



**Institución Universitaria**

Método para la determinación del campo de esfuerzos bajo la influencia de esfuerzos residuales por medio de la técnica híbrida de fotoelasticidad y termografía.

Jhonatan Rendón Arango

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingenierías

Medellín, Colombia

2022



# Método para la determinación del campo de esfuerzos bajo la influencia de esfuerzos residuales por medio de la técnica híbrida de fotoelasticidad y termografía.

Jhonatan Rendón Arango

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Automatización y Control Industrial

Director (a):

Profesor Hermes Alexander Fandiño Toro  
Instituto Tecnológico Metropolitano  
Grupo de Máquinas Inteligentes y Reconocimiento de Patrones

Codirectores:

Ph.D. Alejandro Restrepo Martínez  
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín  
Grupo de Promoción e Investigación en Mecánica Aplicada GPIMA

Ph.D. Juan Carlos Briñez De León  
Institución Universitaria Pascual Bravo

Línea de Investigación:  
Esfuerzos residuales evaluados por fotoelasticidad

Instituto Tecnológico Metropolitano  
Facultad de Ingenierías  
Medellín, Colombia  
2022



## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a las instituciones Universitarias ITM, Pascual Bravo y Universidad Nacional De Colombia - Sede Medellín por su aporte económico y logístico, facilitando los equipos y recursos que permitieron el desarrollo de este trabajo.

A mi director, el profesor Hermes Fandiño Toro por su apoyo, dedicación y paciencia brindada. A los codirectores, los profesores Alejandro Restrepo Martínez y Juan Carlos Briñez De León por la exigencia, los valiosos aportes y todo el conocimiento que colocaron a mi disposición. A los tres, infinita gratitud por su contribución en mi proceso de aprendizaje.

A mis padres, Norma E. Arango y Héctor M. Rendón quienes siempre estuvieron a mi lado apoyándome, llenándome de ánimos y motivos para continuar. Siendo siempre un ejemplo para seguir.

A mi hermana Carolina Rendón, quién en la distancia me acompañó en esta etapa tan importante de mi vida con su amor y comprensión.

Finalmente, a los miembros de mi familia Laura Toro, Santiago Ramírez, David Rodríguez, Cristian Yepes y Alejandro Monsalve con quienes compartí ideas y conceptos que contribuyeron en la mejora de este documento.

GRACIAS A TODOS.



## Resumen

El estudio de los esfuerzos residuales ha sido materia de investigación debido al efecto que producen sobre el estado de esfuerzos y la integridad operacional de diferentes productos. Esto se debe a la alteración que pueden generar los esfuerzos residuales en las propiedades mecánicas de los materiales y que su origen se asocia con la mayoría de los procesos de manufactura. Por otro lado, la fotoelasticidad es una técnica óptica no destructiva que permite obtener el campo de esfuerzos y detectar la presencia de esfuerzos residuales en materiales birrefringentes, como el vidrio, el policarbonato o el acrílico. La implementación de la fotoelasticidad en una muestra con esfuerzos residuales mientras es sometida a una carga mecánica, permite observar una deformación en el campo de esfuerzos debido a la presencia del residual. Luego, al someter la muestra a una carga térmica se genera una recuperación, alterando nuevamente el estado de esfuerzos.

Durante este trabajo se desarrolló una metodología para la adquisición de imágenes de fotoelasticidad, definiendo las geometrías y el material de las muestras, las condiciones de grabación, las fuentes de aplicación de carga y temperatura, y sus parámetros. Posteriormente se estableció una metodología para procesar las imágenes a partir de los videos adquiridos, partiendo de un preprocesamiento en el cual se desarrolló una evaluación de la información visual, se filtró la información innecesaria y se realizó un submuestreo en el conjunto de imágenes obtenidas.

Durante el procesamiento se implementaron algoritmos basados en el comportamiento de la dinámica del color, agrupamiento no supervisado y recuperación del campo de esfuerzos en imágenes de fotoelasticidad. A partir de los resultados obtenidos se encontró que la dinámica de color asociada a los esfuerzos residuales corresponde a un nivel de esfuerzo diferente respecto a su vecindario. Adicionalmente, la implementación del algoritmo K-means o la estimación de la trayectoria de color en los píxeles de una secuencia de imágenes logra identificar los esfuerzos residuales presentes en una muestra. Por otro lado, la evaluación de similitud estructural entre imágenes de una secuencia de carga y temperatura permitió emparejar las imágenes idóneas para lograr la recuperación del campo de esfuerzos de los esfuerzos residuales.

