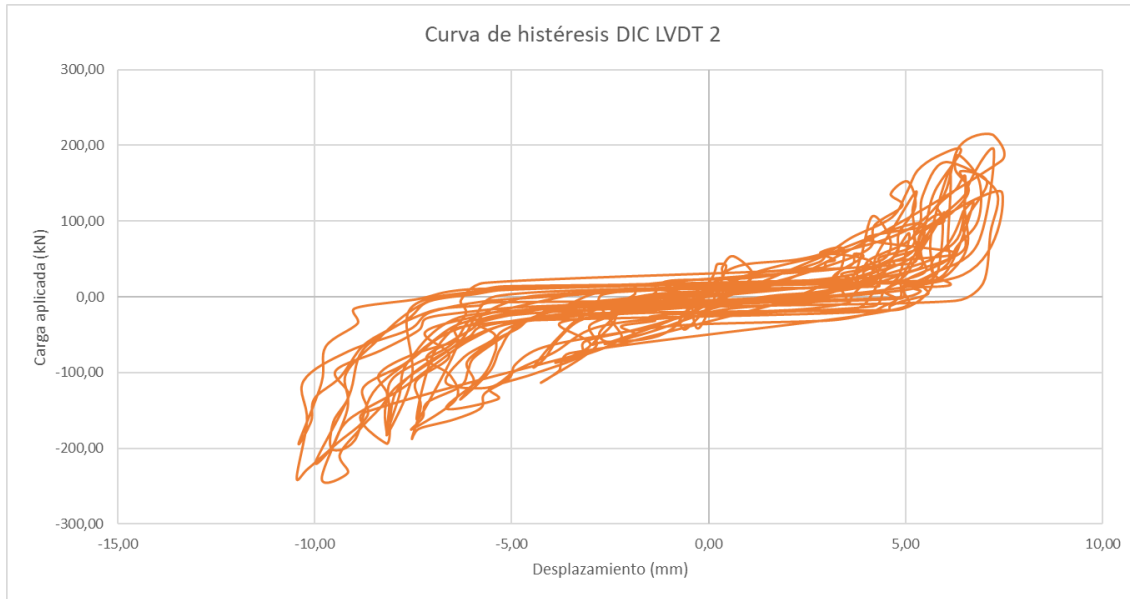


Gráfico 19. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del DIC LVDT 2.

6.1.2.1. Desplazamientos horizontales en zona DIC LVDT 3.

Para obtener las mediciones más cercanas al LVDT 3, se realiza un análisis para la región de interés DIC LVDT 3 (ver Imagen 60).

Se definió el subconjunto de 30 x 30 píxeles (ver Imagen 63).

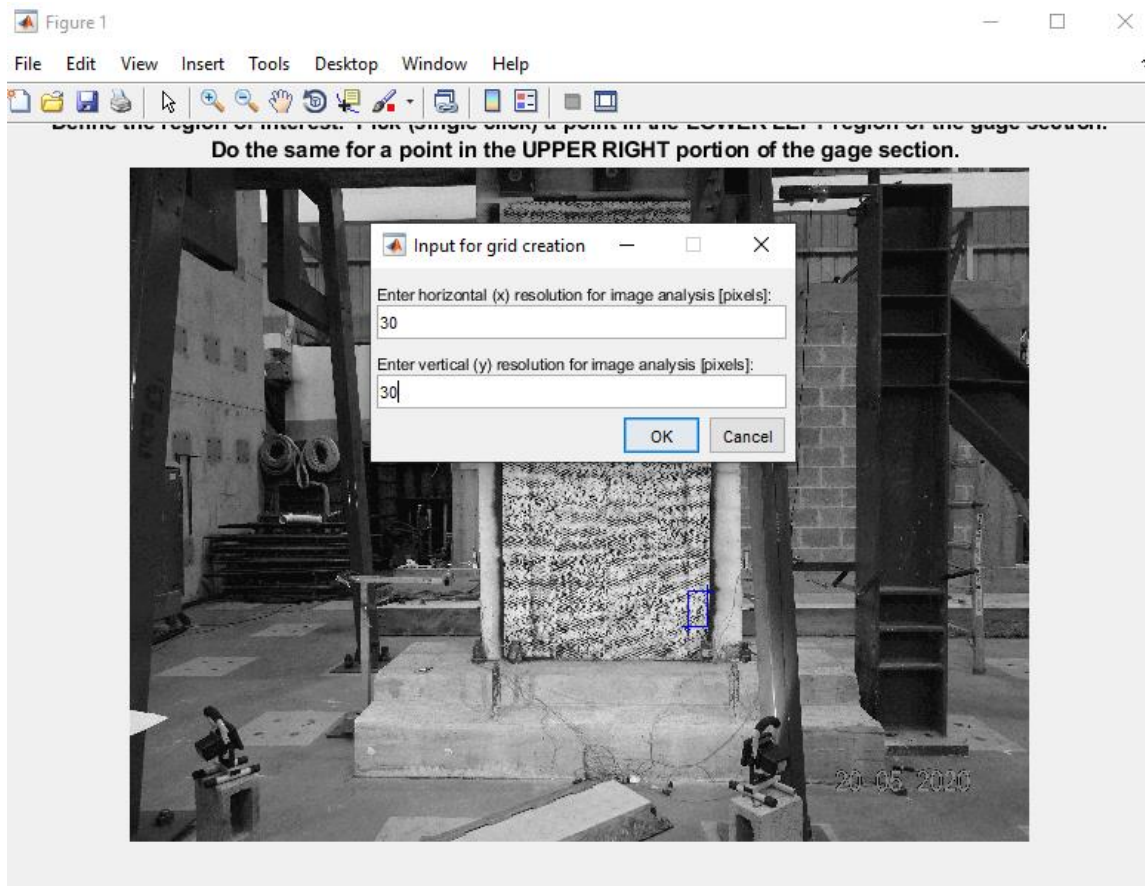


Imagen 63. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 3 (subconjunto 30 x 30 píxeles).

El gráfico desplazamiento (mm) vs imagen, se muestra a continuación (ver Gráfico 20).

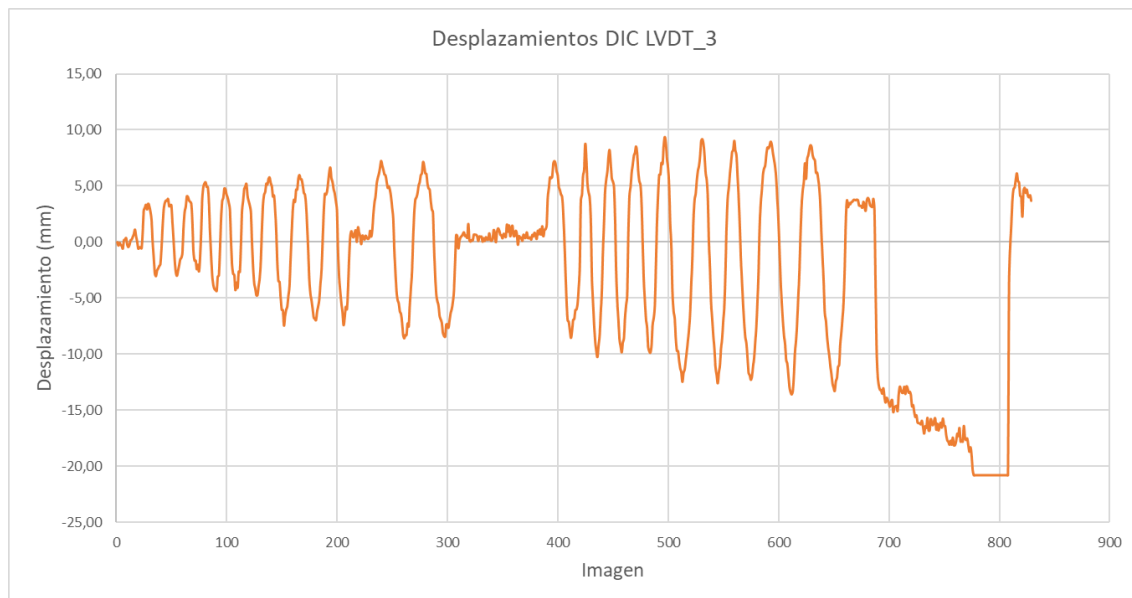


Gráfico 20. Desplazamientos (mm) vs imagen de la zona DIC LVDT 3.

En el gráfico anterior, nuevamente se registran dos zonas con desplazamiento constante que como se mencionó, puede deberse a momentos en los que se realizaron ajustes o cambios en la velocidad de carga para pasar de un ciclo a otro. Los desplazamientos máximos obtenidos corresponden a 9.39 mm y -14.37, obteniendo un registro hasta los -20.81 mm cuando existe ruptura más allá de la falla.

En el Gráfico 21 se muestra la curva de histéresis respectiva.

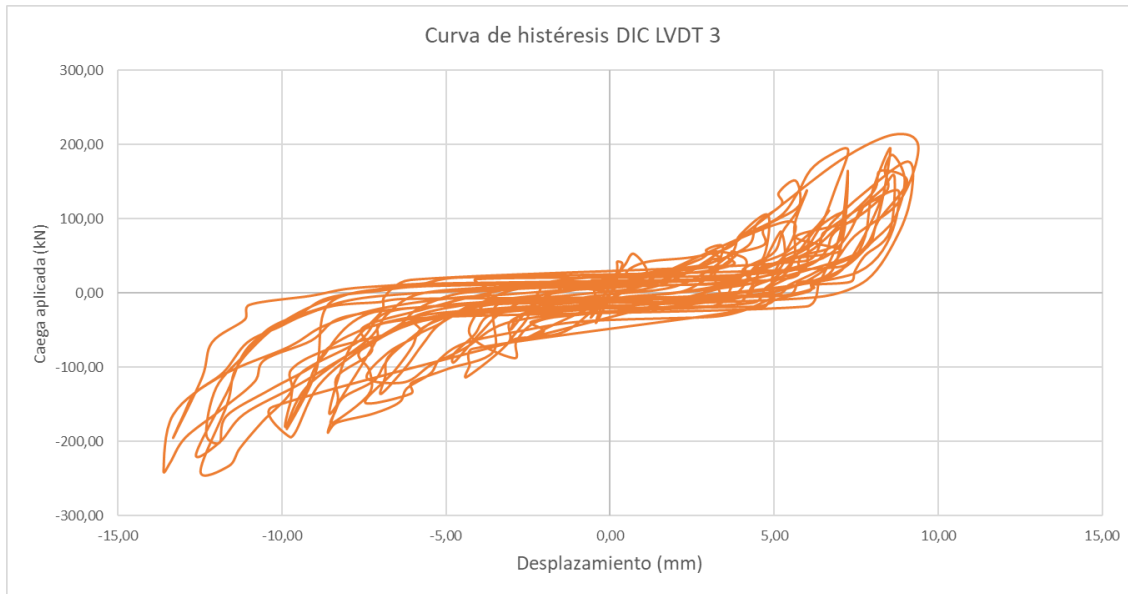


Gráfico 21. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del DIC LVDT 3.

6.1.2.1. Desplazamientos verticales en zona DIC LVDT 4.

Para obtener las mediciones más cercanas al LVDT 4, se realiza un análisis para la región de interés DIC LVDT 4 (ver Imagen 60).

Se definió el subconjunto de 30 x 30 píxeles (ver Imagen 64).

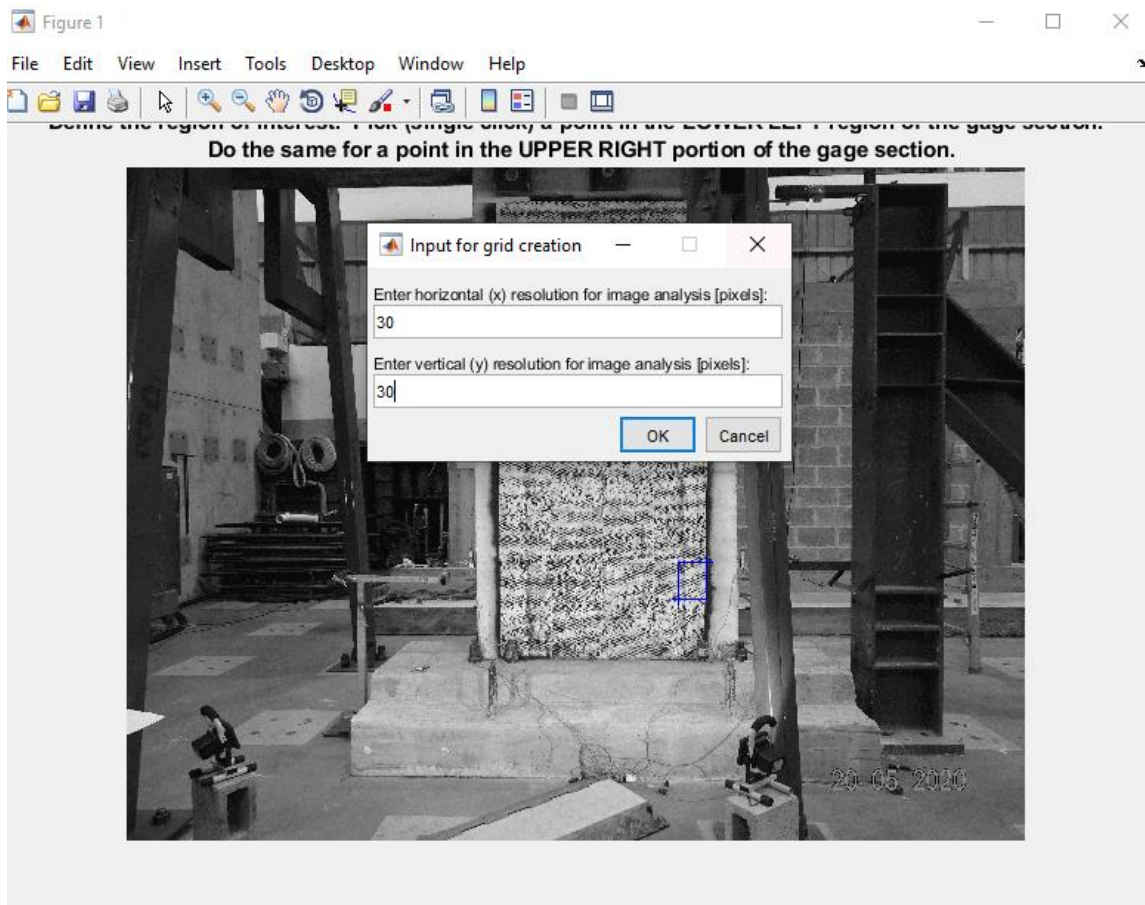


Imagen 64. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 4 (subconjunto 30 x 30 píxeles).

El gráfico desplazamiento (mm) vs imagen, se muestra a continuación (ver Gráfico 22).

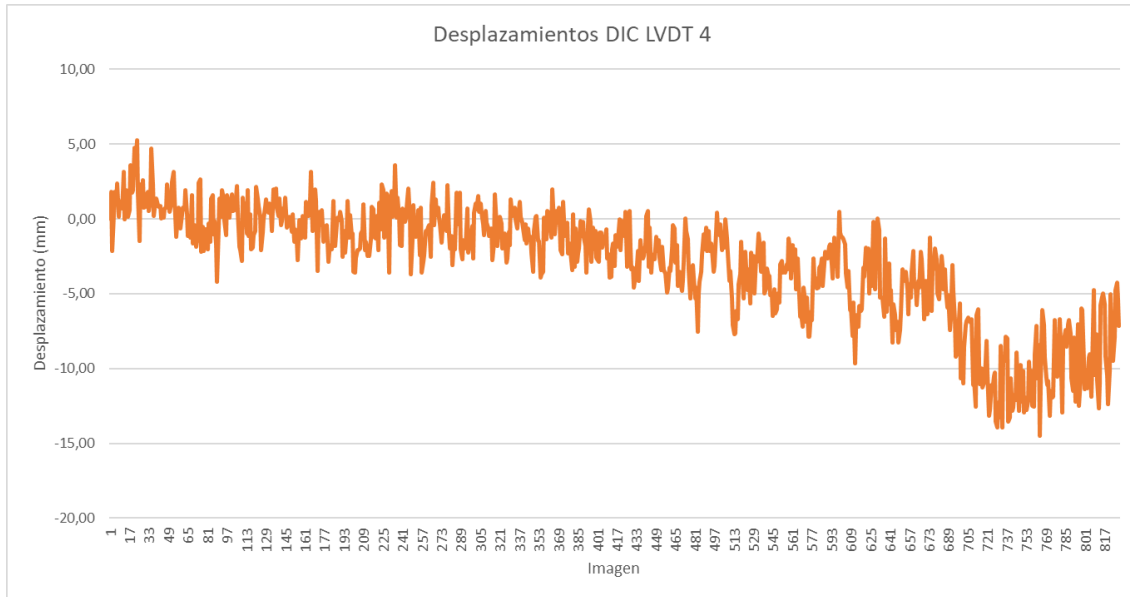


Gráfico 22. Desplazamientos (mm) vs imagen de la zona DIC LVDT 4.

Al igual que el gráfico obtenido para DIC LVDT 1, se nota como van incrementando los desplazamientos a medida que van incrementando la carga o avanzan las imágenes capturadas. Adicionalmente se logran distinguir que los desplazamientos permanecen, dentro de una franja entre los 5 mm y -5 mm, los cuales poco a poco van pasando a valores más altos para dar paso a la falla. Los desplazamientos máximos medidos en esta zona corresponden a 5.25 mm y -10.66 mm, obteniendo un registro hasta los -14.50 mm cuando existe ruptura más allá de la falla.

6.1.2.1. Desplazamientos horizontales en zona DIC LVDT 5.

Para obtener las mediciones más cercanas al LVDT 5, se realiza un análisis para la región de interés DIC LVDT 5 (ver Imagen 60).

Se definió el subconjunto de 30 x 30 píxeles (ver Imagen 65).

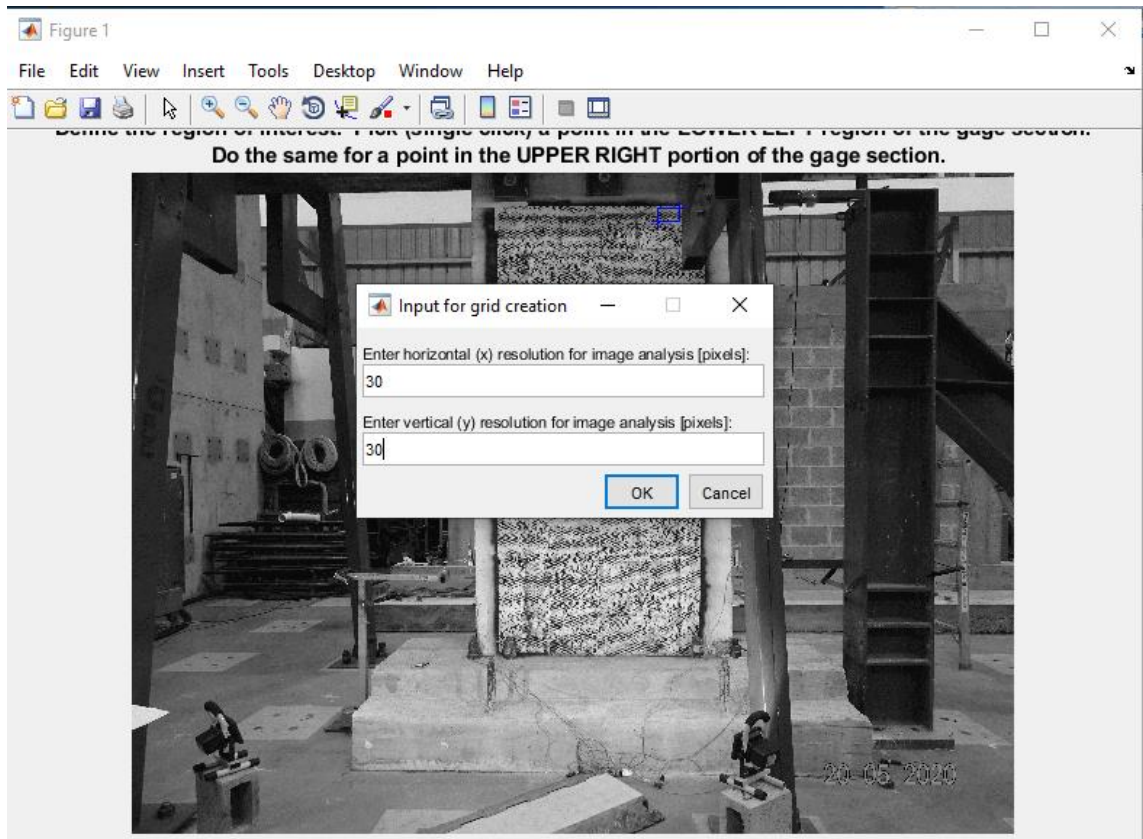


Imagen 65. Región de interés definida para la zona DIC LVDT 5 (subconjunto 30 x 30 píxeles).

El gráfico desplazamiento (mm) vs imagen, se muestra a continuación (ver Gráfico 23).

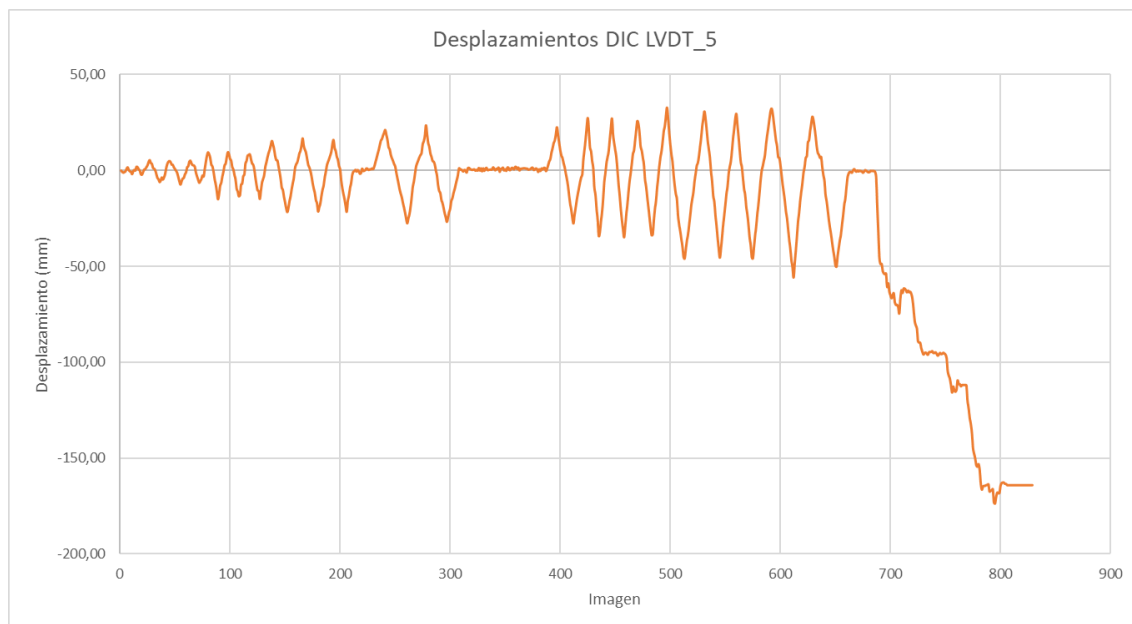


Gráfico 23. Desplazamientos (mm) vs imagen de la zona DIC LVDT 5.