Palabras clave: Esfuerzos residuales, Fotoelasticidad, Desarrollo de fase, Termografía, Procesamiento de imágenes, Polarización óptica.

## Abstract

The study of residual stresses has been the subject of research due to its importance in the final stage of several products at the end of their manufacturing process. This is due to the alteration that residual stresses can generate in the mechanical properties of materials, also its origin is associated with most manufacturing processes. On the other hand, photoelasticity is a non-destructive optical technique that allows obtaining the stress field and detecting the presence of residual stress in birefringent materials, such as glass, polycarbonate or acrylic. The implementation of photoelasticity in a sample with residual stress while it is subjected to a mechanical load, allows us to observe a deformation in the stress field due to the presence of the residual. Then, by subjecting the sample to a thermal load, a recovery of the material is generated, again altering the stress state and the relationship with the residual stress.

During this work, a methodology for the acquisition of photoelasticity images was developed, defining the geometries and material samples, recording conditions, sources of application of load and temperature, and their parameters. Subsequently, a methodology was established to process the images from the acquired videos, starting from a preprocessing in which an evaluation of the visual information was developed, the unnecessary information was filtered, and a subsampling was carried out on the set of images obtained.

During processing, algorithms based on the behavior of color dynamics, unsupervised clustering, and stress field recovery in photoelasticity images were implemented. From the results obtained after algorithm implementation, it was found that the color dynamics of the residual stresses correspond to a different stress level in their neighborhood. Additionally, the implementation of the K-means algorithm or the estimation of the color trajectory in the pixels allows to identify the residual stresses present in a sample. On the other hand, the evaluation of structural similarity between images of a load and temperature sequence allowed matching the ideal images to achieve the recovery of the stress field from the residual stresses.

Keywords: Residual stresses, Photoelasticity, Phase unwrapping, Thermography, Image processing, Optical polarization.



---

# Contenido

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN .....	17
2. FOTOELASTICIDAD DIGITAL.....	25
3. ESFUERZOS RESIDUALES .....	50
4. ESTRATEGIA PARA ANALIZAR IMÁGENES DE FOTOELASTICIDAD CON ESFUERZOS RESIDUALES.....	65
5. CONCLUSIONES .....	115
6. BIBLIOGRAFÍA.....	118
7. ANEXOS.....	129