De igual manera que para los gráficos de las zonas horizontales, también se obtiene el registro de dos zonas con desplazamiento constante. Los desplazamientos máximos obtenidos corresponden a 32.83 mm y hasta -65.04 mm en la falla. Aunque se registra un desplazamiento de hasta -173.91 mm, este corresponde a cuando se ha presentado ya la ruptura completa del muro y por tanto no representa la realidad.

El Gráfico 24, muestra la curva de histéresis respectiva.

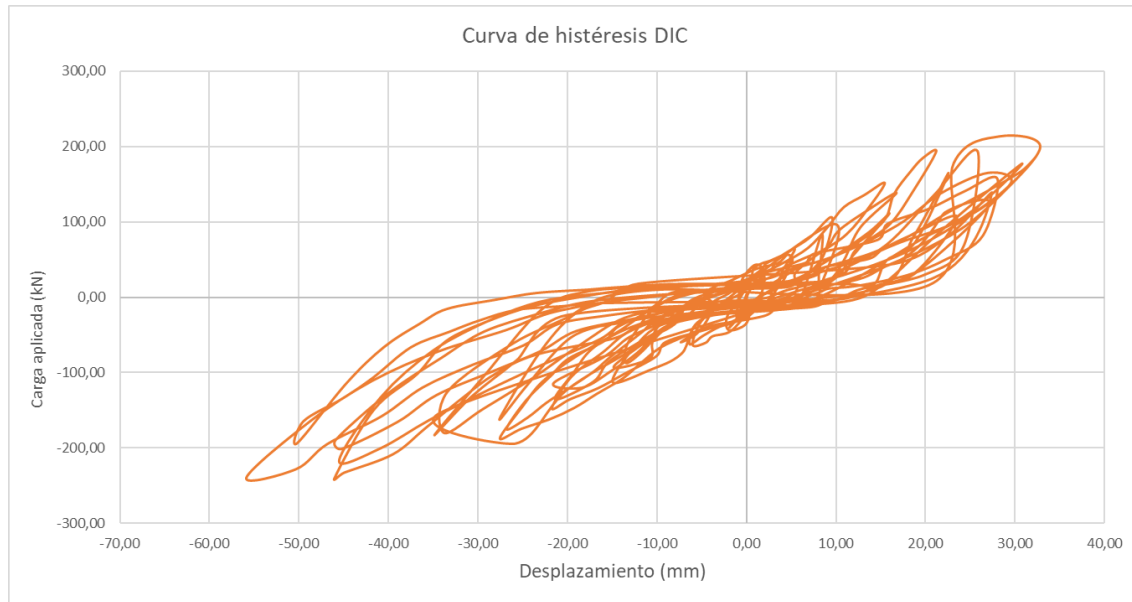


Gráfico 24. Curva de histéresis (desplazamiento (mm) vs carga aplicada (kN)) obtenida del DIC LVDT 5.

6.1.2.2. Resumen de los desplazamientos en zonas DIC LVDT.

De la misma manera que se hizo en el apartado 6.1.1.1 para los LVDT, se pueden comparar los desplazamientos horizontales obtenidos mediante la técnica DIC para cada una de las zonas. El Gráfico 25, muestra la comparación de datos de desplazamiento horizontal obtenidos para las zonas DIC LVDT 2, 3 y 5.

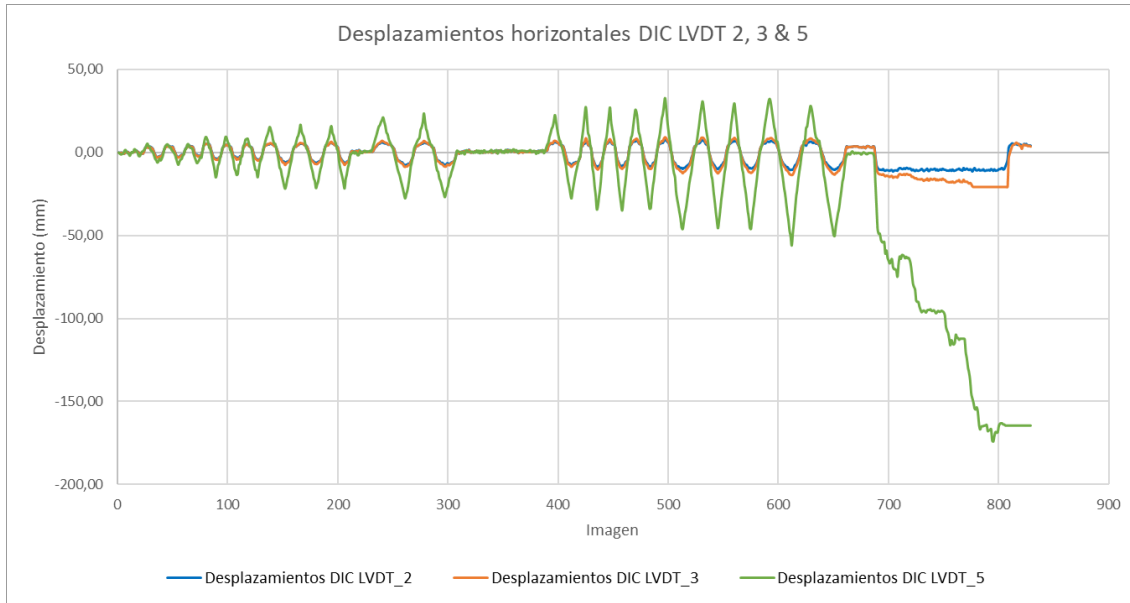


Gráfico 25. Comparación de los desplazamientos horizontales para DIC LVDT 2, DIC LVDT 3 y DIC LVDT 5.

Es importante destacar que, a diferencia de los LVDT, la técnica DIC es capaz de obtener datos más allá de cuando el muro ya presenta una falla. Aunque estos valores por lo general no se utilizan, permiten tener un panorama más amplio del mecanismo de falla de la estructura.

Para las zonas verticales, el Gráfico 26 muestra la comparación de los gráficos Ciclo – Desplazamiento.

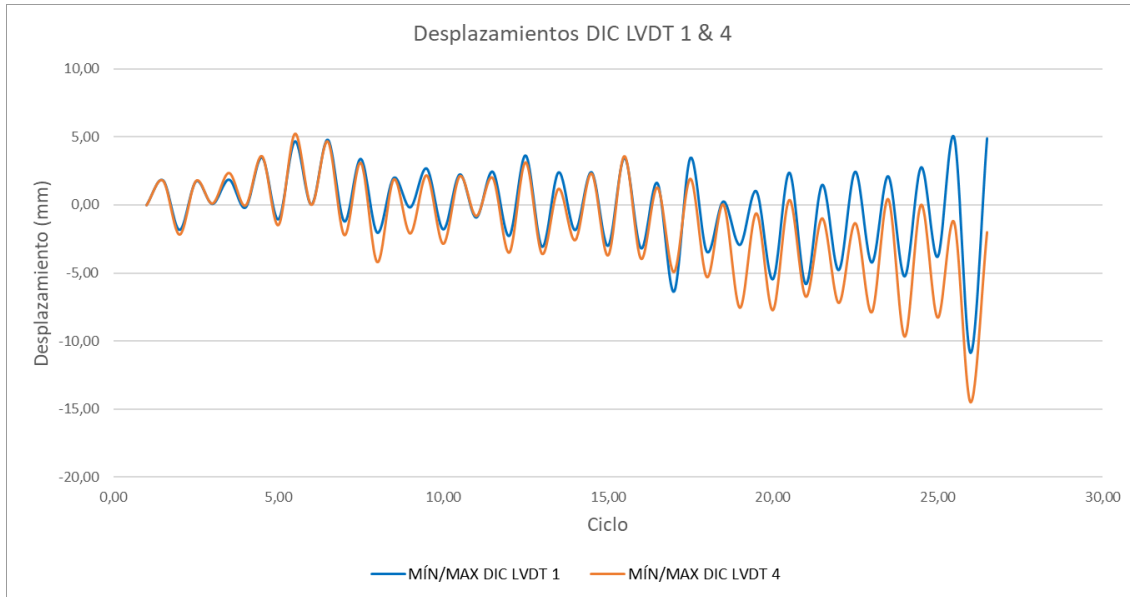


Gráfico 26. Comparación de los desplazamientos verticales del DIC LVDT 1 & DIC LVDT 4.

En esta comparación se observa claramente que los resultados muestran una consistencia, pues el comportamiento de los desplazamientos a medida que la estructura consigue llegar a la falla, son en direcciones opuestas. Esto es esperable de acuerdo con las ubicaciones de los LVDT que se encuentran opuestos por el eje de simetría vertical del muro.

6.1.3. Verificación de los resultados de la técnica DIC.

Para verificar los resultados obtenidos mediante la técnica de Correlación, es necesario realizar las comparaciones de los resultados obtenidos por la vía del LVDT y por el DIC. La mejor manera es graficando los resultados en un mismo espacio para cada punto de medición y encontrar las diferencias entre puntos (Dif).

En los siguientes apartados, se muestran las comparaciones para cada punto de medición para desplazamientos horizontales (U) y verticales (V). Adicionalmente, como un parámetro alternativo de comparación, se calcula la ductilidad con base en el método recomendado por la especificación de la American Society for Testing and Materials (ASTM E 2126-19), para cargas cíclicas; tanto para los datos obtenidos por el LVDT y el DIC en la zona 5.

6.1.3.1. Desplazamientos horizontales (*U*).

Las mediciones de desplazamientos horizontales pertenecen a las zonas 2, 3 y 5.

Uniendo el Gráfico 4 y el Gráfico 18, se obtiene la siguiente imagen que muestra la comparación de los desplazamientos obtenidos mediante el LVDT 2 y los valores en la zona DIC LVDT 2.

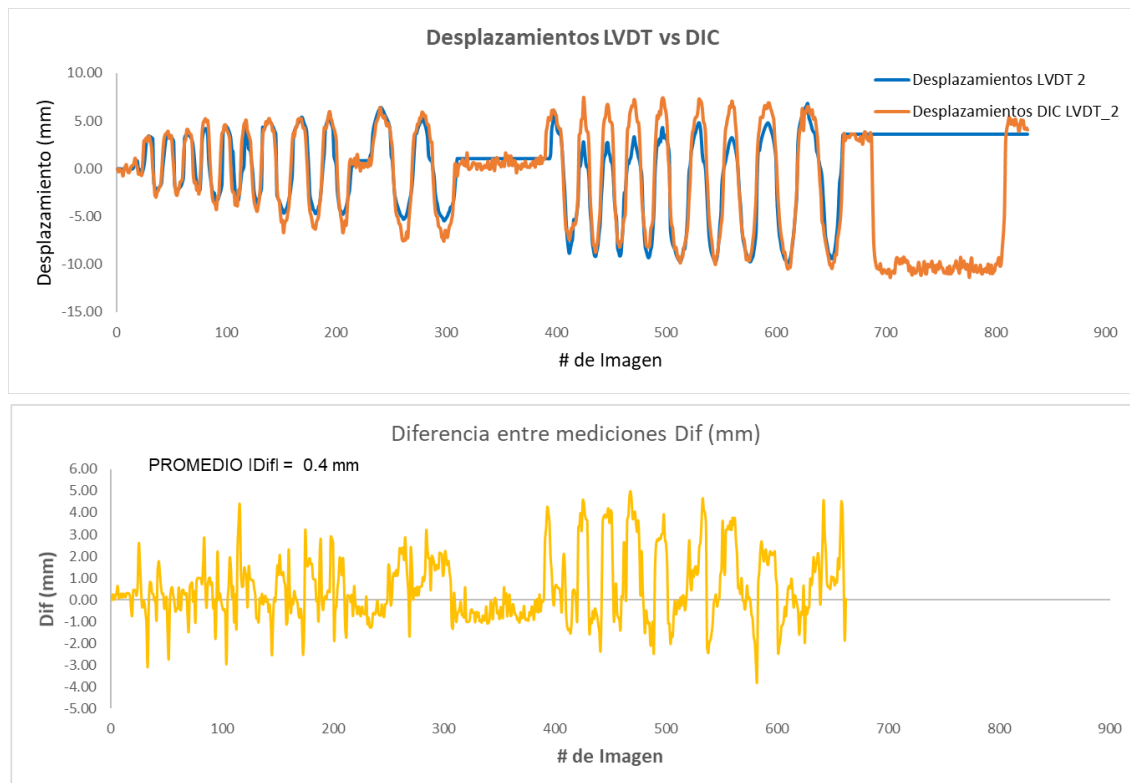


Imagen 66. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 2 (horizontal) y la diferencia entre mediciones.

Al comparar los datos obtenidos por ambas vías, es posible obtener las diferencias absolutas entre cada uno de ellos como se muestran en el gráfico anterior. Es importante notar que estas diferencias pueden ser analizadas de forma global usando el valor promedio y la desviación estándar, esta última para mostrar cuán dispersos están los datos respecto a la media y de esta forma utilizar estos datos como un indicador que permita verificar los resultados de la técnica DIC respecto a la utilización de los LVDT. Para la comparación de los valores de desplazamiento horizontal en la zona 2, se tiene un valor promedio de diferencias de 0.4 mm, con una desviación estándar de 1.6 mm y una diferencia máxima de 5.0 mm. Teniendo en cuenta que los datos son tomados en una zona cercana, las diferencias se pueden considerar

aceptables y por su bajo valor promedio, una tendencia a ser muy precisa respecto a los LVDT.

Se realiza el mismo ejercicio para la siguiente zona, por lo que uniendo el Gráfico 7 y el Gráfico 20, en el siguiente gráfico se obtiene la comparación de los desplazamientos obtenidos mediante el LVDT 3 y los valores en la zona DIC LVDT 3.

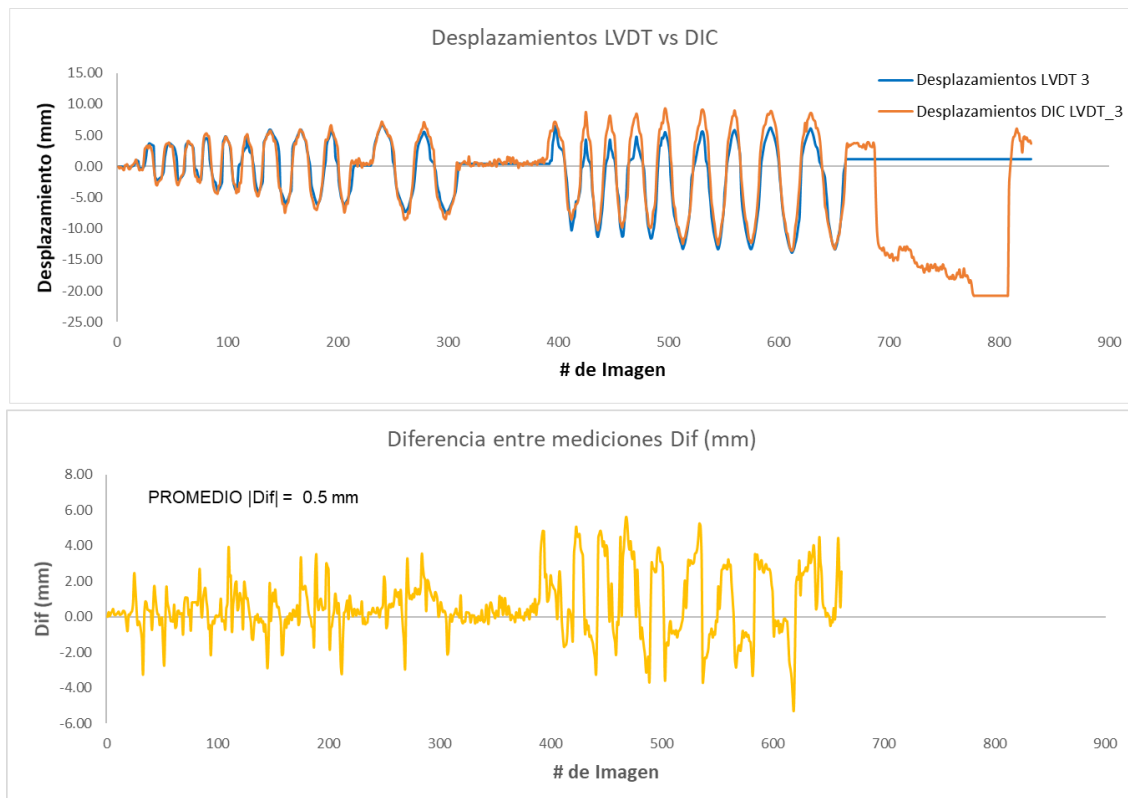


Imagen 67. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 3 (horizontal) y la diferencia entre mediciones.

De igual manera para la comparación de valores de desplazamiento horizontal de la zona 3 se tiene un valor promedio de diferencia de 0.5 mm, con una desviación estándar de 1.7 mm y una diferencia máxima de 5.6 mm. Siendo que estas diferencias son muy similares a las obtenidas en la zona anterior y por ende verificando una vez más la precisión de la técnica.

Uniendo el Gráfico 13 y el Gráfico 23, se obtiene la comparación de los desplazamientos obtenidos mediante el LVDT 5 y los valores en la zona DIC LVDT 5 (ver Imagen 68).

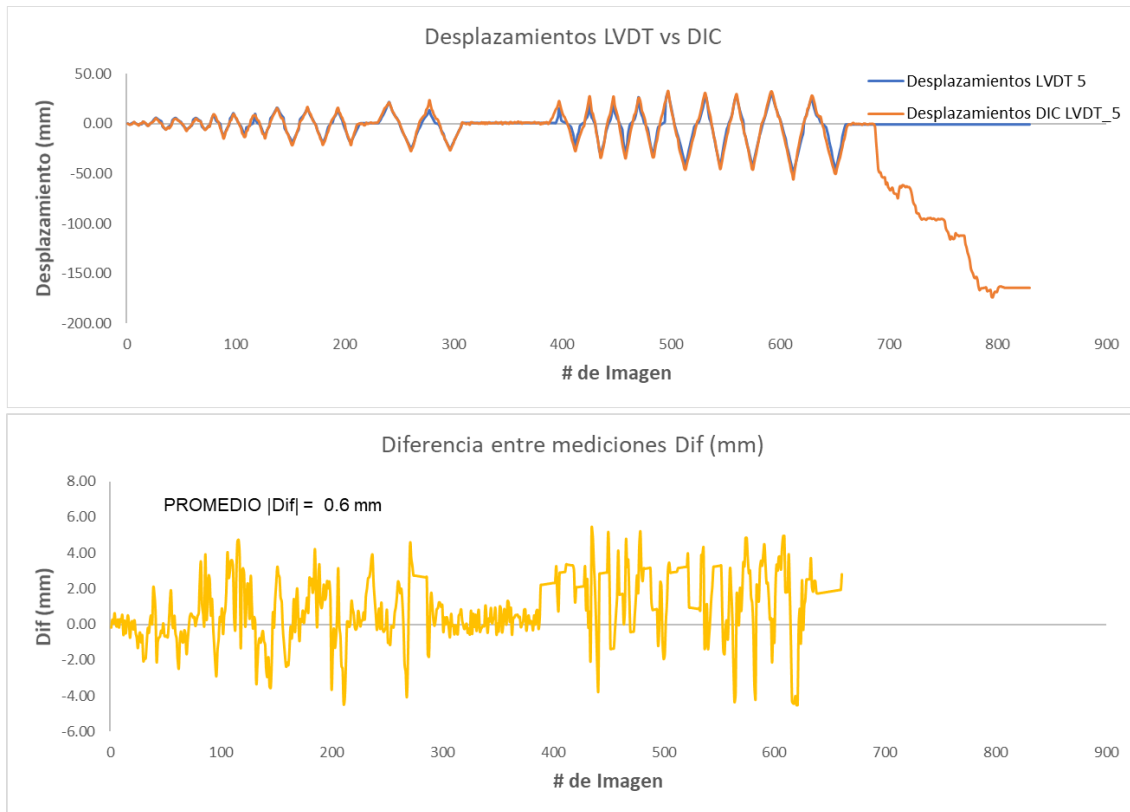


Imagen 68. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 5 (horizontal) y la diferencia entre mediciones.

Para la comparación de valores de desplazamiento horizontal de la zona 5, se tiene un valor promedio de diferencia de 0.6 mm, con una desviación estándar de 3.4 mm y una diferencia máxima de 5.4 mm. Para estos datos, aunque las diferencias son muy similares a las anteriores, se tiene una dispersión mayor de datos probablemente por encontrarse en la zona donde los datos de desplazamientos son más altos, sin embargo, se sigue manteniendo una precisión de la técnica con una diferencia promedio menor a 1 mm.

Así mismo es posible comparar las curvas de histéresis obtenidas en cada medición. En las siguientes tres imágenes es posible visualizar estas curvas, las cuales son otro indicador de que la técnica DIC es precisa respecto a los datos obtenidos por el LVDT, pues también los patrones de histéresis obtenidos tienen una distribución cercana para cada una de las mediciones.

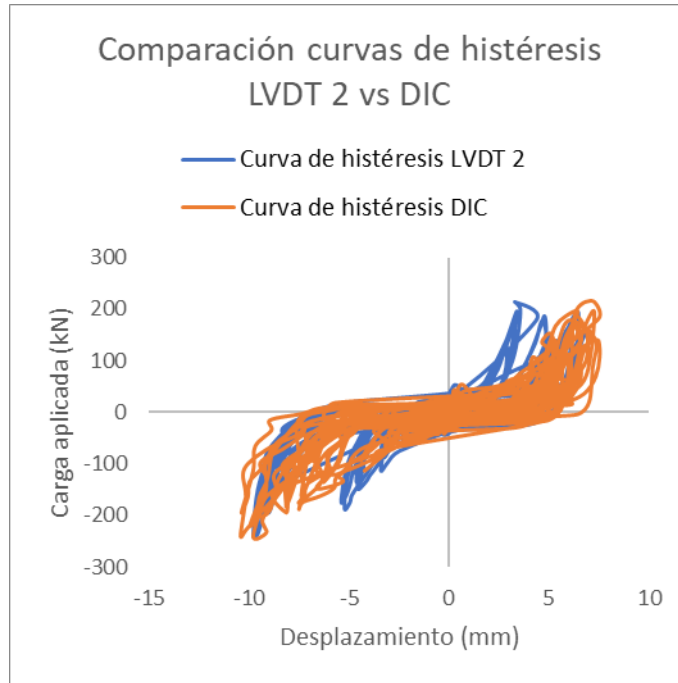


Imagen 69. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para la zona 2.

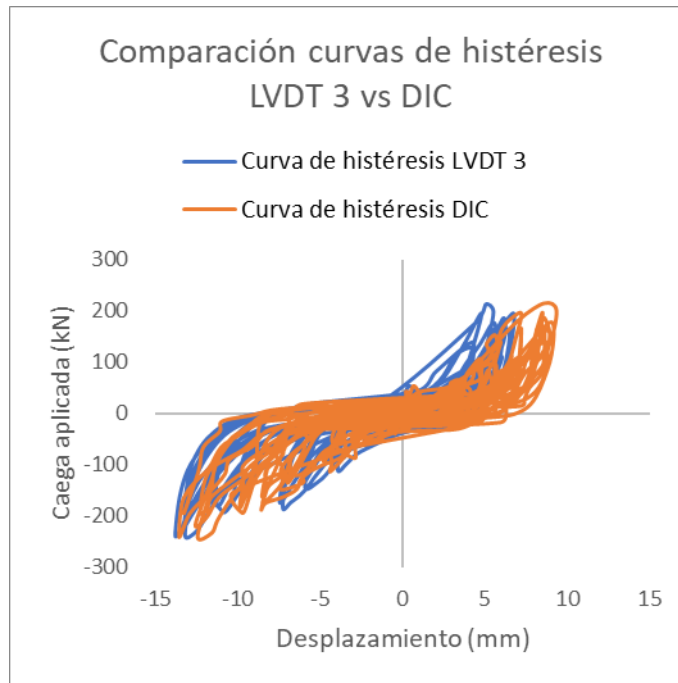


Imagen 70. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para la zona 3.