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Generación de esfuerzos residuales a partir de defectos microestructurales.....	19
<b>Figura 1-2:</b> Colapso del puente Silver Bridge en diciembre de 1967. ....	19
<b>Figura 2-1:</b> Ejemplificación del esfuerzo normal $\sigma$ en una barra rectangular.....	26
<b>Figura 2-2:</b> Ejemplificación de los esfuerzos normales y cortantes, y los esfuerzos principales	27
<b>Figura 2-3:</b> Campo de esfuerzos para un disco bajo compresión diametral en términos de la diferencia de esfuerzos principales, visto como mapa de colores.....	28
<b>Figura 2-4:</b> Publicaciones en Scopus en los últimos años relacionadas con fotoelasticidad. ....	29
<b>Figura 2-5:</b> Montaje de fotoelasticidad en flexión con polarizador plano para muestra de acrílico .....	29
<b>Figura 2-6:</b> Montaje de fotoelasticidad para un polariscopio circular. ....	31
<b>Figura 2-7:</b> Representación de las cargas estáticas y variables presentes en el modelo de placa con concentrador. ....	35
<b>Figura 2-8:</b> Imágenes de fotoelasticidad sintéticas. (A) Sin corrección de color. (B) Con corrección de color.....	36
<b>Figura 2-9:</b> Recubrimientos empleados en muestras de PMMA para montaje en reflexión. ....	38
<b>Figura 2-10:</b> Medida de la respuesta electromagnética en lámpara fluorescente.....	39
<b>Figura 2-11:</b> Respuesta espectral de una fuente de iluminación fluorescente.....	39
<b>Figura 2-12:</b> Fotograma de un disco bajo compresión discretizado en pixeles .....	40
<b>Figura 2-13:</b> Cálculo de calificación de calidad por métrica NIQE para imagen experimental de fotoelasticidad. Tomando como referencia una base de datos construida a partir de 720 imágenes sintéticas de fotoelasticidad.....	42
<b>Figura 2-14:</b> Imágenes sintéticas de fotoelasticidad para un disco bajo compresión diametral. (A) Imagen sin defectos. (B) Imagen con borrosidad. (C) Imagen con bajo contraste. (D) Imagen con ruido Gaussiano.. ....	43
<b>Figura 2-15:</b> Imágenes de fotoelasticidad para un disco bajo compresión. (A) Sintética. (B) – (G) experimentales adquiridas bajo diferentes configuraciones.. ....	43
<b>Figura 2-16:</b> Curvas de carga para dos discos de PMMA bajo compresión diametral. (A) sin precarga. (B) con precarga. ....	44
<b>Figura 2-17:</b> Aumento en la densidad de franjas sobre una muestra con ER en compresión, debido al aumento de carga mecánica. (A) 150 Newtons. (B) 714 Newtons. (C) 2000 Newtons. Imágenes adquiridas desde un montaje de fotoelasticidad en reflexión. ....	45
<b>Figura 2-18:</b> Disminución de la densidad de franjas por aumento de carga térmica, sobre una muestra precargada mecánicamente con 2000 Newton. (A) 27 °C. (B) 40 ° C. (C) 53 ° C.....	45
<b>Figura 2-19:</b> Comportamientos real y teórico para controlador de temperatura.....	46
<b>Figura 2-20:</b> Modelo computacional para banco de pruebas. ....	47

<b>Figura 2-21:</b>	Esquema de sistemas funcionales y elementos principales para banco de pruebas de fotoelasticidad.....	<b>48</b>
<b>Figura 2-22:</b>	Proceso de ensamble y prueba del banco de pruebas..	<b>48</b>
<b>Figura 2-23:</b>	Adquisiciones logradas en el prototipo de aplicación de esfuerzos y ER. ....	<b>49</b>
<b>Figura 3-1:</b>	Esfuerzos residuales en un disco de PMMA, visto en fotoelasticidad.....	<b>50</b>
<b>Figura 3-2:</b>	Generación de esfuerzo residual en una muestra circular por efecto de una carga de compresión..	<b>51</b>
<b>Figura 3-3:</b>	Clasificación de métodos para la medición de esfuerzos residuales. ....	<b>53</b>
<b>Figura 3-4:</b>	Principio de superposición para calcular esfuerzos residuales a partir de la medida del contorno de la superficie cortada.....	<b>55</b>
<b>Figura 3-5:</b>	(A) Proceso de medición de dureza en una muestra de PMMA. (B) Indentación por medio de un indentador tipo bola. (C) Esfuerzos residual resultante del proceso..	<b>58</b>
<b>Figura 3-6:</b>	Esfuerzos residuales generados para calentamiento y carga mecánica. (A) Muestra bajo precarga sin ER. (B) Muestra rotada con presencia de ER.....	<b>58</b>
<b>Figura 3-7:</b>	Esfuerzos residuales producto de diferentes procesos de manufactura vistos en fotoelasticidad. (A) Torneado. (B) Perforación con taladro. (C) Fresado. (D) Corte por sierra de banco.....	<b>60</b>
<b>Figura 3-8:</b>	Esfuerzos residuales generados por indentación. (A) Disco. (B) Anillo. ....	<b>60</b>
<b>Figura 3-9:</b>	Proceso y resultado de la generación de ER por deformación en frío. (A) imagen antes de la compresión. (B) muestra bajo compresión rotada con ER de borde. ....	<b>61</b>
<b>Figura 3-10:</b>	Secuencia computacional para un disco bajo compresión diametral con esfuerzos residuales de borde. Considerando la resta entre estos. ....	<b>62</b>
<b>Figura 3-11:</b>	Reconstrucción del campo de esfuerzos de la secuencia presentada en la Figura 3-10. (A) Vista superior. (B) Reconstrucción tridimensional..	<b>62</b>
<b>Figura 3-12:</b>	Secuencia computacional para un disco bajo compresión diametral con esfuerzos residuales de borde. Considerando la suma entre estos.....	<b>63</b>
<b>Figura 3-13:</b>	Reconstrucción del campo de esfuerzos de la secuencia presentada en la Figura 3-12. (A) Vista superior. (B) Reconstrucción tridimensional..	<b>63</b>
<b>Figura 4-1:</b>	Esquema del proceso de adquisición, preprocesamiento y procesamiento de imágenes de fotoelasticidad.....	<b>69</b>
<b>Figura 4-2:</b>	Rotación de 8 ° en el sentido de las manecillas del reloj en muestra de PMMA durante la aplicación de una carga térmica. ....	<b>70</b>
<b>Figura 4-3:</b>	Valor de SSIM para el fotograma 77 respecto a los fotogramas de la secuencia de aplicación de carga. ....	<b>71</b>
<b>Figura 4-4:</b>	(A) Imagen de referencia sin máscara. (B) Máscara extraída. (C) Imagen final.....	<b>72</b>
<b>Figura 4-5:</b>	Píxeles seleccionados para algoritmo de evaluación de intensidad. ....	<b>73</b>
<b>Figura 4-6:</b>	Composición de canales RGB en una imagen digital. ....	<b>74</b>
<b>Figura 4-7:</b>	Composición de canales de color para un conjunto de imágenes RGB.....	<b>74</b>
<b>Figura 4-8:</b>	Ubicación de las zonas de altos, medios y bajos esfuerzos. (A) Imagen de referencia. (B) Fotograma experimental.....	<b>75</b>
<b>Figura 4-9:</b>	Comportamiento por canal de color para las zonas de altos (A), medios (B) y bajos (C) esfuerzos. ....	<b>75</b>

---

<b>Figura 4-10:</b>	Comportamiento de referencia en el espacio de color para las diferentes zonas de esfuerzos. (A) Altos. (B) Medios. (C) Bajos. ....	<b>76</b>
<b>Figura 4-11:</b>	Reorganización de los datos antes de ingresarlos en el algoritmo de K-means.....	<b>77</b>
<b>Figura 4-12:</b>	Índices de validación de agrupamiento por el método K-means bajo el criterio de Calinski – Harabasz. ....	<b>78</b>
<b>Figura 4-13:</b>	Apilamiento temporal de líneas verticales bajo la aplicación de carga mecánica. Esfuerzos residuales (A) Superior. (B) Inferior. ....	<b>79</b>
<b>Figura 4-14:</b>	Curva de carga respecto a los fotogramas de la secuencia de carga. ....	<b>80</b>
<b>Figura 4-15:</b>	Imágenes <b>I1, I3 e I5</b> seleccionadas a partir de la Figura 4-14. ....	<b>81</b>
<b>Figura 4-16:</b>	Valor de SSIM de <b>I1, I3 e I5</b> contra 720 fotogramas de la secuencia térmica. ....	<b>81</b>
<b>Figura 4-17:</b>	Imágenes <b>I1, I3 e I5</b> de la secuencia de carga y sus homólogos de la secuencia térmica encontradas por el método SSIM. ....	<b>82</b>
<b>Figura 4-18:</b>	Mapas de fase envueltos. (A) Secuencia de carga. (B) Secuencia térmica. ....	<b>83</b>
<b>Figura 4-19:</b>	Mapa de fase desenvuelto. (A) Secuencia de carga. (B) Secuencia térmica. ....	<b>84</b>
<b>Figura 4-20:</b>	Superficie de esfuerzos. (A) Secuencia de carga. (B) Secuencia térmica.....	<b>84</b>
<b>Figura 4-21:</b>	Comportamiento de esfuerzos residuales de borde bajo el efecto de un nuevo campo de esfuerzos producto de una compresión diametral.....	<b>85</b>
<b>Figura 4-22:</b>	Ampliación de la zona del esfuerzo residual de borde de la parte inferior. ....	<b>86</b>
<b>Figura 4-23:</b>	Aumento de esfuerzo en un ER de borde ubicado en la circunferencia interna de un anillo bajo compresión.....	<b>86</b>
<b>Figura 4-24:</b>	Ampliación de la zona de aumento de esfuerzos debido a la presencia de un esfuerzo residual al momento de aplicar una carga mecánica.....	<b>87</b>
<b>Figura 4-25:</b>	Efecto de la presencia de esfuerzos residuales de tipo indentación en el campo de esfuerzos generado por una carga mecánica. ....	<b>87</b>
<b>Figura 4-26:</b>	Ampliación de la zona de altos esfuerzos afectada por la presencia de esfuerzos residuales de tipo indentación.....	<b>88</b>
<b>Figura 4-27:</b>	Disco sometido a cargas mecánicas y térmicas visto en fotoelasticidad.....	<b>88</b>
<b>Figura 4-28:</b>	Termogramas para disco bajo compresión. (A), (B) Antes de aplicación de rampa de temperatura. (C), (D) Luego de aplicar la rampa de temperatura. ....	<b>89</b>
<b>Figura 4-29:</b>	Placa de PMMA con orificio bajo una carga de compresión no uniforme.....	<b>90</b>
<b>Figura 4-30:</b>	Termogramas para placa con concentrador bajo compresión no uniforme. (A), (B) Antes de aplicación de rampa de temperatura. (C), (D) Luego de aplicar la rampa de temperatura. ....	<b>90</b>
<b>Figura 4-31:</b>	Secuencia de corrimiento térmico en un disco en compresión y recuperación de zonas con esfuerzos residuales. ....	<b>91</b>
<b>Figura 4-32:</b>	Aumento de la recuperación del esfuerzo residual superior. ....	<b>91</b>
<b>Figura 4-33:</b>	Aumento de la zona donde se estimuló el esfuerzo residual inferior.....	<b>92</b>
<b>Figura 4-34:</b>	Aumento en la zona medios y bajos donde se recuperan los esfuerzos residuales presentes debido a la aplicación de una carga térmica.....	<b>92</b>
<b>Figura 4-35:</b>	Píxeles con y sin esfuerzos residuales seleccionados para evaluar su comportamiento dinámico.....	<b>93</b>
<b>Figura 4-36:</b>	Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 1 con ER. (B) Pixel 1.1 sin ER. ....	<b>93</b>