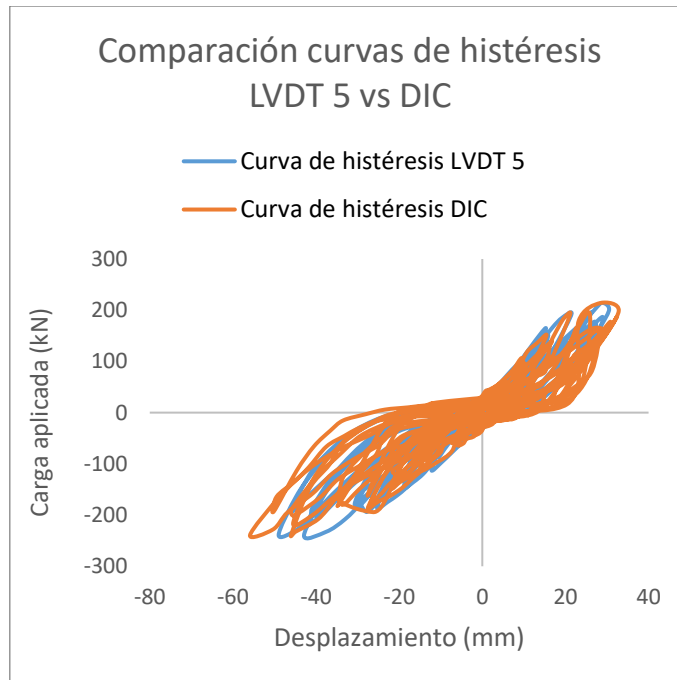


Imagen 71. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para las zonas 5.

6.1.3.2. Desplazamientos verticales (V).

Las mediciones de desplazamientos verticales pertenecen a las zonas 1 y 4.

En el apartado 6.1.1.1 se determinó que, dado los errores suscitados en la prueba los cuales alteraron la toma de datos en la zona 1, los resultados del LVDT no serían tomados en cuenta en la verificación del método, por lo que sus datos se muestran únicamente para completar el ejercicio.

Uniando el Gráfico 1 y el Gráfico 17, se obtiene la comparación de los desplazamientos obtenidos mediante el LVDT 1 y los valores en la zona DIC LVDT 1 (ver Imagen 72).

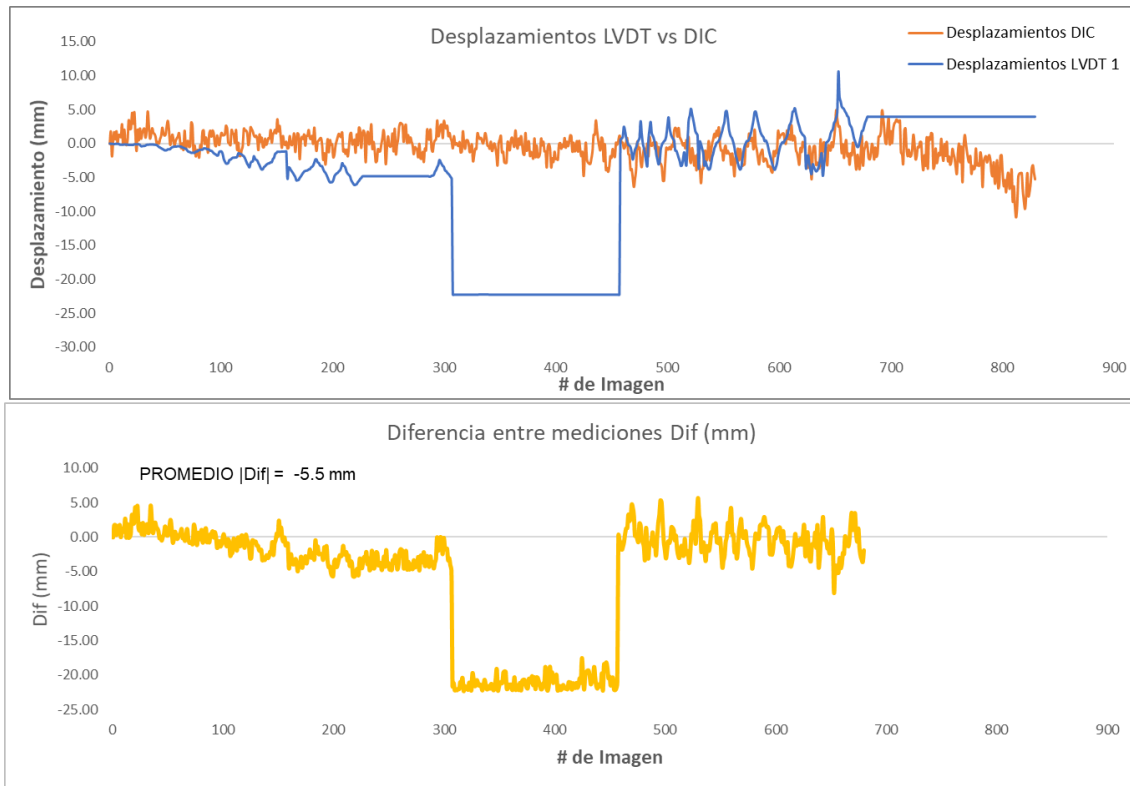


Imagen 72. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 1 (vertical) y la diferencia entre mediciones.

Para la comparación de valores de desplazamiento vertical de la zona 1, se tiene un valor promedio de diferencia de -5.5 mm, con una desviación estándar de 8.5 mm y una diferencia máxima de 22.3 mm. Siendo que estas diferencias ya eran esperadas por la condición de error del LVDT 1 supracitada.

Por último, uniendo el Gráfico 10 y el Gráfico 22, se obtiene la comparación de los desplazamientos obtenidos mediante el LVDT 4 y los valores en la zona DIC LVDT 4 (ver Imagen 73).

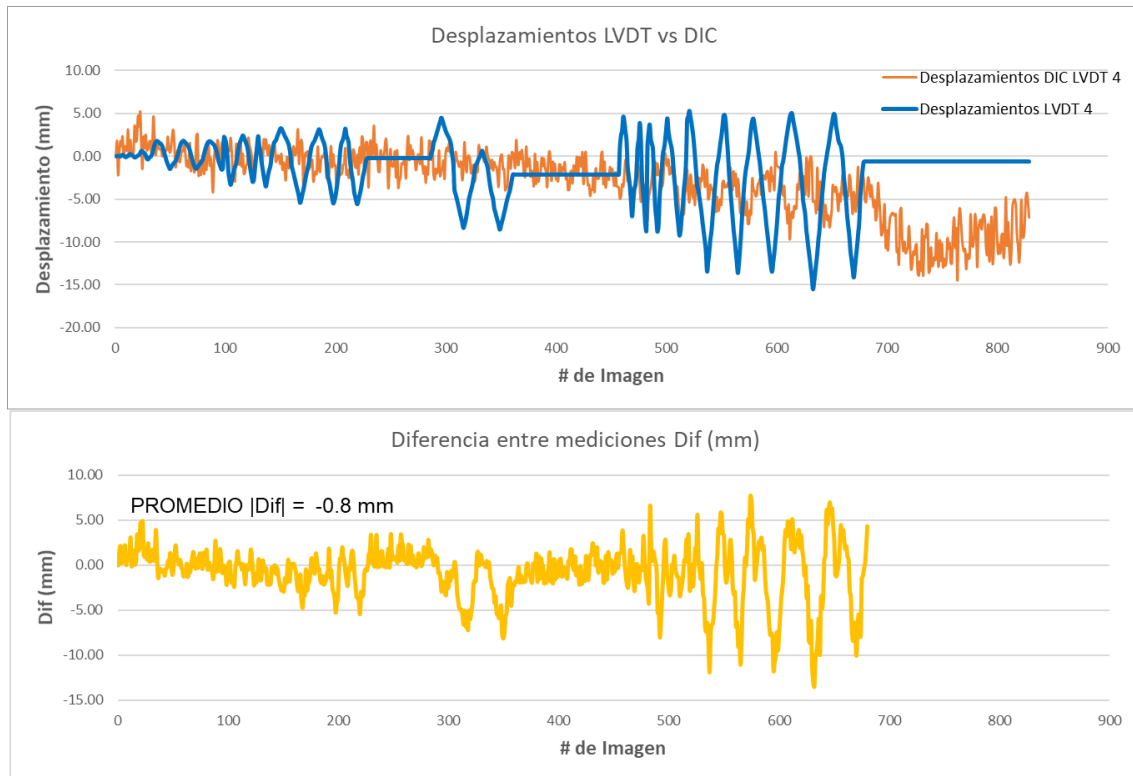


Imagen 73. Comparación de desplazamientos obtenidos con LVDT y la técnica DIC en la zona 4 (vertical) y la diferencia entre mediciones.

De igual forma, para la comparación de valores de desplazamiento vertical de la zona 4, se tiene un valor promedio de diferencia de -0.8 mm, con una desviación estándar de 3.1 mm y una diferencia máxima de 13.4 mm. Si bien es cierto los valores son diferentes, un valor promedio de diferencia de -0.8 mm sigue siendo un valor aceptable para considerar que la técnica DIC es precisa. Cabe notar que, para el caso de los desplazamientos verticales, el patrón de distribución de los desplazamientos es muy diferente entre ambas técnicas y no se da una similitud como si sucede en los patrones horizontales.

De igual manera, se obtienen las curvas de histéresis de cada medición, las cuales se muestran en las dos siguientes imágenes. Es importante notar que, en estos casos, al tener dos patrones de desplazamientos tan distintos, el patrón de la curva de histéresis también muestra mucha diferencia entre ellos.

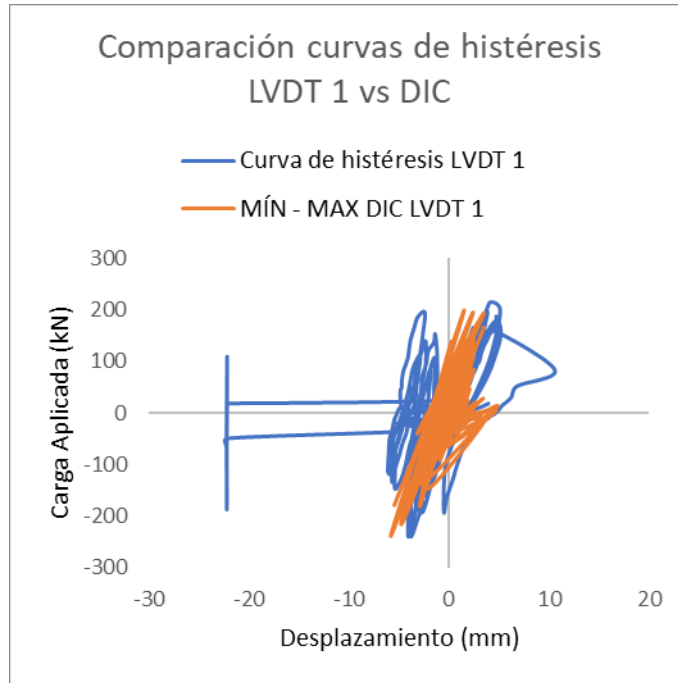


Imagen 74. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para la zona 1.

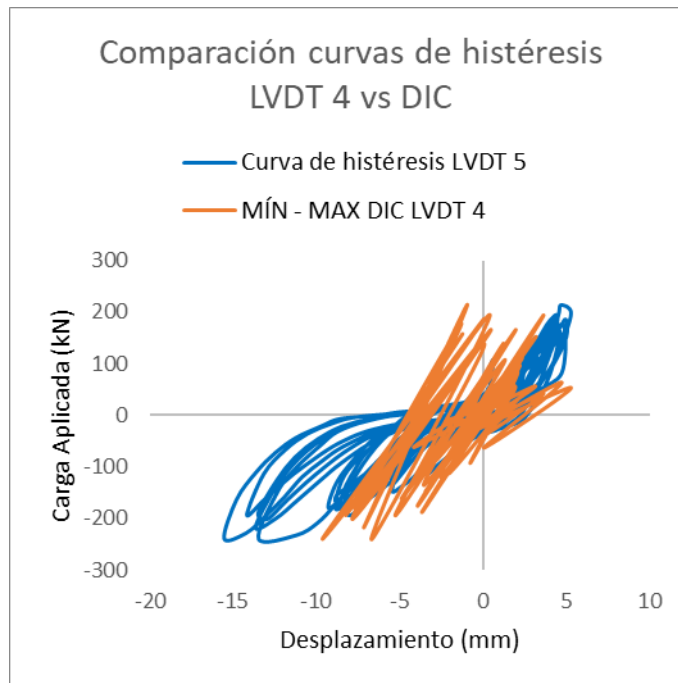


Imagen 75. Comparación de curvas de histéresis obtenidas por medio de LVDT y DIC, para la zona 4.

Cabe destacar que, para este caso, la curva de histéresis se compara con la curva de histéresis generada por los valores máximos y mínimos de los datos DIC, dada la dispersión de estos que se mencionó en el párrafo anterior, es una forma más clara de representarlos.

6.1.3.3. Cálculo de la ductilidad (con base en la ASTM E2126).

Para determinar la ductilidad (D) en el caso de las cargas cíclicas, se usa el método recomendado por la especificación American Society for Testing and Materials (ASTM E 2126-19 (ASTM Intenational, 2019)). De acuerdo con este método, se determina la curva envolvente en el diagrama carga-desplazamiento y se calcula el área (A) bajo la envolvente limitada entre cero y el Δ_u .

Después se determina la curva elastoplástica equivalente (EEEE, por sus siglas en inglés) basándose en que el área bajo esta curva debe ser igual al área bajo la envolvente original. En la Imagen 76, se muestran estos parámetros.

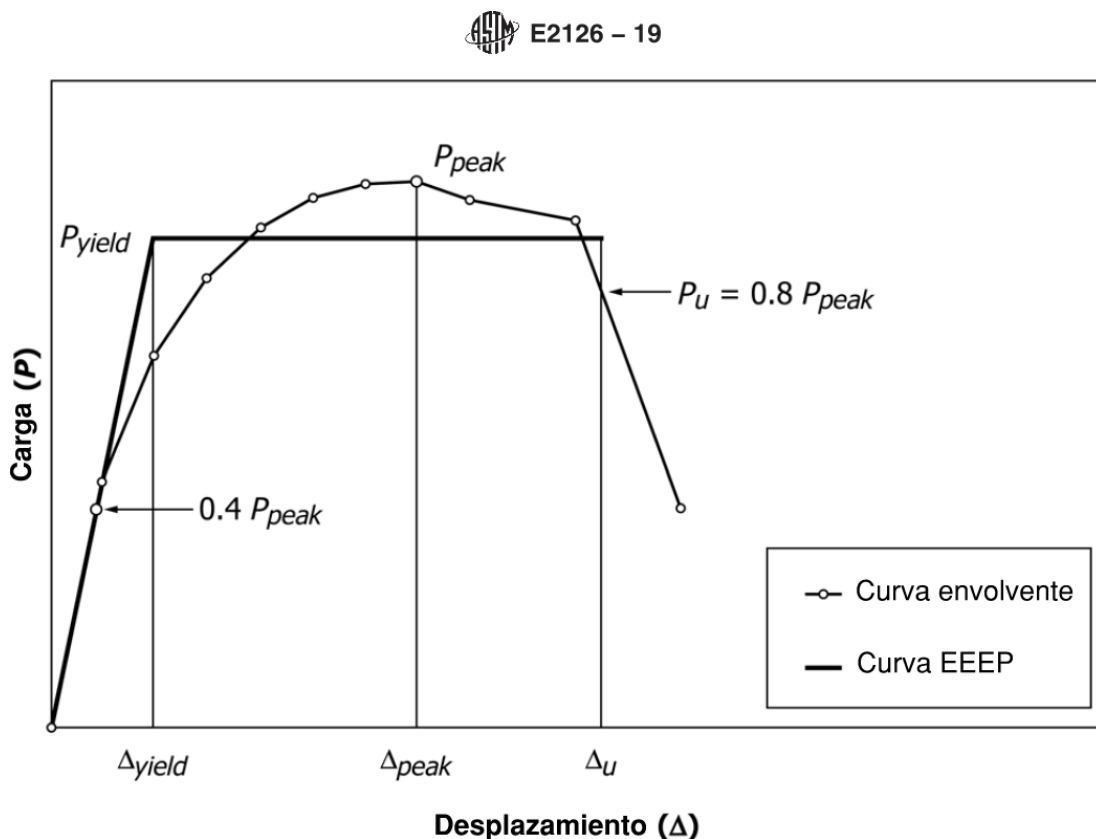


Imagen 76. Parámetros para determinar la ductilidad del muro.

Siguiendo con el método de la curva de histéresis, se debe obtener la Curva envolvente la cual corresponde al lugar geométrico de los extremos de los bucles de histéresis de carga-desplazamiento, que contiene las cargas máximas del primer ciclo de cada fase de la carga cíclica pero no toma en cuenta los puntos en los bucles de histéresis donde el valor absoluto del desplazamiento en la carga máxima es menor que en la fase anterior. Se aplicará este método para la zona DIC LVDT 5.

Para el caso del LVDT, se tiene la curva envolvente en la Imagen 77.

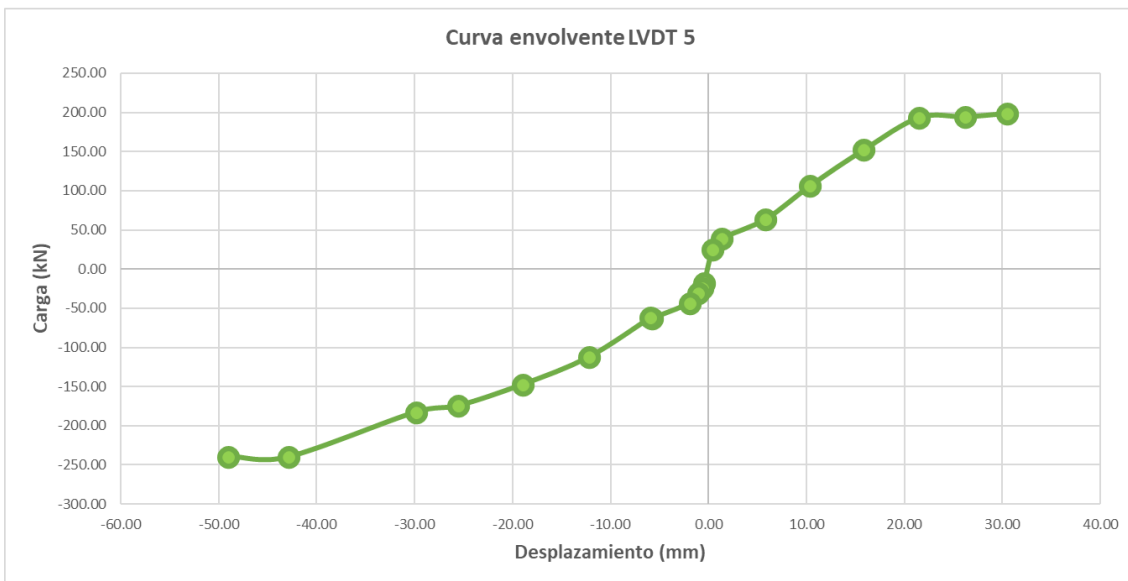
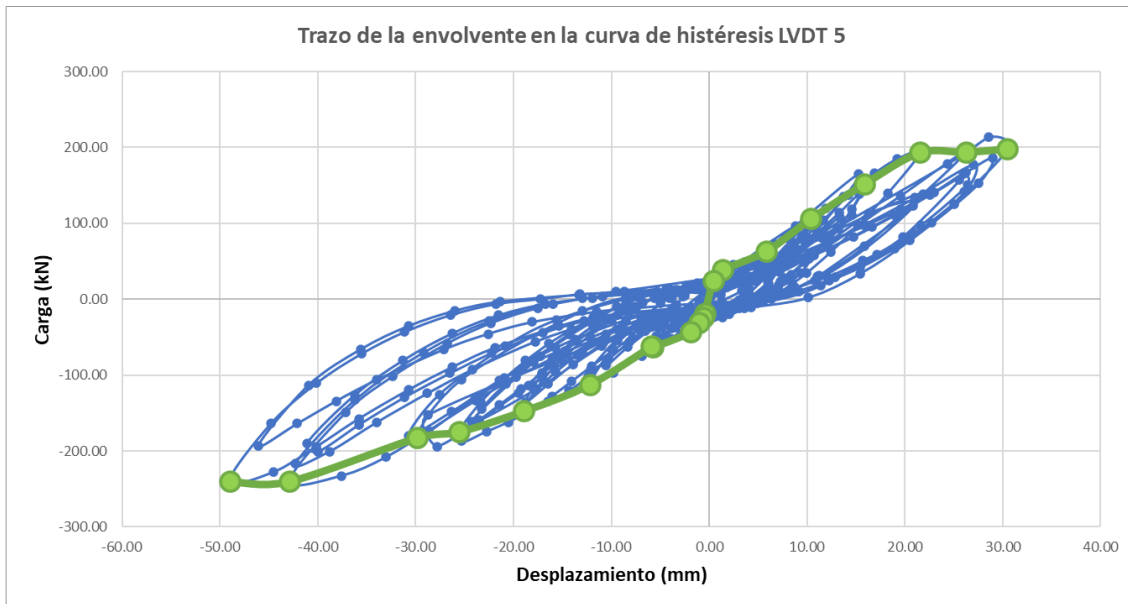


Imagen 77. Curva envolvente obtenida de la Curva de Histéresis del LVDT 5.

Para el caso de la zona DIC LVDT 5, se tiene la Imagen 78.