<b>Figura 4-37:</b>	Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 2 con ER. (B) Pixel 2.1 sin ER. ....	<b>94</b>
<b>Figura 4-38:</b>	Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 3 con ER. (B) Pixel 3.1 sin ER. ....	<b>94</b>
<b>Figura 4-39:</b>	Píxeles con y sin esfuerzos residuales seleccionados para evaluar su comportamiento por medio de los cambios de intensidad de color. ....	<b>95</b>
<b>Figura 4-40:</b>	Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 4 con ER. (B) Pixel 4.1 sin ER. ....	<b>95</b>
<b>Figura 4-41:</b>	Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 5 con ER. (B) Pixel 5.1 sin ER. ....	<b>96</b>
<b>Figura 4-42:</b>	Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 6 con ER. (B) Pixel 6.1 sin ER. ....	<b>96</b>
<b>Figura 4-43:</b>	Trayectorias de color para los puntos seleccionados en la Figura 4-35. (A) Pixel con ER 1 pixel sin ER 1.1. (B) Pixel con ER 2 pixel sin ER 2.1. (C) Pixel con ER 3 pixel sin ER 3.1. ....	<b>97</b>
<b>Figura 4-44:</b>	Trayectorias de color para los puntos seleccionados en la Figura 4-39. (A) Pixel con ER 4 pixel sin ER 4.1. (B) Pixel con ER 5 pixel sin ER 5.1. (C) Pixel con ER 6 pixel sin ER 6.1. ....	<b>98</b>
<b>Figura 4-45:</b>	Comparación de imágenes de fotoelasticidad. (A) Experimental. (B) Sintética. ....	<b>98</b>
<b>Figura 4-46:</b>	Comparación del comportamiento por canal de color. (A) Experimental. (B) Sintética. ....	<b>99</b>
<b>Figura 4-47:</b>	Comparación de la dinámica de color. (A) Experimental. (B) Sintética. ....	<b>99</b>
<b>Figura 4-48:</b>	Fotogramas de fotoelasticidad y mapas de variación de intensidad de pixel. ....	<b>101</b>
<b>Figura 4-49:</b>	Agrupamiento por medio de K-means para un disco bajo compresión diametral. (A) sin esfuerzos residuales. (B) Con esfuerzos residuales. (C) Bajo estimulación térmica. ....	<b>102</b>
<b>Figura 4-50:</b>	Agrupamiento por medio de K-means para un disco bajo compresión diametral. (A) sin esfuerzos residuales. (B) Con esfuerzos residuales de indentaciones. (C) Bajo estimulación térmica. ....	<b>103</b>
<b>Figura 4-51:</b>	Agrupamiento por medio de K-means para un anillo bajo compresión diametral. (A) Sin esfuerzos residuales. (B) Con esfuerzos residuales de en diámetro interno. (C) Bajo estimulación térmica. ....	<b>104</b>
<b>Figura 4-52:</b>	Visualización de número de órdenes por medio de una señal de intensidad de color. Para la Figura 4-13 (B) en fotogramas 10 y 700 de la secuencia de aplicación de carga. ....	<b>105</b>
<b>Figura 4-53:</b>	Apilamiento temporal de líneas verticales bajo la aplicación de carga mecánica. (A) Línea central. (B) ER superior. (C) ER inferior. ....	<b>105</b>
<b>Figura 4-54:</b>	Comportamiento temporal de los esfuerzos residuales generados por indentaciones en muestras. (A) Disco. (B) Anillo. ....	<b>106</b>
<b>Figura 4-55:</b>	Comportamiento temporal de las indentaciones cuando son sometidas a cargas térmicas. (A) Línea vertical. (B) Línea horizontal. ....	<b>107</b>
<b>Figura 4-56:</b>	Esfuerzos residuales de borde en una muestra de PMMA sometida a compresión diametral. ....	<b>108</b>
<b>Figura 4-57:</b>	(A), (B) y (C) corresponden a las imágenes I1, I3 e I5 utilizadas para el desenvolvimiento. (D) Mapa de fase envuelto. (E) Mapa de fase desenvuelto. ....	<b>108</b>
<b>Figura 4-58:</b>	Reconstrucción del campo de esfuerzos generado por el esfuerzo residual superior en órdenes de franja. ....	<b>109</b>

---

<b>Figura 4-59:</b>	(A), (B) y (C) corresponden a las imágenes I1, I3 e I5 utilizadas para el desenvolvimiento. (D) Mapa de fase envuelto. (E) Mapa de fase desenvuelto....	<b>109</b>
<b>Figura 4-60:</b>	Campo de esfuerzos generado por el esfuerzo residual de la zona inferior en órdenes de franja. ....	<b>110</b>
<b>Figura 4-61:</b>	Reconstrucción del estado de esfuerzos del esfuerzo residual en dos etapas de la secuencia de aplicación de carga. Las imágenes (A) y (C) fueron rotadas 180 °. ..	<b>110</b>
<b>Figura 4-62:</b>	(A) Anillo bajo compresión diametral con indentaciones. (B) Reconstrucción del campo de esfuerzos obtenido en ordenes de franja. ....	<b>111</b>
<b>Figura 4-63:</b>	(A), (B) y (C) corresponden a las imágenes I1, I3 e I5 utilizadas para el desenvolvimiento. (D) Mapa de fase envuelto. (E) Mapa de fase desenvuelto....	<b>112</b>
<b>Figura 4-64:</b>	Superficie de esfuerzos para el ER de tipo indentación ubicado en la parte superior del anillo. (A) Vista superior. (B) Superficie de esfuerzos. ....	<b>112</b>
<b>Figura 7-1:</b>	Modelo computacional para banco de pruebas. ....	<b>133</b>
<b>Figura 7-2:</b>	Esquema de conexiones para el sistema de control de carga. ....	<b>134</b>
<b>Figura 7-3:</b>	Esquema de conexiones para el sistema de térmico. ....	<b>135</b>