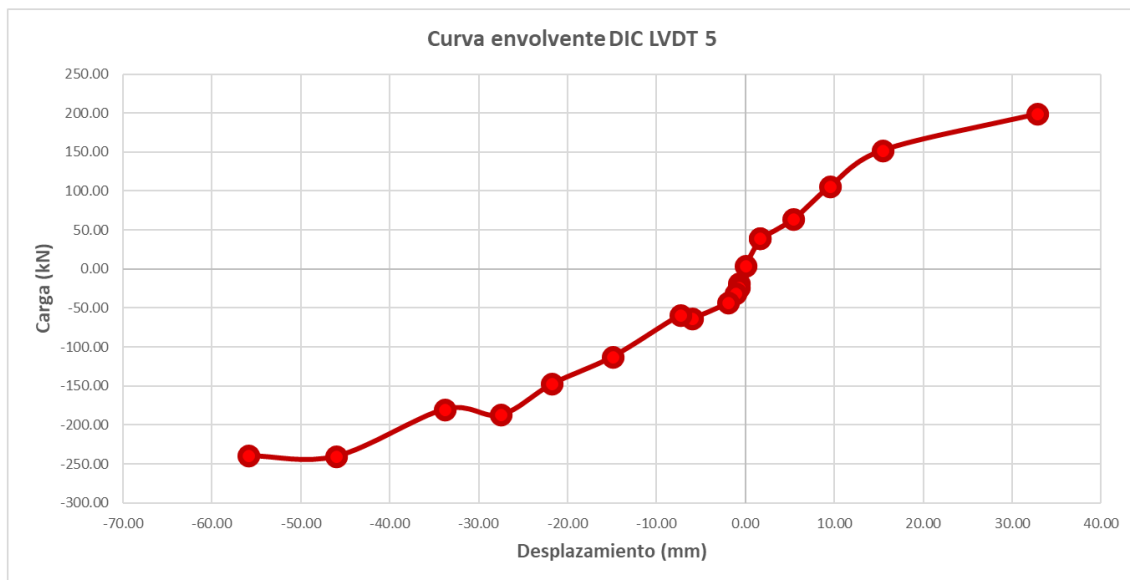
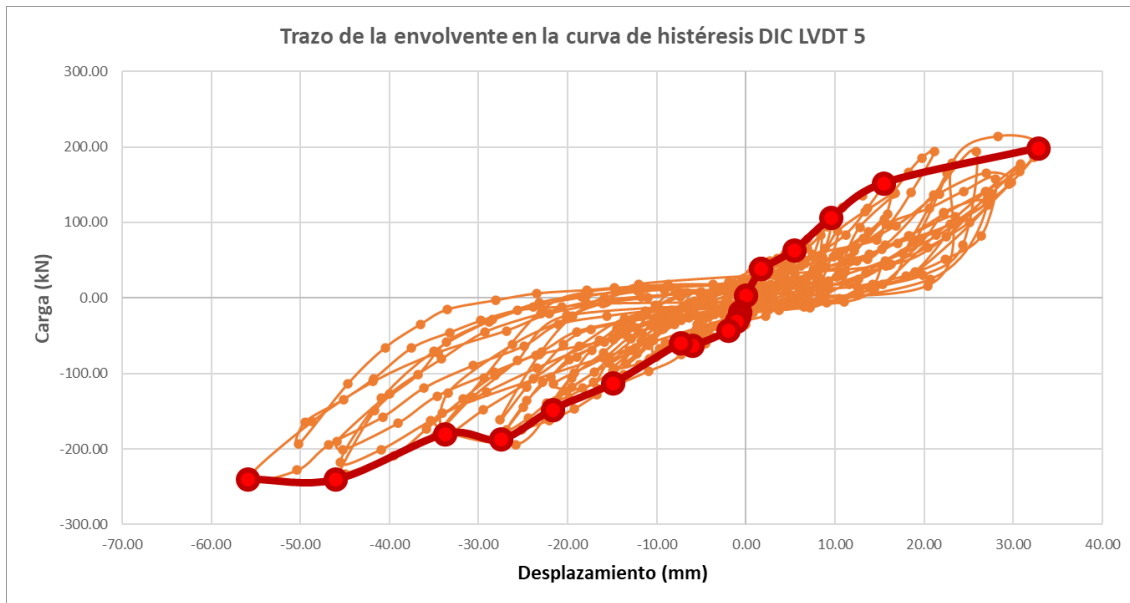


Imagen 78. Curva envolvente obtenida de la Curva de Histéresis del DIC LVDT 5.

De las imágenes anteriores, es de notar que existe una asimetría en el comportamiento de la muestra en negativo y en positivo. Para ello, el apéndice X4.1 de la norma ASTM E2129 indica que, aunque se pueden analizar las curvas envolventes positivas y negativas para un espécimen individualmente e informar la respuesta correspondiente parámetros sin promediar, para el cálculo de los parámetros de rendimiento promedio puede haber una diferencia si la respuesta es asimétrica. En las prácticas de laboratorio, las respuestas de la mayoría de las pruebas de pared son asimétricas hasta cierto punto, ya que el daño creado con una excursión positiva inicial tiende a debilitar la respuesta de la excursión negativa posterior dentro del mismo ciclo.

La determinación de los parámetros de respuesta promedio para una muestra con curvas envolventes positivas y negativas diferentes mediante el análisis individual y luego obtener el promedio, puede dar como resultado estimaciones no conservadoras del rendimiento. Por lo tanto, es el juicio del comité ASTM que cuando se usa un conjunto de parámetros, para resumir la respuesta de la muestra para propósitos de diseño estructural, los parámetros deben calcularse a partir de la envolvente promedio como el método principal de análisis. El uso de este enfoque reduce el no conservadurismo de una pared moderadamente asimétrica.

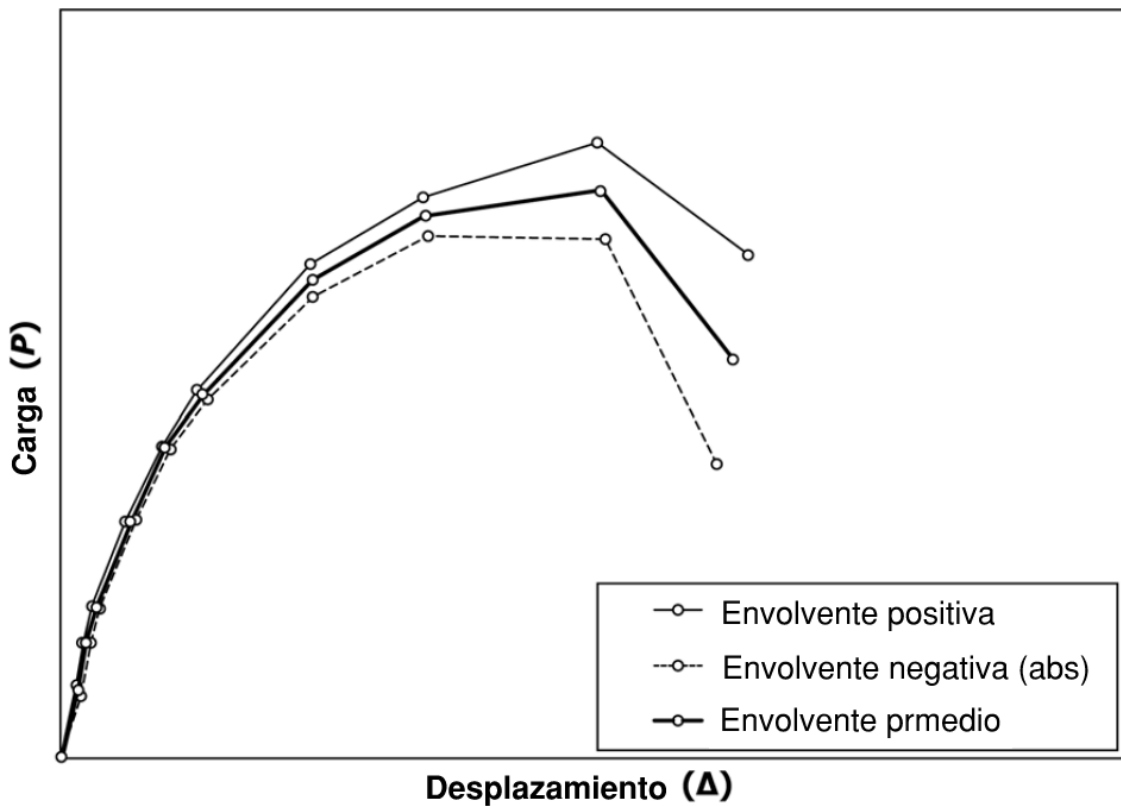


Imagen 79. Ejemplo del cálculo de la envolvente promedio.

De esta forma, se tiene la envolvente promedio para el caso del LVDT 5 en la Imagen 80.

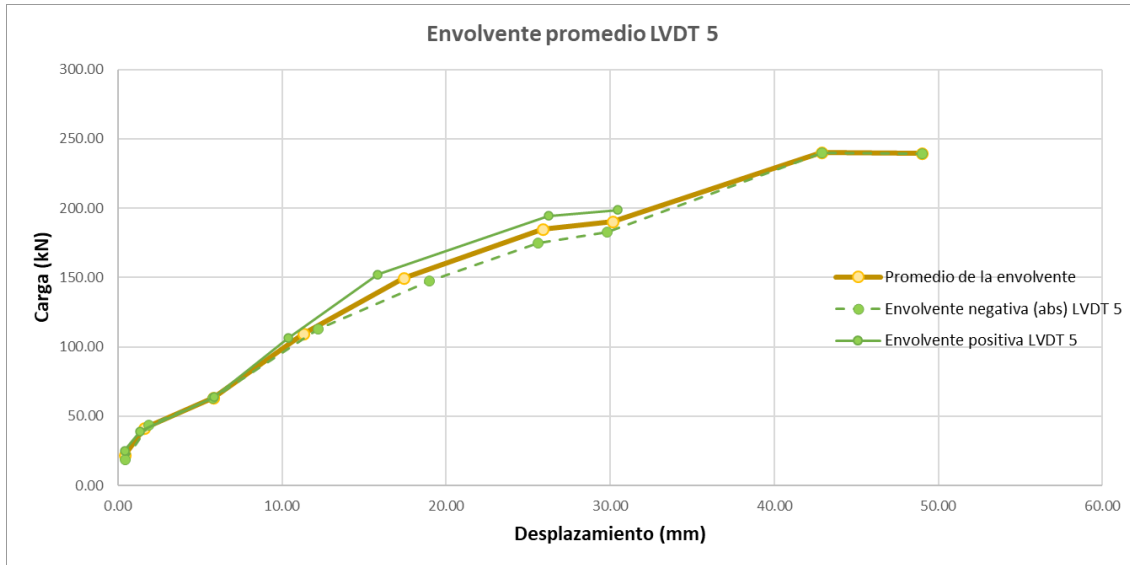


Imagen 80. Envolvente promedio para el LVDT 5.

Con la curva promedio se procede entonces a extraer los parámetros para el montaje de la Curva EEEP y al cálculo de la carga de cedencia o fluencia (P_{yield}) de acuerdo con la siguiente fórmula (ASTM International, 2019):

$$P_{yield} = \left(\Delta_u - \sqrt{\Delta_u^2 - \frac{2A}{K_e}} \right) K_e$$

Donde;

P_{yield} = Carga de cedencia o fluencia.

A = El área bajo la curva envolvente, desde cero hasta el Δ_u del espécimen.

Δ_u = Desplazamiento último del espécimen (mm).

P_{peak} = Carga máxima absoluta resistida por el espécimen, determinada en la curva envolvente.

Δ_e = Desplazamiento del borde superior del espécimen, donde la carga es igual a $0.4 P_{peak}$ (mm).

$K_e = 0.4 P_{peak} / \Delta_e$ = Rigidez elástica a cortante

Con los datos de la envolvente LVDT 5, se extraen los parámetros requeridos y se calcula la carga de cedencia, para posteriormente obtener la curva EEEP (ver Imagen 81).

Parámetros:

$P_{peak} = 240.03 \text{ kN}$
 $\Delta_{peak} = 42.90 \text{ mm}$
 $K_e = 0.4 P_{peak} = 96.01 \text{ kN/mm}$
 $A = 7,950.22 \text{ kN-mm}$ [calculada gráficamente]
 $P_u = 192.03 \text{ kN}$
 $\Delta_u = 49.00 \text{ mm}$

$P_{yield} = 206.07 \text{ kN}$
 $\Delta_{yield} = 20.83 \text{ mm}$

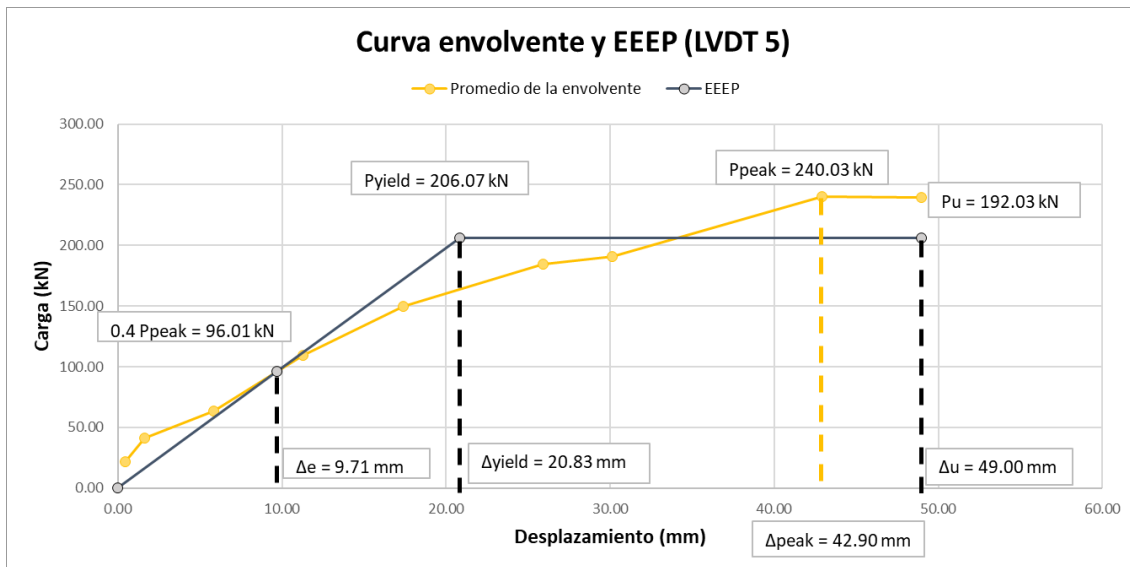


Imagen 81. Curva envolvente y EEEP obtenida de los datos del LVDT 5.

Ductilidad:

La ductilidad viene dada de la relación entre el $\Delta_u / \Delta_{yield}$;

$$D_{LVDT5} = \frac{49.00}{20.83} = 2.4$$

En el caso del DIC LVDT 5, se tiene la envolvente promedio en la Imagen 82 y los parámetro y curva EEEP en la Imagen 83.

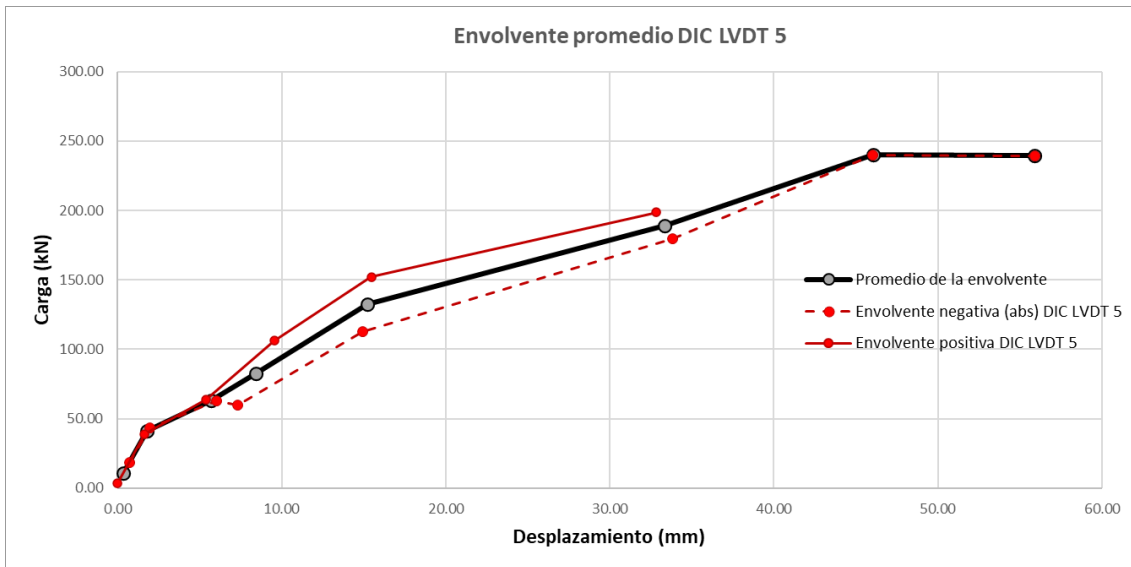


Imagen 82. Envolvente promedio para el DIC LVDT 5.

Parámetros:

$$P_{\text{peak}} = 240.03 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{peak}} = 55.89 \text{ mm}$$

$$K_e = 0.4 P_{\text{peak}} = 9.37 \text{ kN/mm}$$

$$A = 9,174.24 \text{ kN-mm [calculada gráficamente]}$$

$$P_u = 192.03 \text{ kN}$$

$$\Delta_u = 55.89 \text{ mm}$$

$$P_{\text{yield}} = 203.80 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{yield}} = 21.74 \text{ mm}$$

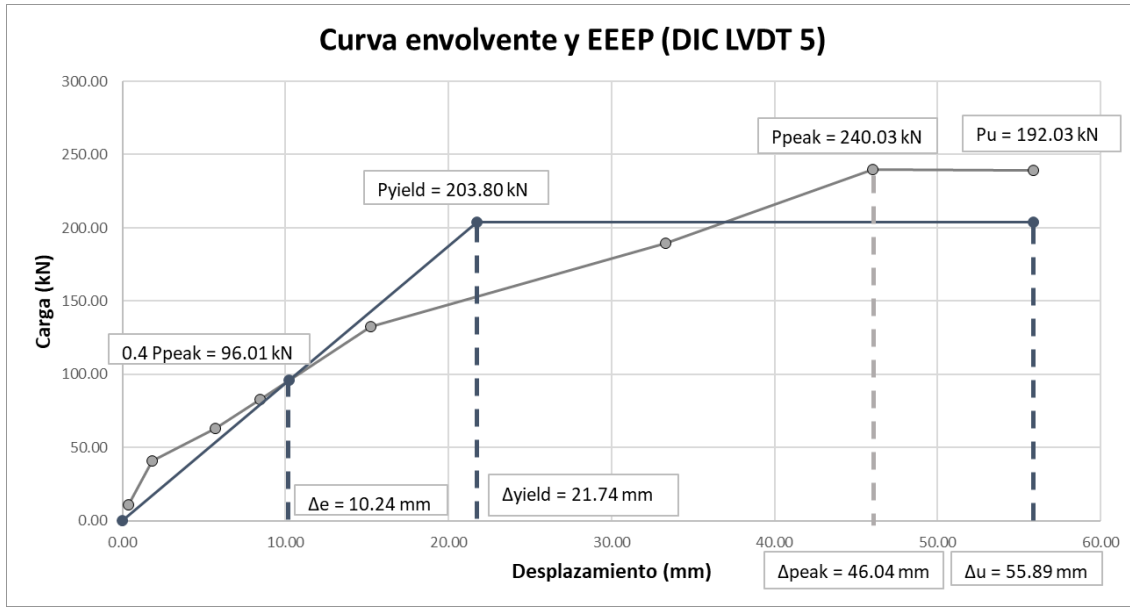


Imagen 83. Curva envolvente y EEEP obtenida de los datos del DIC LVDT 5.

Se tiene entonces que la ductilidad corresponde a:

$$D_{DIC LVDT5} = \frac{55.89}{21.74} = 2.57$$

Los valores obtenidos por medio de los datos del LVDT difieren en un 9.2% de los obtenidos por el DIC, lo cual es de esperarse por las aproximaciones en cuanto a la ubicación de la zona del DIC en relación con la zona donde el LVDT toma los datos. El DIC toma los datos en la superficie de la mampostería y el LVDT en el borde del marco de concreto, aun así, los valores difieren en una proporción menor al 10%.

6.1.3.4. Resumen.

Resumiendo, los datos obtenidos para cada comparación de los desplazamientos, se tiene la Tabla 10, la cual muestra para cada punto de medición, cuáles son las diferencias promedio entre todos los datos, siendo que **(Dif)** representa el valor absoluto de diferencia entre el desplazamiento LVDT y el desplazamiento obtenido por DIC. Adicionalmente, para tener una idea de la dispersión de estas diferencias y cuanto se alejan en promedio del valor medio, se muestra la desviación estándar. Por último, se indica también el valor máximo de diferencia obtenido entre todos los datos.

Tabla 10. Diferencia promedio, desviación estándar y diferencia máxima de mediciones de los desplazamientos entre LVDT y DIC.

Dirección	Punto de medición	Dif _{prom} (mm)	Desviación Estándar (mm)	Dif _{máx} (mm)
Horizontal	LVDT 2	0.4	1.6	5.0
Horizontal	LVDT 3	0.5	1.7	5.6
Horizontal	LVDT 5	0.6	3.4	5.4
Vertical	LVDT 1	-5.5	8.5	22.3
Vertical	LVDT 4	-0.8	3.1	13.4

De la Tabla 10, se puede observar para los valores de desplazamientos horizontales que los valores promedio de diferencia absoluta entre mediciones tienen un valor que ronda los 0.5 mm en promedio, no obstante, este dato no da una apreciación correcta, pues su valor promedio no da cuenta de las distintas diferencias obtenidas. Para subsanar lo anterior, se calcula la dispersión de datos, la cual para las dos primeras filas presenta una desviación estándar que se mantiene en un rango menor a los 2mm. La tercera fila de los desplazamientos horizontales tiene una desviación estándar mayor a las dos anteriores y que se debe principalmente a que el LVDT 5 por su ubicación en la zona más alejada de la base, es el que registra los valores más altos de desplazamientos.

Para los valores verticales, es importante tomar en cuenta que la fila 1 muestra las diferencias obtenidas con la medición “alterada” del LVDT 1, tal como se indicó en el apartado 6.1.1.1 y por tanto no sirve para verificar la técnica; adicionalmente que el valor de diferencia máximo obtenido es de poco más de 22 mm. No obstante, para la fila 5 se tiene un valor promedio de -0.8 mm y una desviación estándar muy similar al obtenido en la fila 3 así como una diferencia máxima muy similar a las encontradas en las mediciones horizontales.

Debe tomarse en cuenta que las mediciones del DIC están tomadas en zonas cercanas a donde se tomaron las mediciones de los LVDT y también que los valores DIC se obtienen en la mampostería directamente mientras que los LVDT toman sus datos en el elemento de concreto reforzado. Así mismo, el patrón de manchas impregnado no llega a cubrir la totalidad del espécimen dado que, por definición de este proyecto, la idea fue valorar el comportamiento mecánico de la mampostería. Por otro lado, los datos obtenidos con el software de correlación son valores promedio del

subconjunto elegido para cada zona, pues cada punto tiene su movimiento definido pero el análisis requiere que se defina una Región de Interés (ROI) y, por ende, al tener los resultados, se toma un valor promedio de los mismos.

También, cabe recalcar que esta técnica se implementó en un único espécimen dada la disponibilidad y tiempo de aplicación y que, en una futura aplicación, se puede implementar la técnica en mayor cantidad de muros, de manera que se logre una mejor calibración del método.

De igual forma, como se mencionó en el apartado 4.2.2, la precisión de la medición de DIC está influenciada por múltiples factores, siendo que es muy difícil y en algunos casos hasta imposible, determinar exactamente los errores de la medición.

Dicho lo anterior y tomando en cuenta que los gráficos comparativos muestran prácticamente el mismo patrón de desplazamientos en cada medición y que las diferencias encontradas muestran diferencias en promedio menores a 1mm, se puede concluir que la técnica DIC implementada es precisa y confiable, pues los resultados del DIC son cercanos a los valores de los LVDT, a pesar de todas las condiciones diferenciadas que existen en la toma de datos.

6.2. Campos de deformación

6.2.1. Deformación obtenida de las Galgas de Deformación.

En las imágenes siguientes se muestran las ubicaciones esquemáticas de las cinco galgas de deformación y los datos obtenidos. Cabe indicar que, para este proyecto, únicamente funcionaron tres galgas durante la prueba que corresponden a SG0, SG1 y SG2, las otras dos no registraron datos por encontrarse dañadas. Por otra parte, es importante aclarar que estas galgas son colocadas internamente en el acero de refuerzo para obtener el comportamiento a la fluencia del acero.

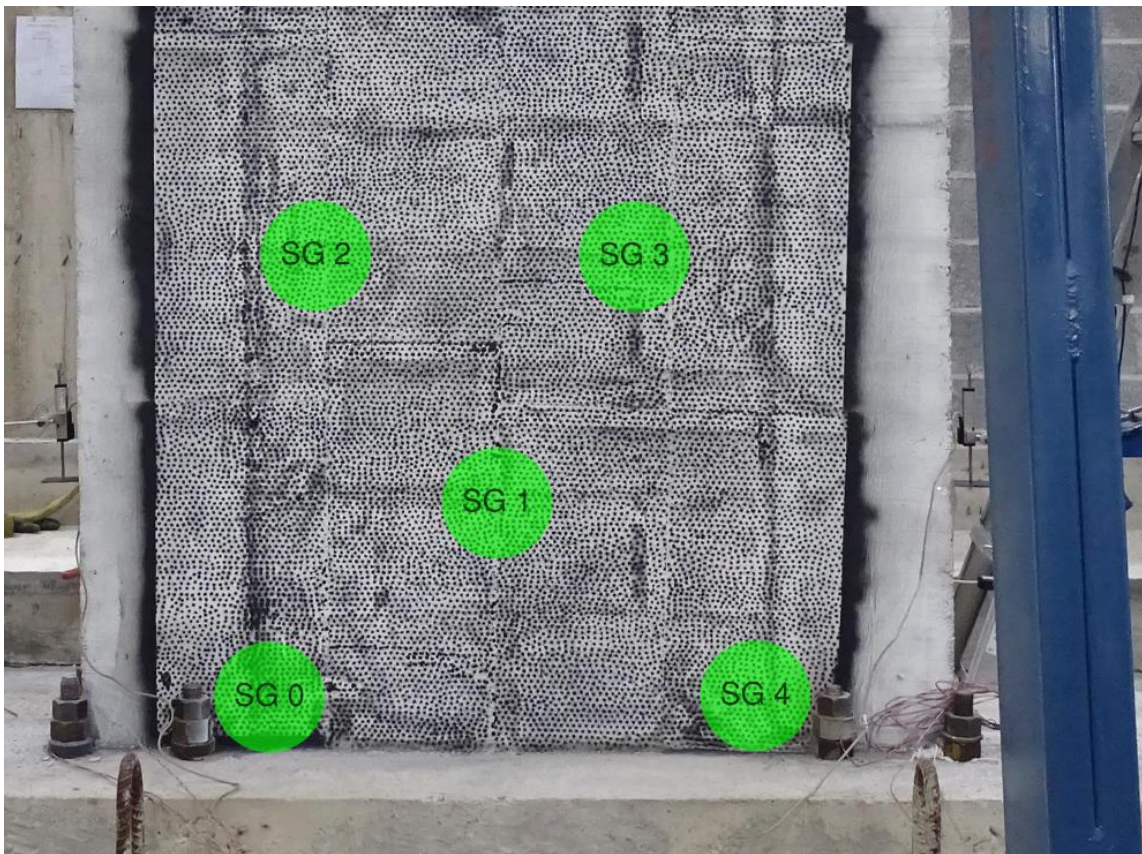


Imagen 84. Ubicación esquemática de las galgas de deformación (SG, Strain Gages). Lanamme-UCR

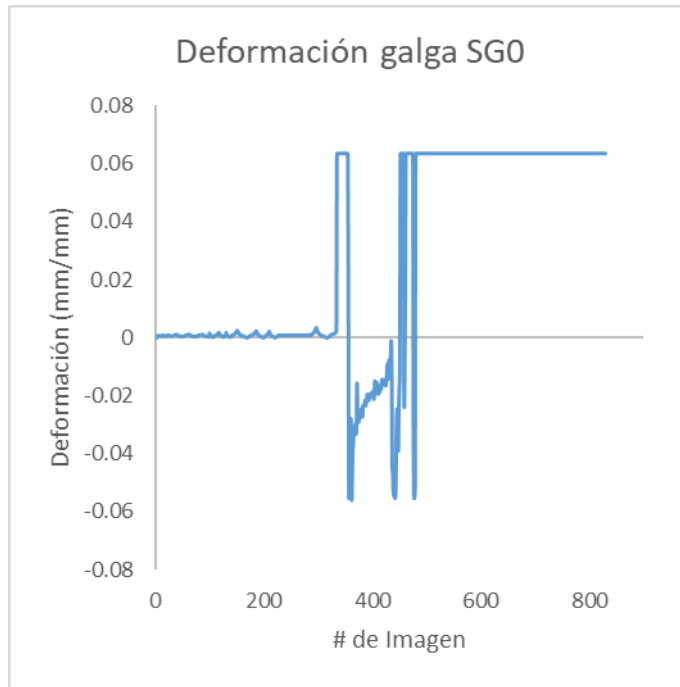


Imagen 85. Deformación obtenida por las galgas extensiométricas instaladas en el acero de refuerzo para la zona SG0.

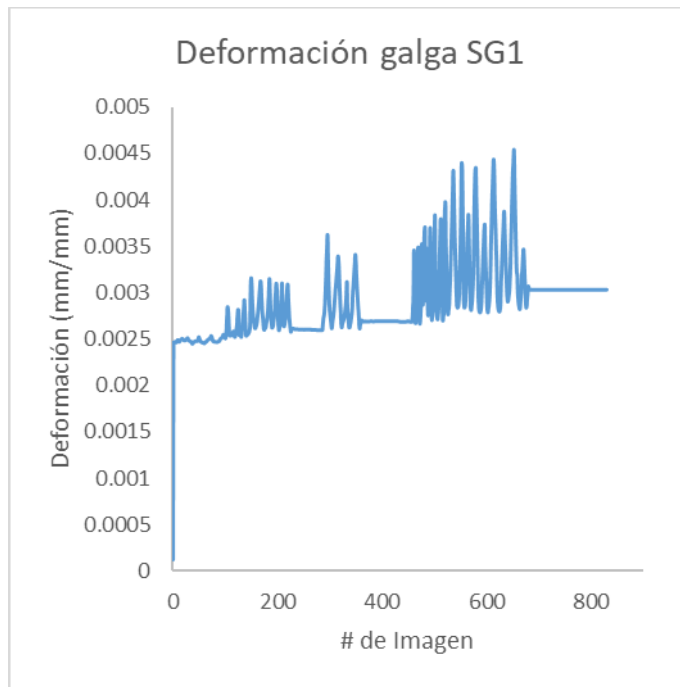


Imagen 86. Deformación obtenida por las galgas extensiométricas instaladas en el acero de refuerzo para la zona SG1.

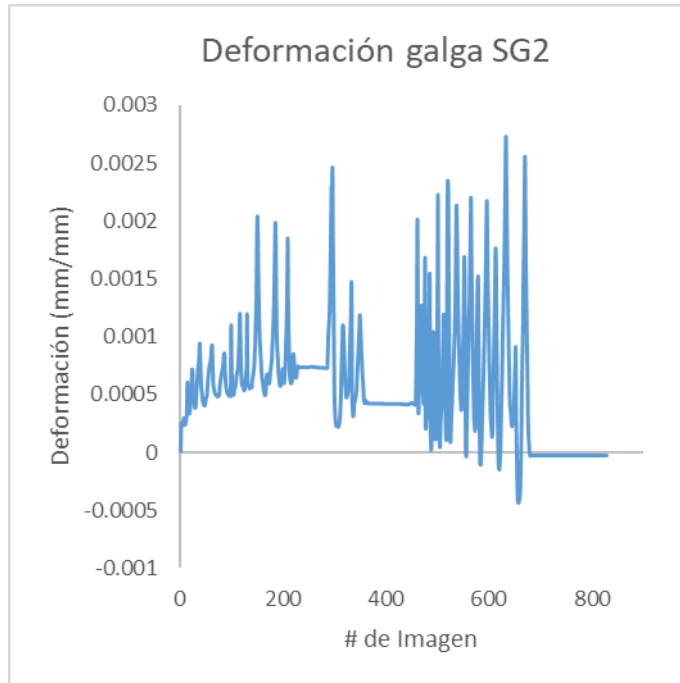


Imagen 87. Deformación obtenida por las galgas extensiométricas instaladas en el acero de refuerzo para la zona SG2.

6.2.2. Deformación obtenida de 2D-DIC.

Dado que el DIC registra deformaciones en la mampostería y las galgas en el acero, no se tomarán como punto de comparación con los resultados del apartado anterior, sin embargo, se obtuvieron los datos de la deformación total utilizando la técnica del DIC en las zonas o regiones de interés que se marcan en la Imagen 88.

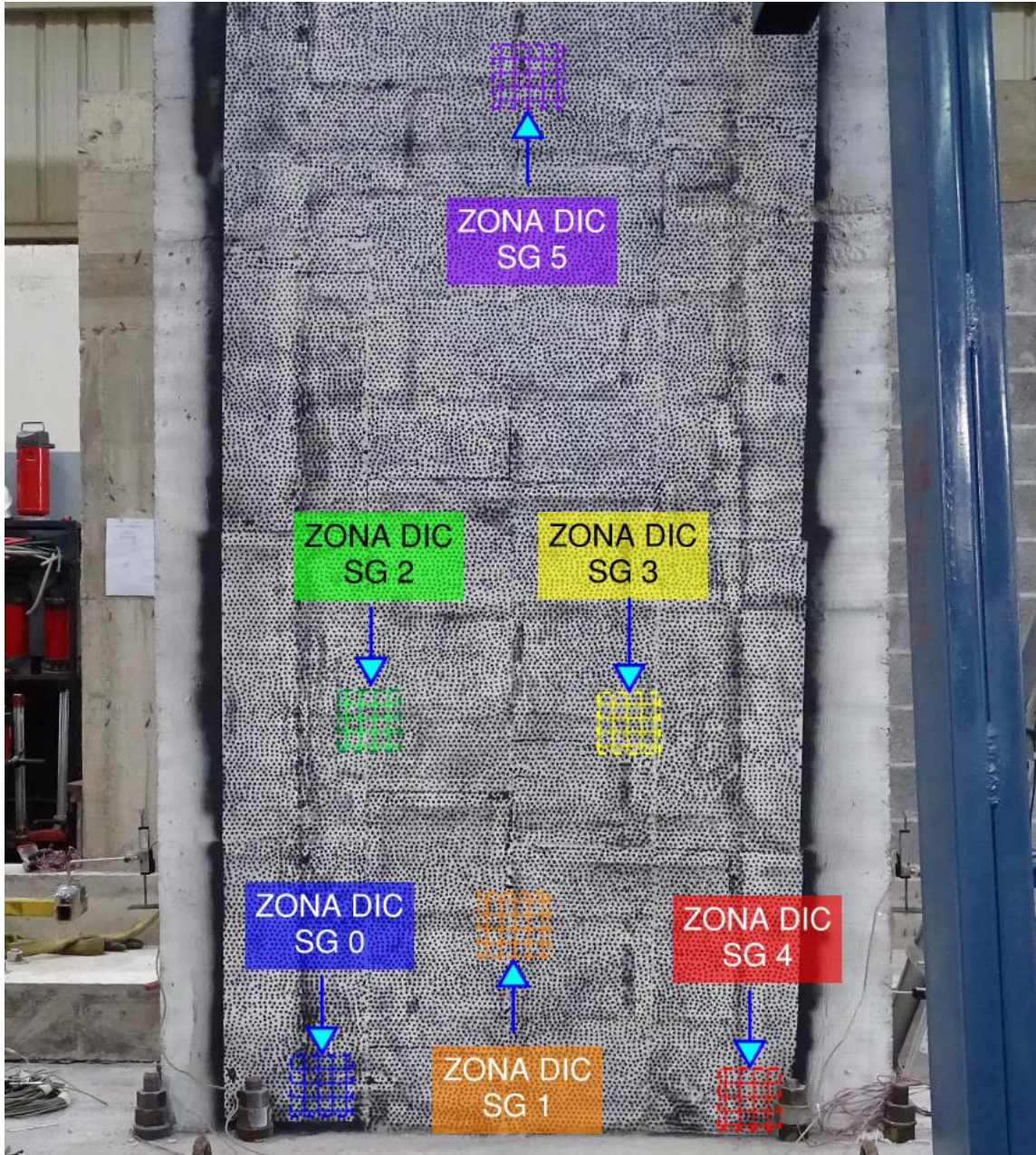


Imagen 88. Zona DIC o Región de Interés definidas para mostrar resultados de deformación obtenidos por la técnica DIC (SG, Strain Gages). Matlab.

Las zonas del 0 a 4 coinciden con la ubicación de las galgas extensiométricas y la zona 5 es cercana a donde ocurren agrietamientos, por ende, esta última se definió para ver el comportamiento de las deformaciones en este punto.

En las siguientes dos imágenes se muestran los gráficos respectivos deformación total versus el número de imagen para cada zona.

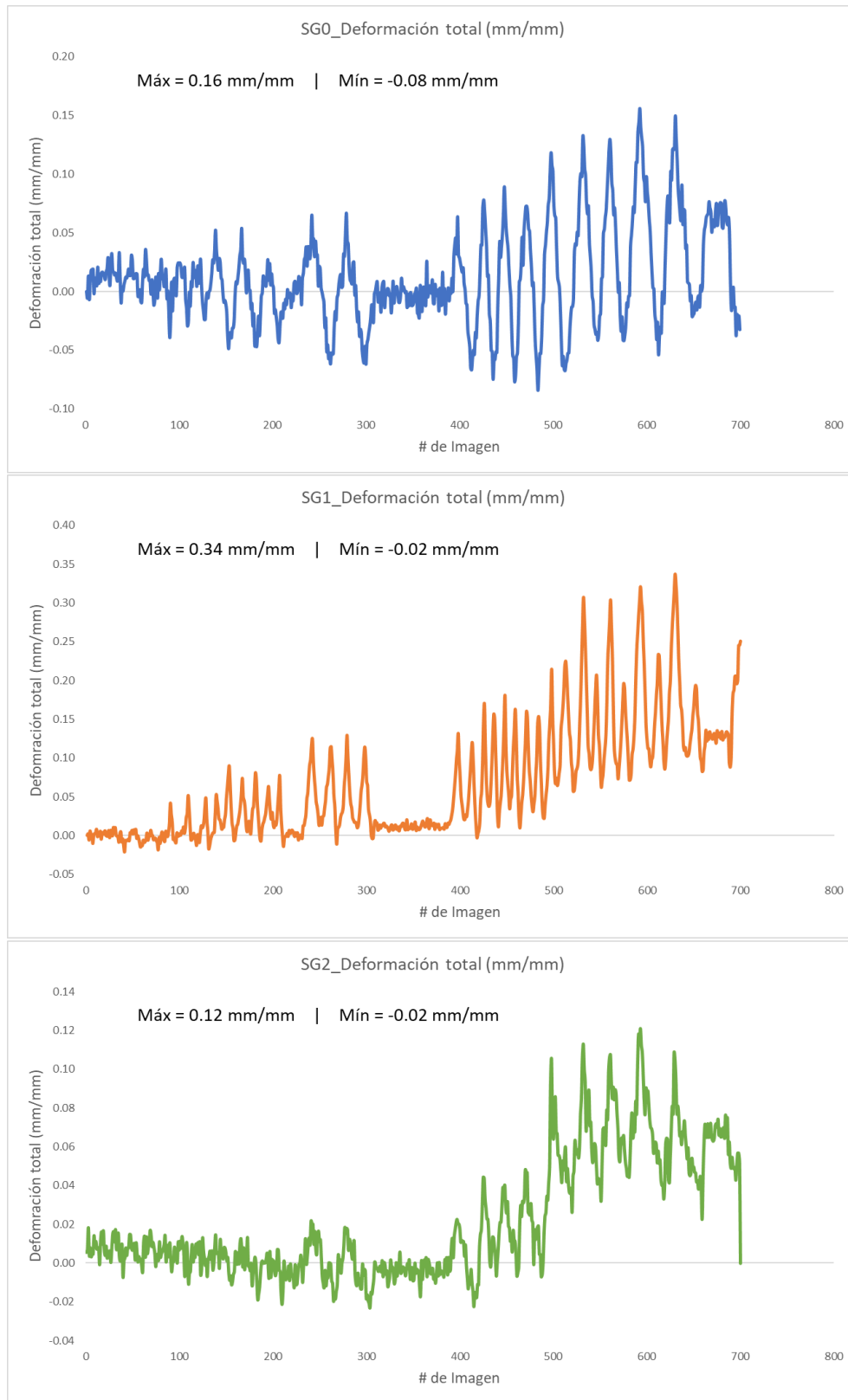


Imagen 89. Deformación total en zonas 0, 1 y 2, obtenidas mediante la técnica DIC.

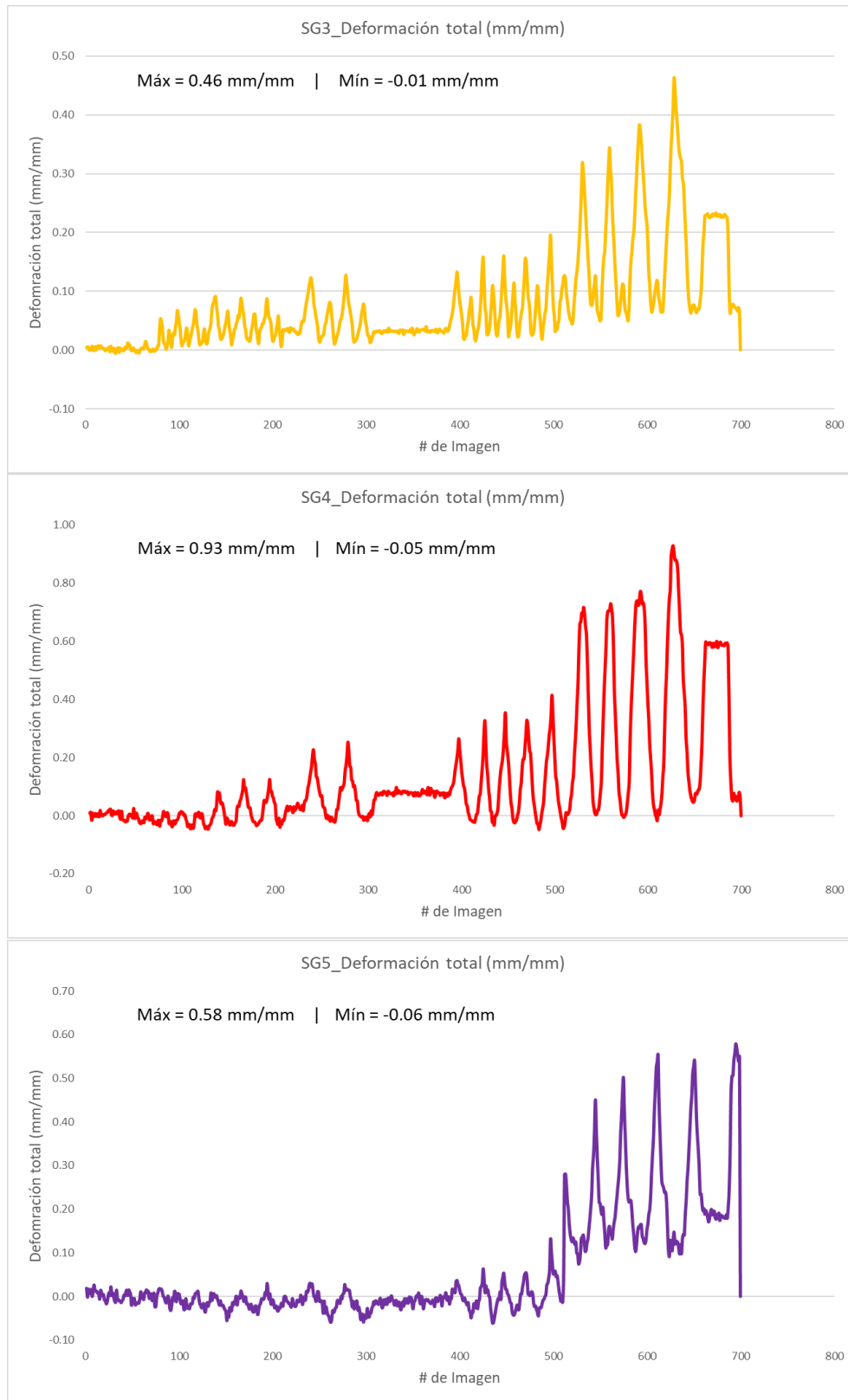


Imagen 90. Deformación total en zonas 3,4 y 5, obtenidas mediante la técnica DIC.

La Tabla 11, resume los valores máximos y mínimos de deformación unitaria encontrados para estas zonas.

Tabla 11. Valores máximos y mínimos de deformación encontrados en las zonas DIC definidas.

	SG0 (mm/mm)	SG1 (mm/mm)	SG2 (mm/mm)	SG3 (mm/mm)	SG4 (mm/mm)	SG5 (mm/mm)
Max	0.16	0.34	0.12	0.46	0.93	0.58
Mín	-0.08	-0.02	-0.02	-0.01	-0.05	-0.06

Como se nota en la tabla anterior, se tienen valores de deformación menores a 1 mm/mm, al menos para las zonas definidas por el autor. Esto también da a conocer que la lectura que se logra obtener con la Correlación Digital de Imágenes durante la falla tiene precisión pues se logra captar esos pequeños movimientos que ocurren durante todo el proceso y que permiten cuantificar lo que el muro está percibiendo al ser sometido a una aplicación de carga. Lo anterior también es posible ver en el siguiente gráfico, el cual compara todas las deformaciones encontradas en cada zona. La zona SG4 muestra las deformaciones más altas que corresponde a la esquina del muro donde, como se explicó, es una de las zonas que tiende a sufrir más daño; así mismo las menores deformaciones se encuentran en la SG0, la cual corresponde a la esquina opuesta.

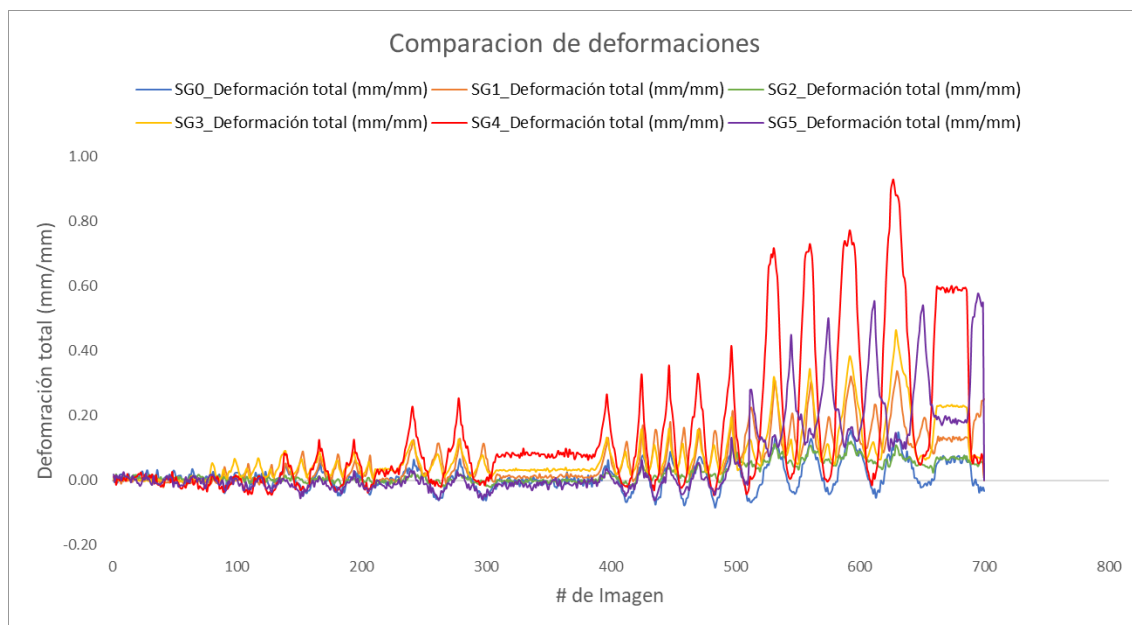


Gráfico 27. Comparación de deformaciones obtenidas mediante el DIC para cada zona.

Con la verificación de los resultados de la técnica de la Correlación a nivel de desplazamientos, existe confianza de que los resultados obtenidos a nivel de deformación son precisos. Adicionalmente, estos valores que son registrados punto a punto en la superficie del muro permiten tener una claridad completa de cómo será el comportamiento mecánico de la muestra, y determinar si existen concentraciones de deformación que nos permitan saber dónde fallará el muro con antelación, así mismo si ocurre un comportamiento atípico o no esperable en la zona entre la mampostería y el marco de concreto o en alguna sección en específico. En el siguiente apartado, se expone el comportamiento mecánico de la falla a un nivel gráfico de campo completo, por lo que se podrá comprender mejor este tema.

6.3. Comportamiento mecánico de la falla.

Para conocer el comportamiento mecánico de la falla, es importante conocer todo el campo de desplazamientos y todo el campo de deformaciones que existe en el muro. En los apartados anteriores, con el fin de verificar los resultados de la técnica empleada, se lograron determinar los desplazamientos y deformaciones para puntos específicos, no obstante, con la técnica de correlación de imágenes y el uso del programa Matlab, es posible también visualizar la globalidad de lo que ocurre en el muro mientras está siendo sometido a carga y tener una idea muy clara de cómo es el comportamiento mecánico, para determinar si existen concentraciones de esfuerzos que permitan predecir donde fallará el muro o cómo se comporta la junta entre la mampostería y los elementos de concreto reforzado.

Con el **Código A**, utilizando la misma explicación que en el apartado 6.1.2, es posible definir como región de interés toda la superficie del muro visible (ver Imagen 91).

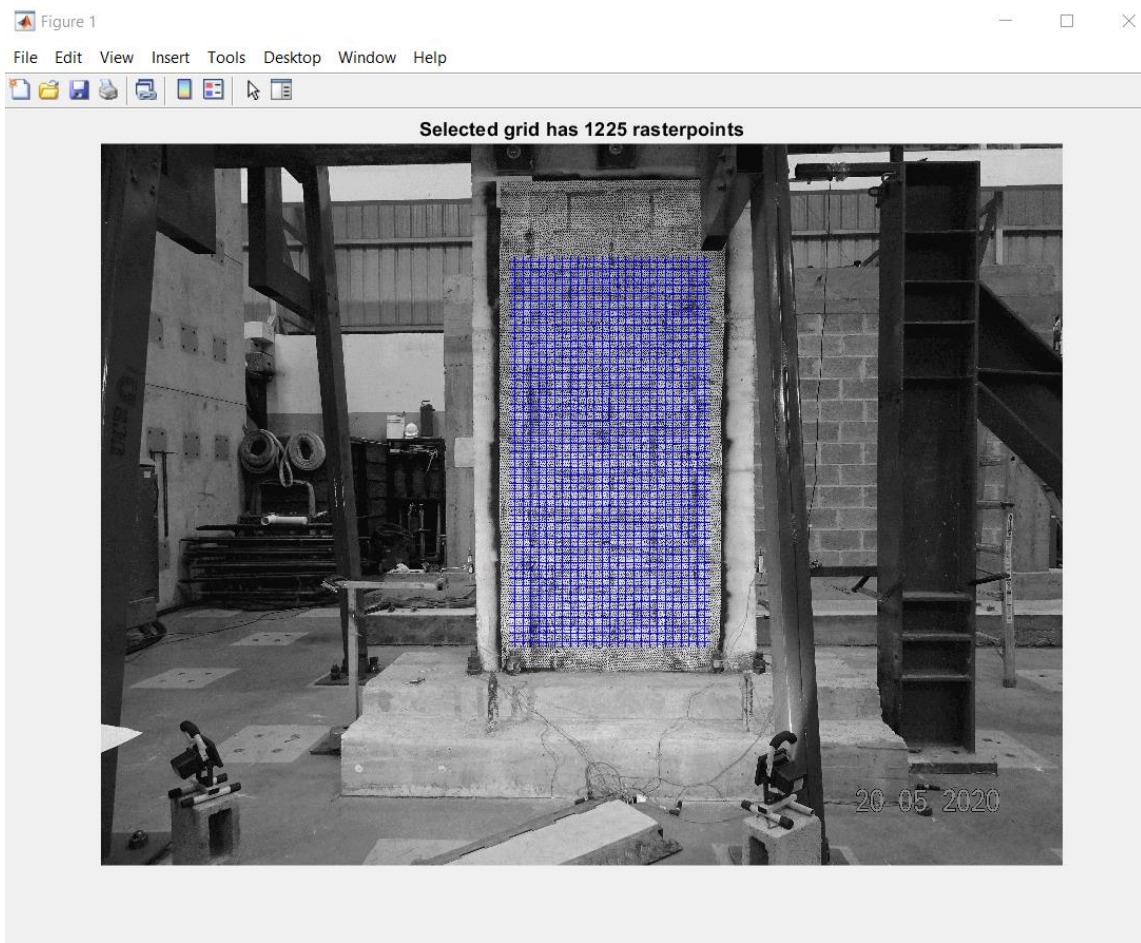


Imagen 91. Definición de la región de interés en la superficie visible (sin obstrucción) del muro.

De esta forma, una vez que el programa realiza su corrida de todos los marcadores, se obtiene todo el campo de desplazamientos horizontales U (ver Imagen 92), verticales V (ver Imagen 93) y todo el campo de deformaciones que se muestra en la Imagen 94, así como la gráfica deformación real vs imágenes que se puede visualizar en la Imagen 95. La secuencia completa de imágenes se encuentra en el **Anexo 7**.

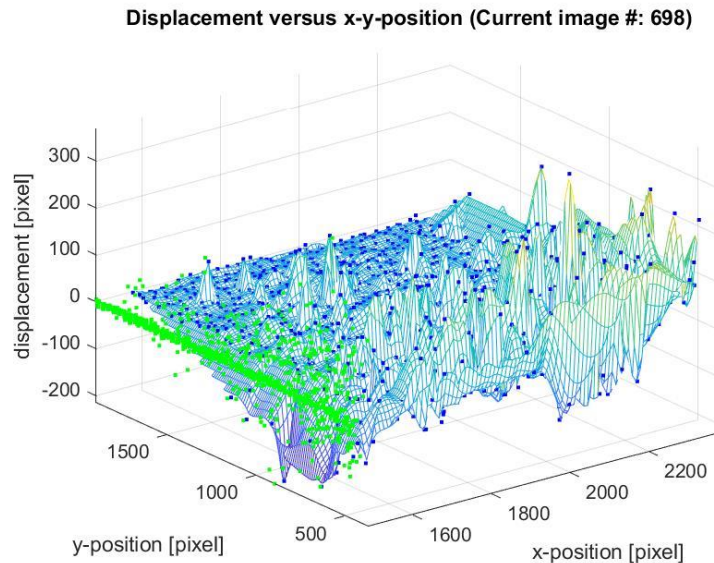


Imagen 92. Campo de desplazamientos horizontales U obtenido con el código 1.

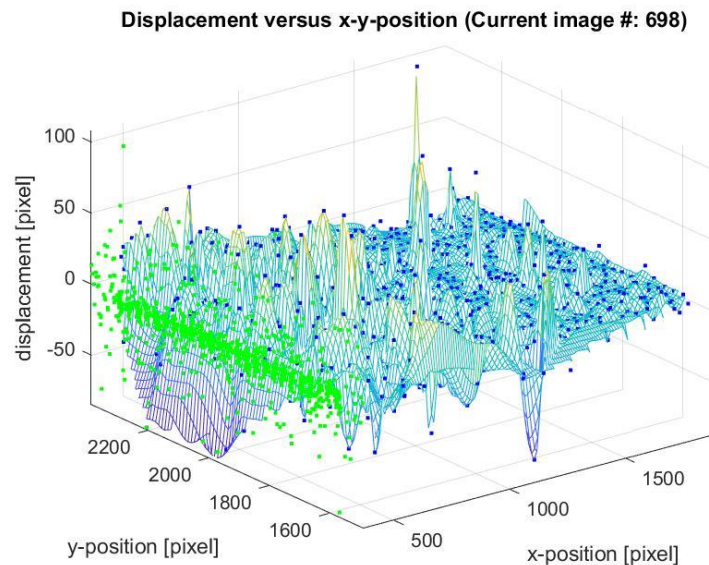


Imagen 93. Campo de desplazamientos verticales V obtenido con el código 1.

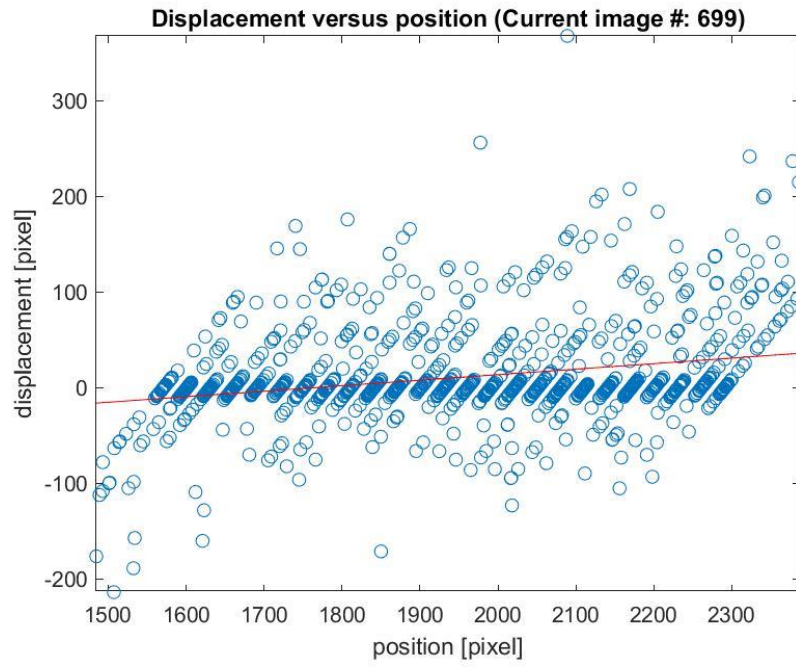


Imagen 94. Campo de deformaciones.

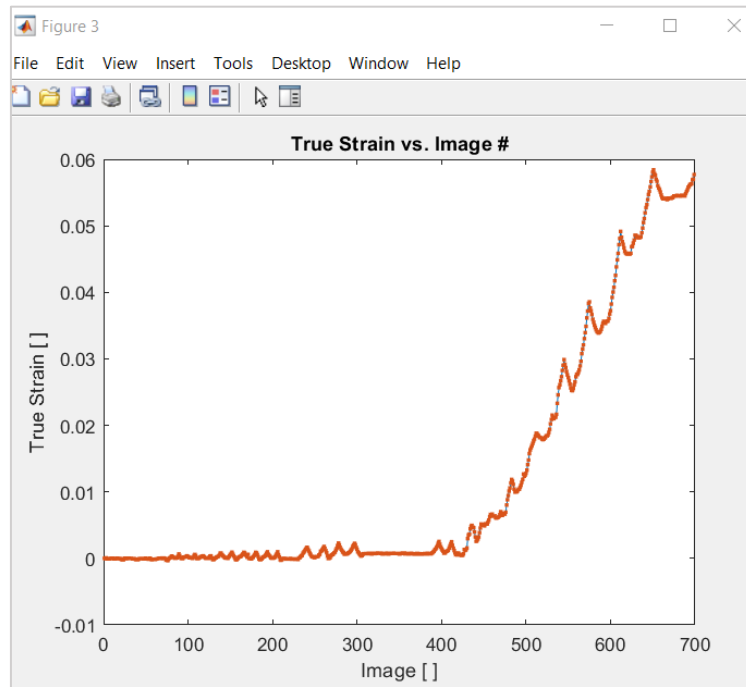


Imagen 95. Deformación real versus imágenes.

Utilizando el **Código B**, se seleccionó la región libre del muro y se definieron los parámetros necesarios, adicionalmente se eligieron una secuencia de 700 fotografías que van desde el inicio de la aplicación de carga hasta el momento en que ocurre la falla y son visibles las grietas. Aunque se tomaron 829 fotografías, luego de la fotografía 700 ocurren desprendimientos en la superficie de la muestra que provoca errores de interpretación en el software, por esa razón, se eligió el rango de fotografías que permite visualizar la falla completa. Por otro lado, también es importante mencionar que algunos obstáculos como los pernos y el marco frontal impiden tener un campo de visión completo del muro, por lo que se eligió la sección más visible del mismo, que, aunque no es la visión completa, representa la mayor parte y por ende permite tener una claridad sobre el comportamiento mecánico.

En el **Anexo 8** se encuentra la aplicación del **Código B** para la obtención de los desplazamientos tanto verticales como horizontales.

Desplazamientos horizontales (U) y verticales (V)

Hay varias formas de mostrar los desplazamientos de manera gráfica. Se pueden mostrar a través de mapas de colores, por medio de contornos (distinguiendo ubicaciones de los valores máximos y mínimos) y también por medio de un campo vectorial.

En la Imagen 96, se muestran los resultados de desplazamientos horizontales en colores, para el número de imagen 700, que corresponde al final de los ciclos de carga. La escala de colores está en milímetros.

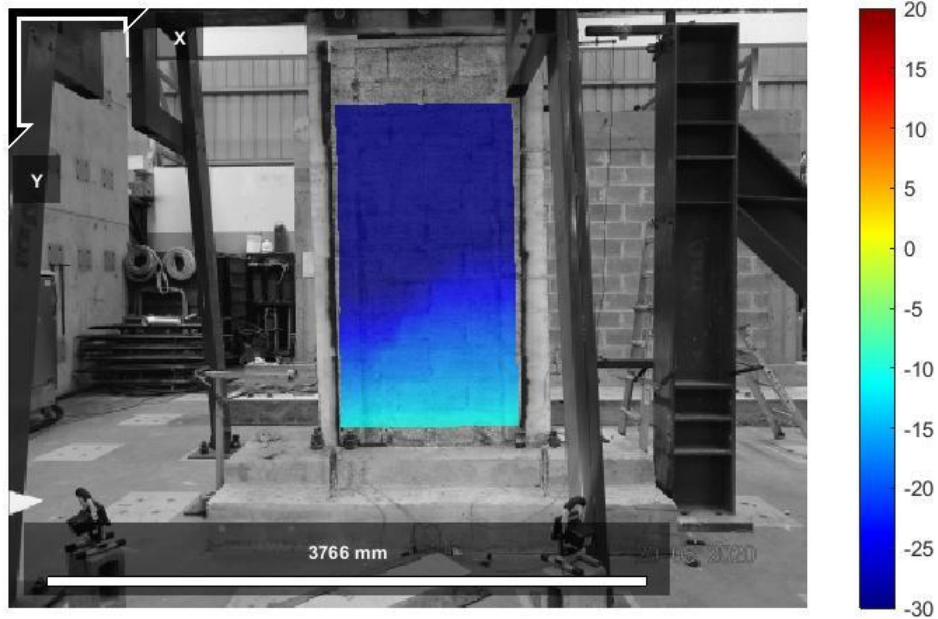


Imagen 96. Desplazamientos horizontales sobre el número de imagen 700 en mapa de colores. Escala de colores en mm. Ncorr.

En la Imagen 97, se muestran los resultados de desplazamientos verticales en colores, para el número de imagen 700, que corresponde al final de los ciclos de carga. La escala de colores está en milímetros.

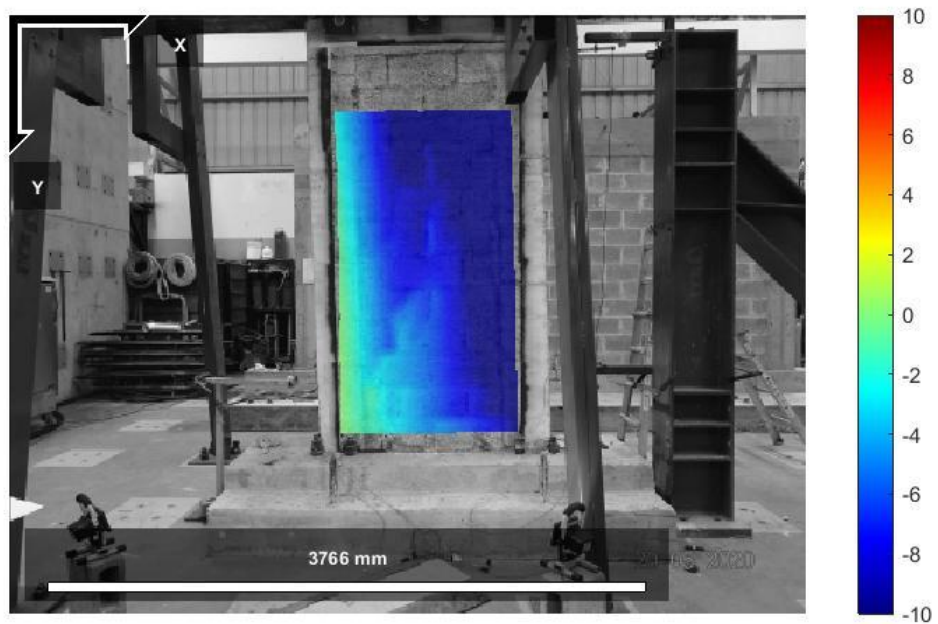


Imagen 97. Desplazamientos verticales sobre las fotografías 2 y 700 en mapa de colores. Escala de colores en mm. Ncorr.

Para tener una idea más clara del proceso y lo que sucede durante el proceso de aplicación de la carga, en el **Anexo 9** se encuentra toda la secuencia de imágenes exportadas para los desplazamientos tanto verticales como horizontales.

Como otra forma de visualizar gráficamente los desplazamientos, en las siguientes dos imágenes, se muestran a través de líneas de contorno sobre el número de imagen 700 que corresponde al final del ciclo de carga, donde a su vez se marca la ubicación de los valores máximos y mínimos.

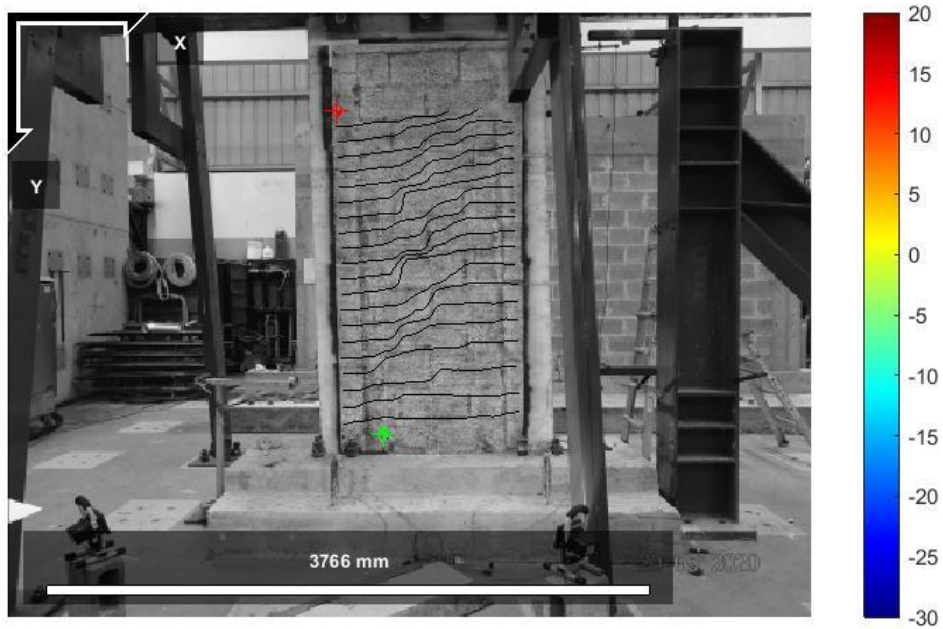


Imagen 98. Líneas de contornos de los desplazamientos horizontales, sobre el número de imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala de colores en mm. Ncorr.

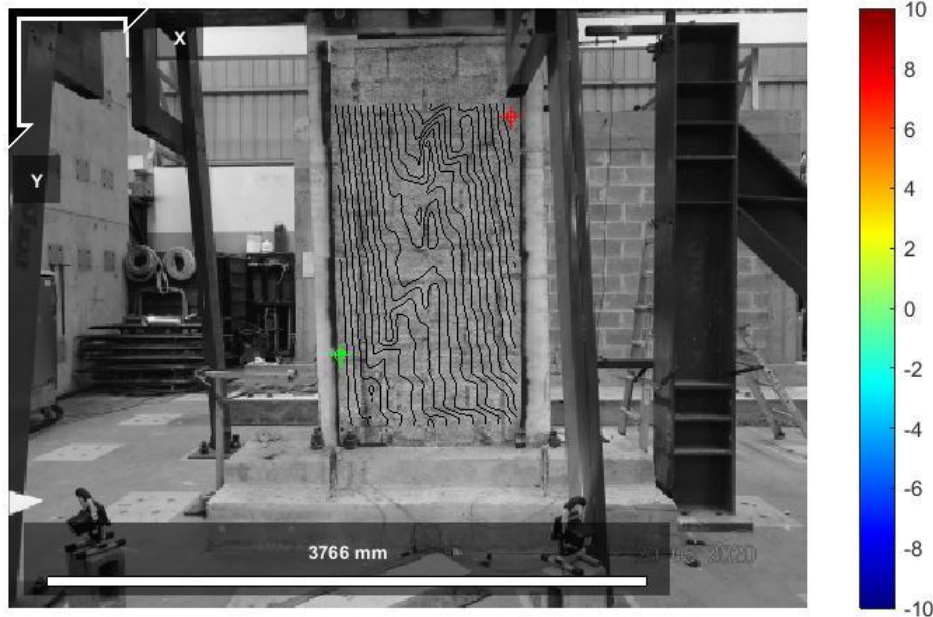


Imagen 99. Líneas de contornos de los desplazamientos verticales, sobre el número de imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala de colores en mm. Ncorr.

El programa realiza una exportación para cada imagen, por lo que la mejor forma de visualizar cada una es a través de un archivo digital en Formato de Intercambio de Gráficos (GIF por sus siglas en inglés “Graphics Interchange Format”), que consiste en una serie de fotogramas que toma las 700 imágenes y crean una animación. Mediante este formato, es más sencilla la visualización de los desplazamientos tanto en mapa de colores como en líneas de contorno. En el **Anexo 10**, se encuentran los archivos en .gif para los desplazamientos verticales y horizontales, tanto en mapas de colores como en líneas de contorno.

Como se mencionó, otra forma de visualizar los desplazamientos consiste en mostrar un campo vectorial de la superficie del muro. Para ello, se utilizaron los resultados matriciales de una de las imágenes (la imagen 700) y se graficó el campo vectorial de desplazamientos utilizando la función *quiver* en combinación con la función *streamslice* de Matlab. En el **Anexo 11** se describen cada una de las funciones.

En la Imagen 100 se muestra el campo vectorial obtenido para los datos de desplazamiento U y V .

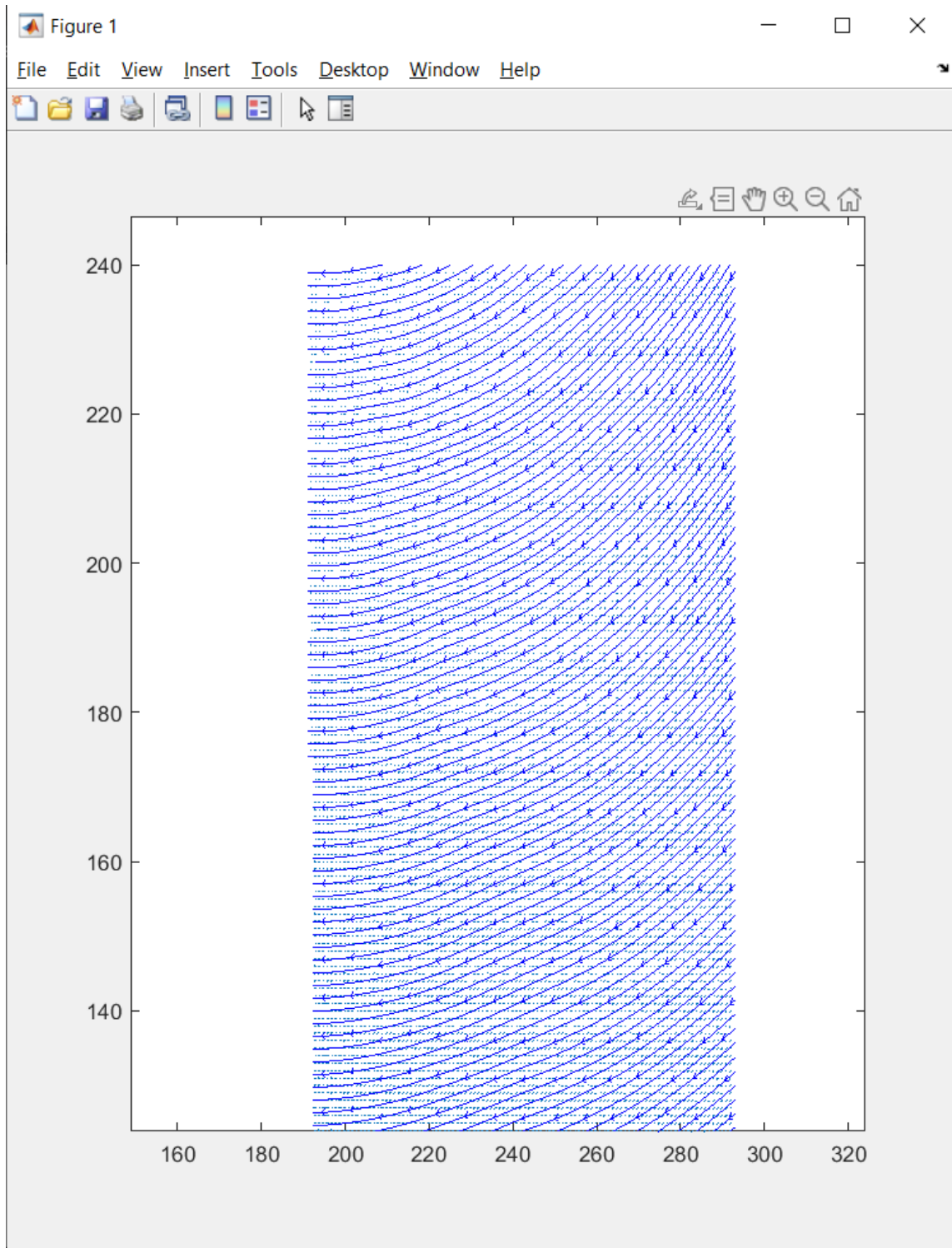


Imagen 100. Campo vectorial de desplazamientos verticales y horizontales, obtenidos con las funciones `quiver` y `streamslice` de Matlab.

Lo que la imagen muestra es el camino recorrido o desplazamiento de la imagen número 699 a la imagen 700, de cada uno de los puntos en forma de vector,

complementado con líneas de corriente que siguen la trayectoria global de todos los vectores.

Haciendo un acercamiento, se puede ver con más detalle (ver Imagen 101).

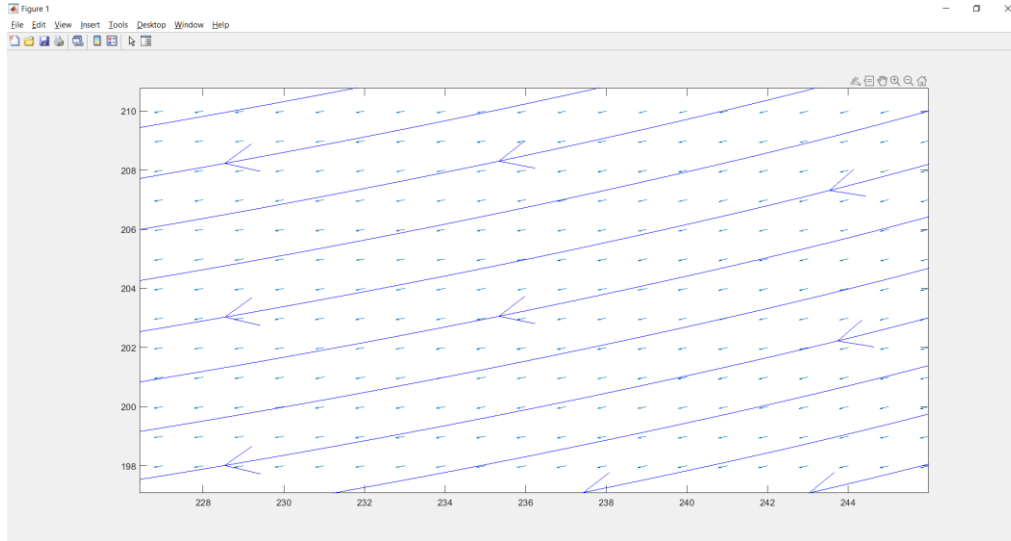


Imagen 101. Acercamiento al campo vectorial de desplazamientos verticales y horizontales, obtenidos con las funciones quiver y streamslice de Matlab.

Deformaciones (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy})

En las siguientes tres imágenes se muestra el mapa de colores para las deformaciones obtenidas en la dirección xx , yy “y” xy correspondientemente, montados sobre la fotografía final (700). Así mismo es posible visualizarlos en formato GIF en el **Anexo 10**.

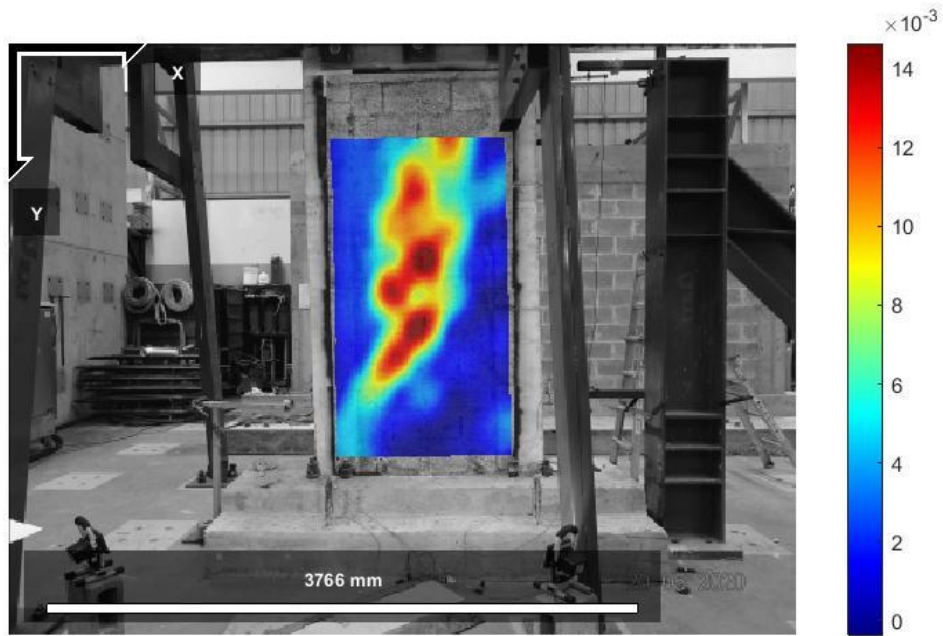


Imagen 102. Deformaciones ϵ_{xx} , sobre la imagen número 700 en mapa de colores. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab

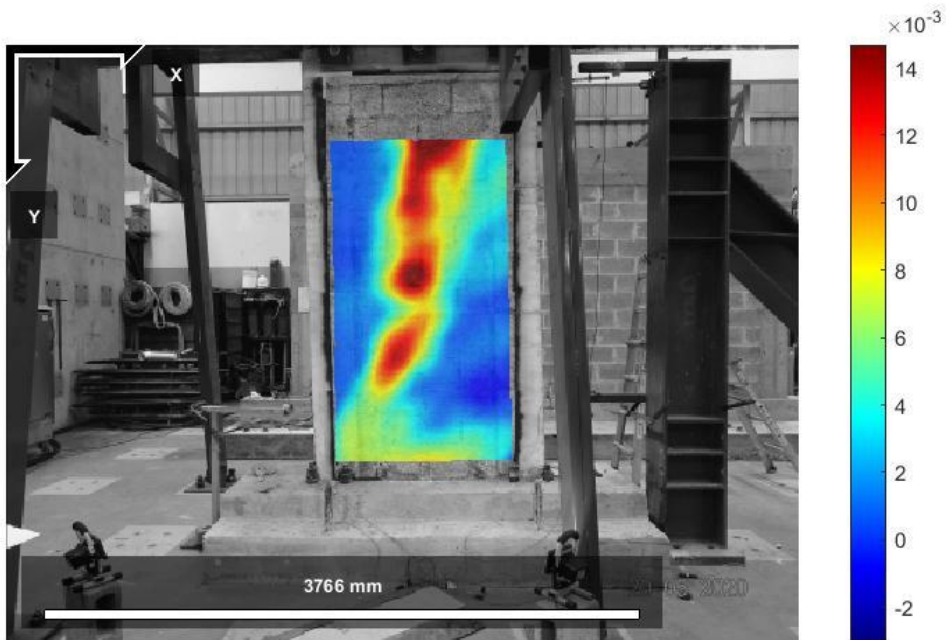


Imagen 103. Deformaciones ϵ_{yy} , sobre la imagen número 700 en mapa de colores. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab

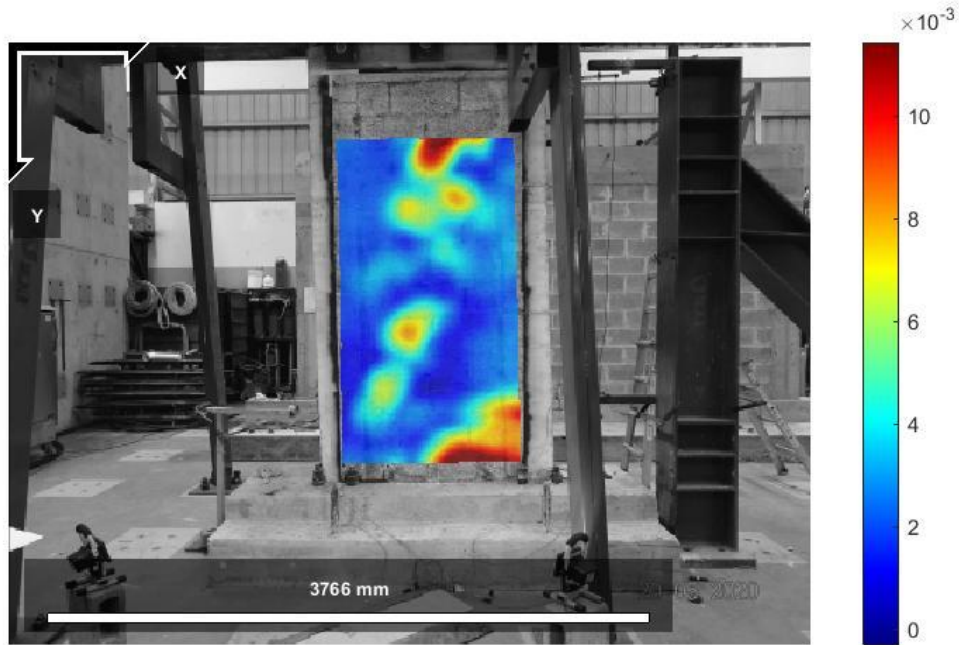


Imagen 104. Deformaciones ϵ_{xx} , sobre la imagen número 700 en mapa de colores. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab

El contorno de las imagen número 700, con marcadores en los valores máximos y mínimos se muestra en las siguientes tres imágenes para cada deformación.



Imagen 105. Líneas de contornos de las deformaciones ϵ_{xx} sobre la imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab.



Imagen 106. Líneas de contornos de las deformaciones ϵ_{yy} sobre la imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab.



Imagen 107. Líneas de contornos de las deformaciones ϵ_{xy} sobre la imagen 700, con la ubicación de los valores máximos y mínimos. Escala en milímetros. Ncorr, Matlab.

Adicionalmente, al igual que en los desplazamientos, es posible usar la función `quiver` con `streamslice` para generar el campo vectorial de las deformaciones sobre la imagen 700, en las siguientes imágenes se muestra el campo vectorial de las deformaciones.

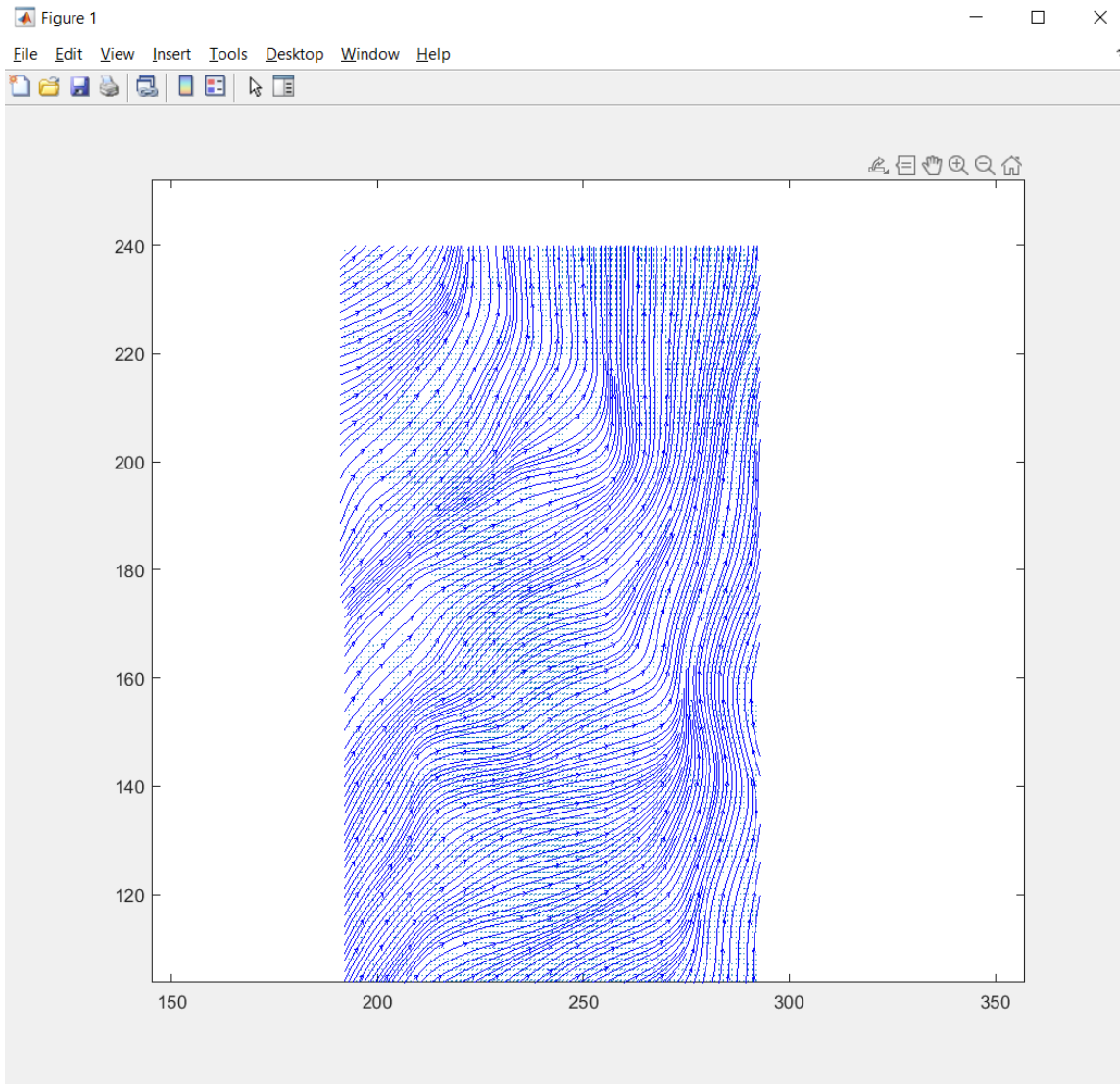


Imagen 108. Campo vectorial de deformaciones $\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$, obtenidos con las funciones `quiver` y `streamslice` de Matlab.

De la misma manera, se puede realizar un acercamiento para ver el trazado de líneas con mayor claridad (ver).

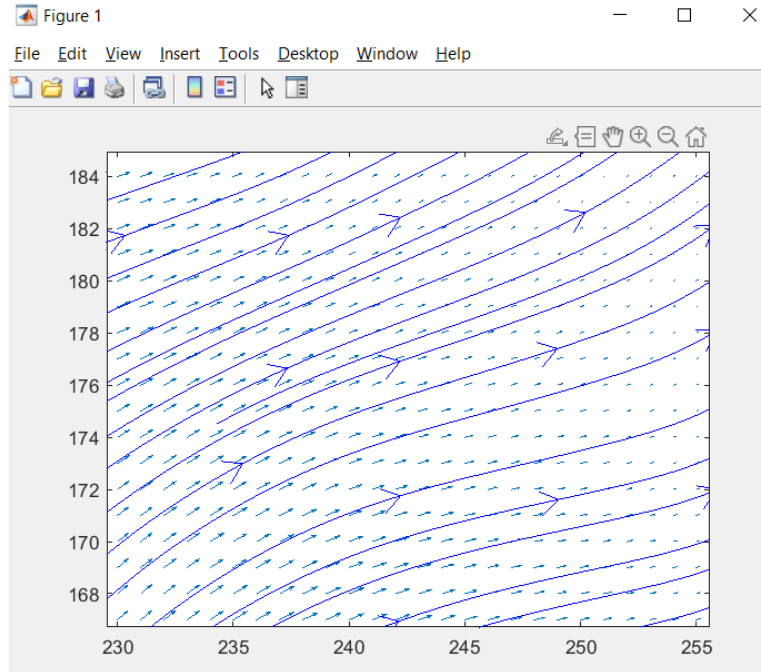


Imagen 109. Acercamiento al campo vectorial de deformaciones $\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$, obtenidos con las funciones *quiver* y *streamslice* de Matlab.

A diferencia de los desplazamientos, lo que las imágenes anteriores muestran son la acumulación de deformaciones que han ocurrido en el muro desde la imagen de referencia hasta la imagen 700, de cada uno de los puntos en forma de vector, complementado con líneas de corriente que siguen la trayectoria global de todos los vectores para una mejor visualización.

El comportamiento mecánico de la mampostería es complejo, al ser un material compuesto, que comprende unidades de mampuestos, mortero, concreto y accesorios. Sin embargo, mediante el análisis no lineal a elementos finitos, incluyendo el comportamiento de los materiales constituyentes y de las relaciones de interfase entre ellos, es posible analizar el comportamiento carga-deformación de elementos de mampostería. Aunque si lo que se requiere es obtener esfuerzos para diseñar, el enfoque anterior resulta no ser práctico y posiblemente innecesario. Para el diseño, la mampostería puede idealizarse como un material isótropo, con comportamiento compresivo no lineal (muy similar al del concreto), y comportamiento lineal en tracción (Klingner, 2012). De esta manera, la capacidad compresiva se gobierna por la resistencia al aplastamiento y la capacidad en tracción por la resistencia de adherencia entre unidades y mortero y el acero de refuerzo propiamente.

Dicho lo anterior, tomando la consideración de que el sistema es isótropo, bastaría con realizar ensayos que permitan aproximar los valores de la constante de elasticidad o módulo de Young (E) y el valor de la relación de Poisson (ν). Luego, se utilizan las relaciones constitutivas esfuerzo-deformación para el caso de Ley de Hooke en esfuerzo plano (por ser el muro únicamente cargado en el plano) y de esta forma utilizar el campo de deformaciones obtenidas para calcular los esfuerzos correspondientes según la siguiente ecuación constitutiva elástica para deformación plana.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

6.4. Análisis de los resultados.

Para un análisis correcto, primero se realizaron las correspondencias en magnitud de los desplazamientos horizontales (LVDT 2 / LVDT 3 / LVDT 5) así como los desplazamientos verticales (LVDT 1 / LVDT 4). El Gráfico 15 muestra claramente que, al comparar los desplazamientos horizontales, estos mantienen el mismo patrón y lo que varía son las magnitudes, siendo esto una señal de que los LVDT funcionaron de forma consistente y por tanto sus resultados pueden considerarse como base para la comparación. Lo contrario ocurre en la comparación de los desplazamientos verticales que se muestran en el Gráfico 16, pues claramente, aunque existe un patrón de valores pico, este se ve distorsionado por los resultados del LVDT 1 del que como se indicó, se muestran los resultados, pero no es considerado como un resultado base para la comparación.

Por parte de esta investigación, los resultados obtenidos a través del DIC muestran consistencia entre sí. El Gráfico 25, que compara los resultados horizontales en posiciones cercanas a los LVDT horizontales, posee un patrón muy similar que solo varía en magnitud y en los puntos finales de los datos luego de la imagen 700, esto por motivo de los desprendimientos que ocurren luego de la falla. Estos datos son muy similares a los obtenidos en el Gráfico 15 y por tanto pueden ser graficados en un mismo espacio (ver Gráfico 28).

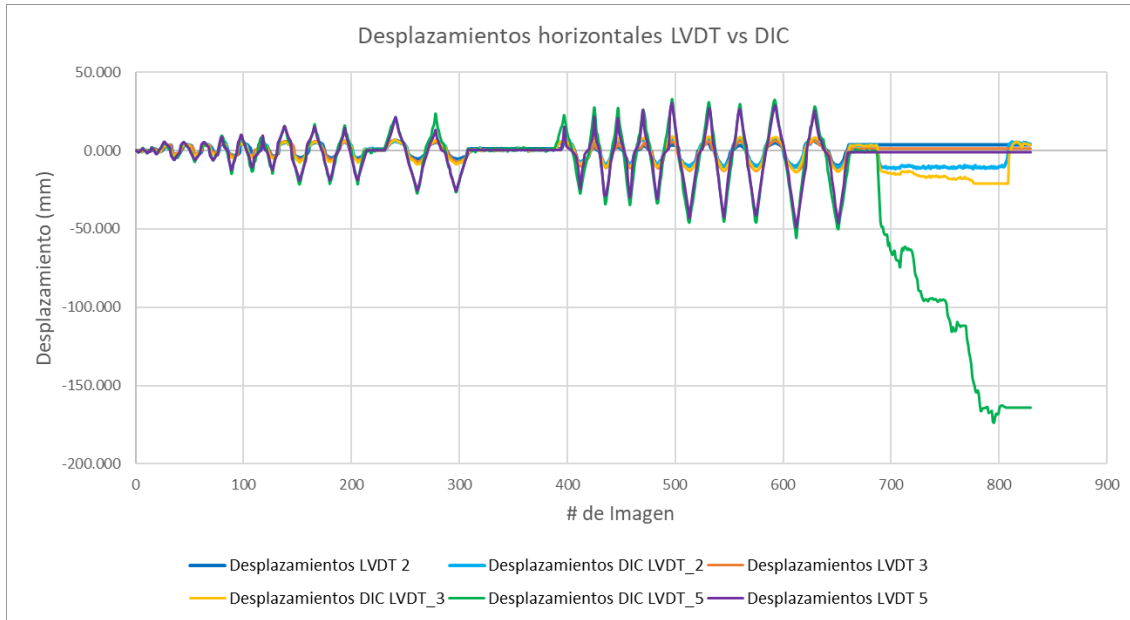


Gráfico 28. Comparación de desplazamientos horizontales obtenidos mediante la instrumentación LVDT y la implementación de la técnica DIC.

El gráfico anterior, muestra el mismo patrón de desplazamientos, pero con la diferencia de que se están comparando ambas partes de obtención de resultados, LVDT y DIC. Al final, luego de la imagen 700 aproximadamente, los valores difieren ampliamente porque la técnica DIC continúa tomando datos aún después de la falla y cuando ocurren desprendimientos, mientras que los LVDT ya han sido desconectados.

Para los desplazamientos verticales, se realiza el mismo ejercicio en el Gráfico 29, para todos los valores del LVDT 4 (por las razones ya dadas para el LVDT 1) y las zonas cercanas en 1 y 4 para el DIC, obtenidos por ambos métodos.

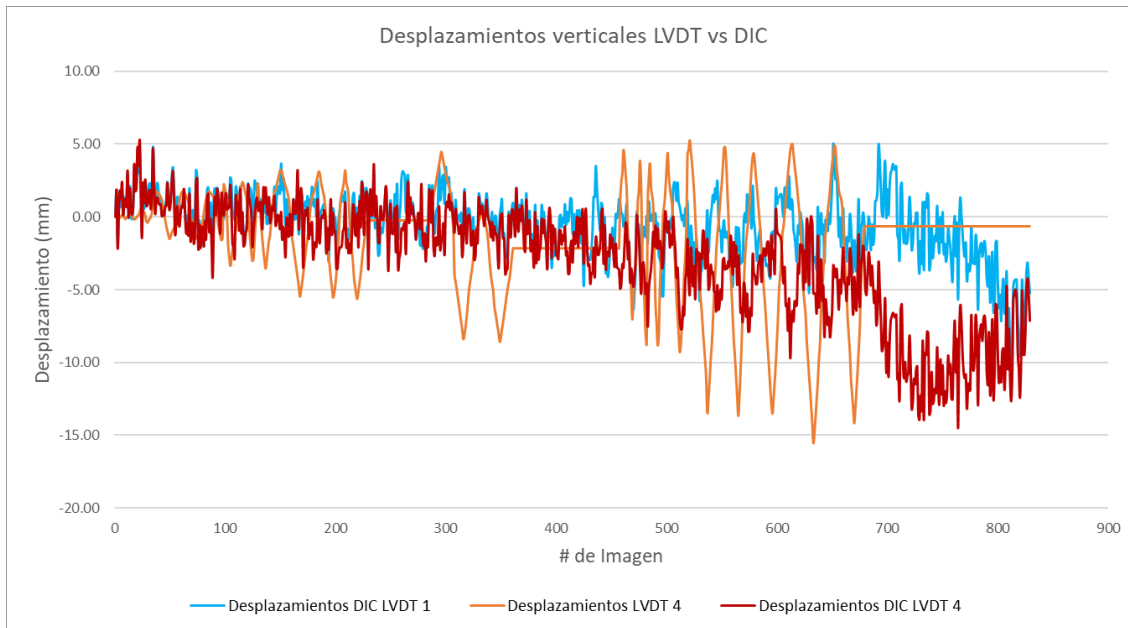


Gráfico 29. Comparación de desplazamientos verticales obtenidos mediante la instrumentación LVDT y la implementación de la técnica DIC.

Cabe recalcar que, a pesar de los errores que se asocian a la técnica del DIC los resultados verifican la técnica y las diferencias que se muestran en la Tabla 10, son una clara evidencia de la precisión de la técnica y del resultado exitoso de esta investigación.

Los campos de deformación permiten visualizar de forma completa lo que está sucediendo internamente en el muro y constituyen un parámetro importante para determinar si se está dando alguna concentración de estos en algún punto o predecir con exactitud que zonas son altamente propensas a fallar dentro del muro.

Uno de los puntos más importantes a evaluar dentro del comportamiento mecánico de la falla, es determinar si existe una concentración de deformaciones en el plano de unión de la mampostería con la columna de concreto reforzado. Dado que, al unir dos materiales con distinto módulo de elasticidad y rigidez, la distribución de esfuerzos de contacto entre el muro y el marco depende de la rigidez relativa entre éstos, y de la relación de aspecto del muro. Por lo que, dependiendo de estos factores, la falla del muro puede estar entre el agrietamiento diagonal y el aplastamiento de las esquinas cargadas. En otras palabras, el muro tiende a presentar un comportamiento no lineal ante cargas laterales debido a efectos geométricos que se producen en la interfaz entre el muro y el marco que lo confina. En este trabajo, lo anterior mencionado se logró determinar a través de las imágenes que se obtuvieron de las deformaciones del

código B, donde no se destaca que ocurra ninguna concentración de deformaciones en la unión del muro con el marco confinante durante la falla.

En el **Anexo 12**, se adjunta un video que muestra la secuencia completa de las deformaciones principales, así como los mapas de colores de cada imagen, donde es posible visualizar que no ocurren concentraciones de deformaciones en el plano muro-concreto y que la falla tiende a ser por agrietamiento diagonal. Las siguientes dos imágenes, muestran las deformaciones principales máximas y mínimas obtenidas gráficamente en mapa de colores para cuando se produce el agrietamiento.

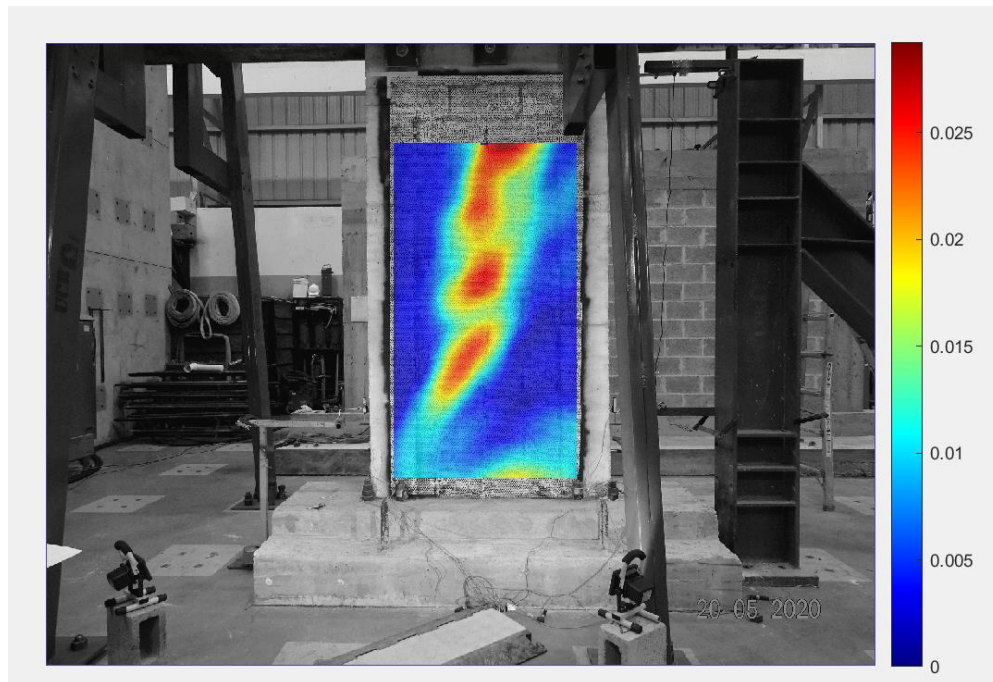


Imagen 110. Deformación principal máxima, para el número de imagen 700. Escala en milímetros. Matlab.

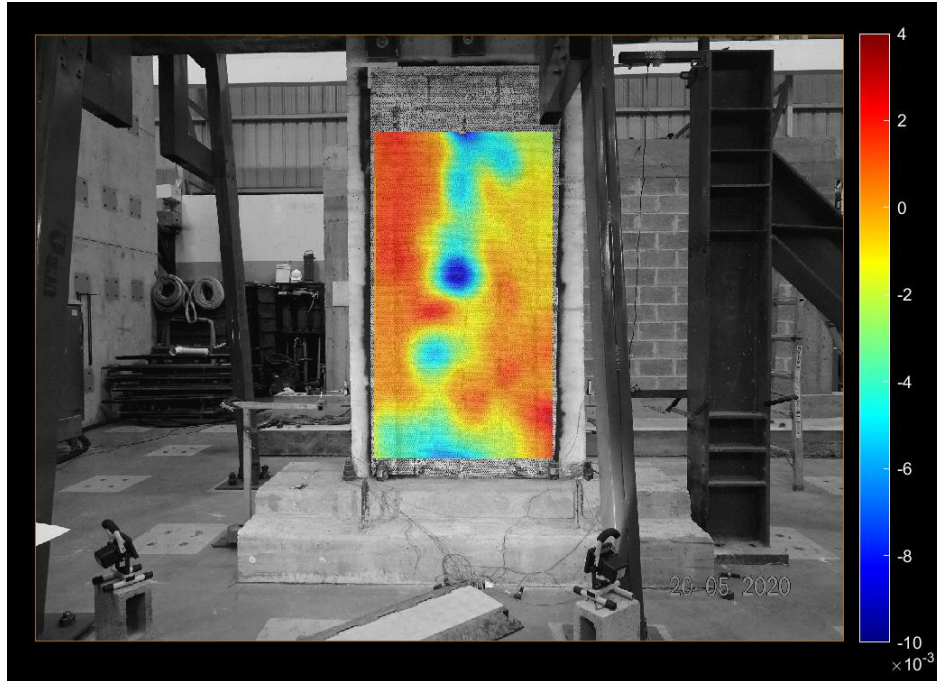


Imagen 111. Deformación principal mínima, para el número de imagen 700. Escala en milímetros. Matlab.

Para el caso de las líneas de contorno o corriente (**Anexo 10**), los valores máximos (puntos verdes, a tensión) y mínimos (puntos rojos, a compresión) dan un indicio de cuales zonas del muro están resintiendo más la carga que se le está aplicando o, dicho en otras palabras, las zonas donde las deformaciones se están acumulando. Por tanto, es sencillo determinar que la falla se dará por cortante en el muro, con grietas a 45° y que se ubicarán en el centro superior de este.

La Imagen 112, muestra cómo se da la falla en el muro, la cual corresponde de forma muy clara a lo que mediante la técnica DIC se pudo inferir, con agrietamientos a 45° a cortante. Por otro lado, también es interesante notar que en la unión mampostería – marco (columna de concreto), no hay falla a niveles de alta deformación, lo que confirma lo anteriormente indicado al respecto.

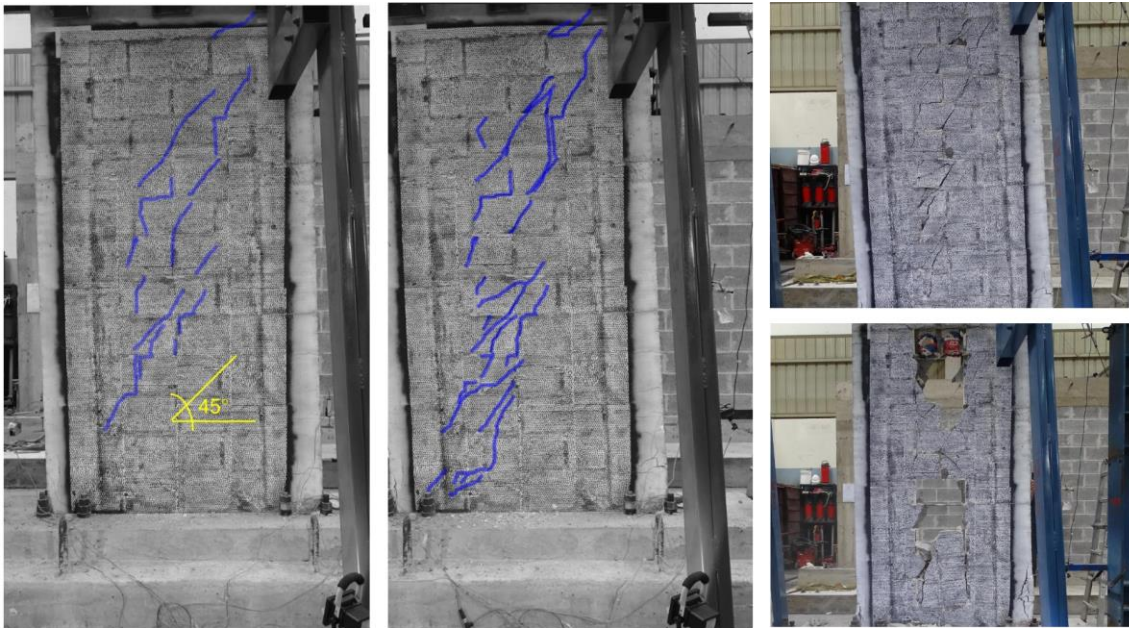


Imagen 112. Agrietamientos de falla a 45° e imágenes posteriores de desprendimiento de mampuestos. Las grietas están realzadas con líneas color azul para una mejor visualización.

Como ya se demostró, la técnica de la correlación digital de imágenes permite obtener el campo de desplazamientos y el campo de deformaciones; no así el campo de esfuerzos los cuales no se podrían obtener de esta manera. Sin embargo, los esfuerzos podrían obtenerse mediante ensayos y cálculos.

7. Conclusiones.

La elaboración de este trabajo demuestra que el uso de la técnica de Correlación Digital de imágenes es posible llevarla a cabo en un sistema de mampostería y obtener resultados precisos y confiables tanto como el método convencional de medición de desplazamientos y deformaciones. Para esta investigación, se obtuvieron conclusiones importantes que se resumen a continuación:

1. Se cumple con el objetivo del trabajo, dado que se logra concretar la utilización de la técnica de correlación de imágenes y mediante esta determinar el comportamiento mecánico de falla de un muro estructural.
2. Se logra verificar con la instrumentación de LVDT que los resultados obtenidos por medio del DIC son precisos.
3. Se minimizan los errores al máximo de la cámara digital, colocando esta a la distancia y altura calculadas de acuerdo con el campo de visión de la muestra, el tamaño del sensor y la distancia de trabajo.

4. El patrón de manchas elaborado mediante una plantilla de papel vinilo autoadhesivo constituye una de las partes fundamentales de la implementación de la técnica en esta investigación, pues permite obtener el tamaño de mancha adecuado para la correcta lectura y rastreo digital de esta, además que permite que el patrón sea contrastante, aleatorio, isotrópico y con un borde nítido; propiedades que son fundamentales en la elaboración de la técnica.
5. La utilización de pintura blanca como fondo con la impregnación de manchas negras, logra el contraste óptimo sobre la superficie del muro, para que los puntos sean altamente visibles digitalmente.
6. El acabado mate de la pintura logra evitar un detrimento en las imágenes por causa de los destellos o reflejos de luz que la cámara capta. Adicionalmente le da estabilidad y adhesión a la superficie, lo cual permite que el patrón de manchas no se deteriore durante la prueba de carga.
7. La determinación de la calidad de fotografía o resolución permite lograr el ajuste perfecto de la mancha, con el fin de que su tamaño esté entre 3 a 5 píxeles.
8. La iluminación del espécimen mediante luces tipo LED da mayor calidad a la fotografía, siempre y cuando estas sean dispersas y no enfocadas y se instalen de forma que no generen sombras o reflejos sobre la superficie.
9. La utilización de instrumentos de nivelación para ubicar la cámara respecto al muro; como la plomada, la cuerda y el nivel láser, son un punto fundamental que le aporta precisión a la toma de fotografías y confiabilidad a las distancias y alturas determinadas en los cálculos.
10. La adquisición de imágenes cumple con lo esperado cuando se tienen en consideración todos los aspectos fundamentales, de forma que se obtiene un producto de calidad con imágenes que son correctamente interpretadas por los códigos utilizados para Matlab.
11. La comparación de los campos de desplazamientos obtenidos por los LVDT y el DIC, determinan la confiabilidad y precisión de la técnica obteniendo diferencias de entre 0.4 a 0.6 mm, con desviaciones estándar entre datos del orden de los 3.4 mm como máximo.
12. Como parte de los resultados, los códigos permiten graficar el campo de deformaciones, diferenciando las magnitudes a través de mapas de colores en cada imagen, y se representa el comportamiento mecánico de la falla del muro. De esta forma, en la secuencia de imágenes es posible visualizar las secciones

del muro que presentan las deformaciones más altas, así como las más bajas y como estas varían a lo largo de la falla.

13. Como parte de los resultados gráficos, se visualizan el comportamiento de las zonas entre el muro y el marco, las esquinas y el centro del muro, que son las secciones más comunes en los que fallan el tipo de muro investigado.
14. La correlación de imágenes digitales demuestra ser una técnica versátil para mediciones de desplazamiento y deformaciones. Sus resultados pueden aplicarse con el fin de vigilar la salud estructural de los sistemas constructivos en las edificaciones.

8. Recomendaciones.

Antes de finalizar, se sugieren algunas recomendaciones con base en los resultados y las conclusiones obtenidos luego de la presente investigación.

1. Investigar a fondo el comportamiento de los muros construidos mediante el sistema constructivo de mampostería confinada reforzada con la técnica DIC, de igual forma que se realizó en esta investigación, pero sumándole un análisis para distintos muros, variando su relación de aspecto y cuantía de acero.
2. Calibrar la utilización de la técnica DIC, de manera que pueda ser replicada en otros materiales como el acero, la madera, el concreto, el vidrio, entre otros; a microescala y escala natural. La lista de materiales en la que se puede implementar el DIC, al ser una técnica no invasiva, no tiene una limitante siempre que se le pueda impregnar un patrón de manchas sobre la superficie del espécimen.
3. Analizar el comportamiento de diferentes sistemas constructivos que puedan ser sometidos a cargas a través de la técnica DIC, utilizando la presente investigación como un aporte al conocimiento base. Así mismo conociendo las propiedades del material que está fallando, calcular los esfuerzos que se presentan y utilizarlos para el diseño.
4. Implementar la técnica DIC en los laboratorios de materiales en el ámbito nacional, dado que actualmente no se cuenta con laboratorios acreditados en este país que realicen como servicio o estudio la Correlación Digital de Imágenes, lo anterior con el fin de investigar más a fondo el uso de la técnica y en un futuro cercano ofrecerlo como un servicio de análisis al mercado.

5. Validar mediante investigación futura utilizando esta investigación como base, los resultados mediante los distintos métodos convencionales para medir desplazamiento y deformación.

Se pretende que este proyecto de inicio a mayor investigación en el campo de la Correlación Digital de Imágenes en Costa Rica, de manera que permita a los técnicos de laboratorio e ingenieros, dominar la técnica y obtener resultados que permitan aprender más en el campo de la ingeniería de materiales y los sistemas estructurales.

9. Referencias

- ASTM International. (2019). *ASTM E2126-19, Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*. Obtenido de <https://www.astm.org/>.
- Blaber, J. (2021). *Ncorr*. Obtenido de Open source 2D digital image correlation MATLAB program: <https://www.ncorr.com/>
- Dong, Y., & Pan, B. (2017). A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 1161–1181.
- Eberl, C. (2021). *Digital Image Correlation and Tracking*. Obtenido de The MathWorks, Inc. MATLAB Central File Exchange: https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12413-digital-image-correlation-and-tracking?s_tid=FX_rc3_behav
- Furtado, A., Ramos, T., Rodrigues, H., Arêde, A., Varum, H., & Tavares, P. (2015). In-plane response of masonry infill walls: experimental study using digital image correlation. *Procedia Engineering*, 870-876.
- Ghorbani, R., Matta, F., & Sutton, M. (2015). Full-Field Deformation Measurement and Crack Mapping on Confined Masonry Walls Using Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 227-243.
- Haddadi, H., & Belhabib, S. (2008). Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique. *Optics and Lasers in Engineering*, 185-196.
- Hosein Salmanpour, A., & Mojsilović, N. (2016). Masonry walls subjected to in-plane cyclic loading: application of digital image correlation for deformation field measurement. *Int. J. Masonry Research and Innovation*, 23.
- Hosein Salmapour, A., & Mojsilović, N. (2013). Application of Digital Image Correlation for strain measurements of large masonry walls. *APCOM & ISCM* (págs. 1-9). Singapore: Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Switzerland.
- Klingner, R. E. (2012). *Especificación, diseño y cálculo de mampostería*. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC).

- LePage, W., Shaw, J., & Daly, S. (2017). Optimum Paint Sequence for Speckle Patterns in Digital Image Correlation. *The Society for Experimental Mechanics*, 557-563.
- López-Alba, E., López-García, R., Dorado, R., & Díaz, F. (2012). Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto. *XIX CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA* (pág. 8). Castellón, España: Asociación Española de Ingeniería Mecánica.
- McAndrew, A. (2004). *An introduction to Digital Image Processing with Matlab*. Melbourne, Australia: Victoria University of Technology.
- Murray, C., Hault, N., & Take, W. (2017). Dynamic measurements using digital image correlation. *ICE Publishing*, 41-52.
- Nghiem, H.-L., Al Heib, M., & Emeriault, F. (2015). Method based on digital image correlation for damage assessment in masonry structures. *Engineering Structures*, 1-15.
- Pan, B. (2015). Chapter 6, Digital Image Correlation. En P. Rastogi, *Digital Optical Measurement Techniques and Applications* (págs. 217-263). Norwood, MA: Artech House.
- Pan, B. (2018). Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. *Measurement Science and Technology*, 32.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H., & Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 17.
- Pérez, M. (Enero de 2021). *Blog del Fotógrafo SLU*. Obtenido de <https://www.blogdelfotografo.com>
- Picado Arguedas, A. D. (2019). *Tesis, Grado Licenciatura, Análisis del comportamiento ante carga cíclica de muros de mampostería confinada reforzada con diferentes relaciones de aspecto*. Costa Rica.

- Ramos, T., Furtado, A., Eslamia, S., Alvesa, S., Rodríguez, H., Arêdeb, A., . . .
Moreiraa, P. G. (2015). 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering
– Measurements in a Masonry Wall. *Procedia Engineering*, 215 – 222.
- Reu, P. (2015). Speckles and their relationship to the digital camera. *Experimental
Techniques, Society for Experimental Mechanics*, 15.
- Sánchez Vargas, T. N. (2019). *Verificación de la capacidad de muros de mampostería
confinada reforzada al variar la relación de aspecto*. Ciudad Universitaria
Rodrigo Facio.
- Sinecen, M. (7th de July de 2016). *Digital Image Processing with MATLAB, Applications
from Engineering with MATLAB*. Obtenido de IntechOpen:
[https://www.intechopen.com/books/applications-from-engineering-with-matlab-
concepts/digital-image-processing-with-matlab](https://www.intechopen.com/books/applications-from-engineering-with-matlab-concepts/digital-image-processing-with-matlab)
- Sutton, M. A., & Hild, F. (2015). Recent Advances and Perspectives in Digital Image
Correlation. *Experimental Mechanics*, 1-8.
- Sutton, M., Orteu, J.-J., & Schreier, H. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and
Deformation Measurements*. Columbia, USA: Springer.
- Yong, S., Zeren, G., Qingchuan, Z., & Shangquan, W. (2018). Spatial uncertainty of
measurement errors in digital image correlation. *Optics and Lasers in
Engineering*, 113-121.