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1:</b> Ecuaciones de intensidad propuestas por Nurse para la reconstrucción del campo de esfuerzos por LST convencional.....	32
<b>Tabla 2:</b> Ecuaciones de intensidad propuestas por Briñez para la reconstrucción del campo de esfuerzos por el método CHLST.....	33
<b>Tabla 3:</b> Propiedades del polimetilmetacrilato.....	37
<b>Tabla 4:</b> Relación de elementos discretizados y el área de un disco en compresión por diferentes métodos.....	41
<b>Tabla 5:</b> Parámetros que afectan la visualización de las imágenes de fotoelasticidad.....	41
<b>Tabla 6:</b> Evaluación de la visualización de las imágenes de la Figura 2-15.....	43
<b>Tabla 7:</b> Evaluación de visualización de imágenes presentadas en la Figura 2-15.....	44
<b>Tabla 8:</b> Listado de procesos de manufactura que generan esfuerzos residuales.....	53
<b>Tabla 9:</b> Tiempos de ejecución (minutos) para algoritmos de evaluación de superficie bajo diferentes porcentajes de submuestreo.....	73
<b>Tabla 10:</b> Comparación del error cuadrático medio obtenida entre las señales temporales de los puntos 1 y 2 para cada submuestreo.....	73
<b>Tabla 11:</b> Número óptimo de categorías y sus índices de evaluación para el agrupamiento por K-means.....	78
<b>Tabla 12:</b> Valores de referencia de las imágenes I1, I3 e I5 para la secuencia de aplicación de carga.....	80
<b>Tabla 13:</b> Número de fotograma, valores de temperatura y carga para las imágenes I1, I3 e I5 asociadas a la secuencia térmica.....	82
<b>Tabla 14:</b> Resultado de las métricas de comparación de las imágenes de la Figura 4-45.....	99
<b>Tabla 15:</b> Variación media de intensidad de pixel entre los ER de la Figura 4-48 y sus referencias.....	100
<b>Tabla 16:</b> Criterios de selección para prototipo.....	131
<b>Tabla 17:</b> Lista de elementos principales del banco de pruebas numerados.....	132





## 1. INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos residuales se encuentran presentes en la mayoría de componentes mecánicos o estructurales que son sometidos a procesos de deformación plástica o térmica. En muchos casos, los esfuerzos residuales son un factor determinante en las propiedades mecánicas como la resistencia a la fatiga, estabilidad dimensional, resistencia a la corrosión y resistencia última [1]. Desde 1841, año donde se publicó la primera referencia cuantificable sobre esfuerzos residuales, se ha logrado mejorar los procesos de producción [2], [3]. De esta forma, se ha buscado no solo reducir el impacto negativo de los esfuerzos residuales, sino generar efectos benéficos que aumenten las propiedades mecánicas de los elementos. Adicionalmente, el estudio de los esfuerzos residuales ha permitido reducir el sobredimensionamiento de componentes mecánicos bajo el concepto de seguridad operacional. Permitiendo diseñar y crear componentes optimizados a nivel industrial [4].

En este capítulo se presenta la justificación que motivó la realización del presente trabajo, considerando la importancia de los esfuerzos residuales y algunos antecedentes históricos. Se reportan algunos trabajos donde los autores utilizaron la fotoelasticidad de forma eficiente e incluso plantean la opción de utilizar esta técnica para la evaluación de calidad en líneas de producción. Esta sección cierra resaltando la trayectoria de los directores en el campo del análisis de esfuerzos por medio de la fotoelasticidad y presentando los aportes desarrollados a lo largo de sus carreras en este tema.

Posteriormente se presenta el objetivo general, acompañado de los cuatro objetivos específicos propuestos para este trabajo. Estos últimos son desarrollados a lo largo de los tres capítulos siguientes y dan cumplimiento al objetivo general.

Finalmente, se presentan las contribuciones publicadas alrededor de este trabajo y la estructura bajo la cual se encuentra el contenido de los siguientes capítulos.

## 1.1 Justificación

El desarrollo de este trabajo se llevó a cabo en el marco de la ejecución del proyecto con código P20211, de la convocatoria interna de proyectos del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) del año 2019. El cual se titula “Evaluación del campo de esfuerzos en modelos bajo cargas mecánicas basadas en termografía infrarroja activa y fotoelasticidad digital por corrimiento de carga”. De manera adicional al ITM, también hicieron parte del proyecto la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín y la Institución Universitaria Pascual Bravo.

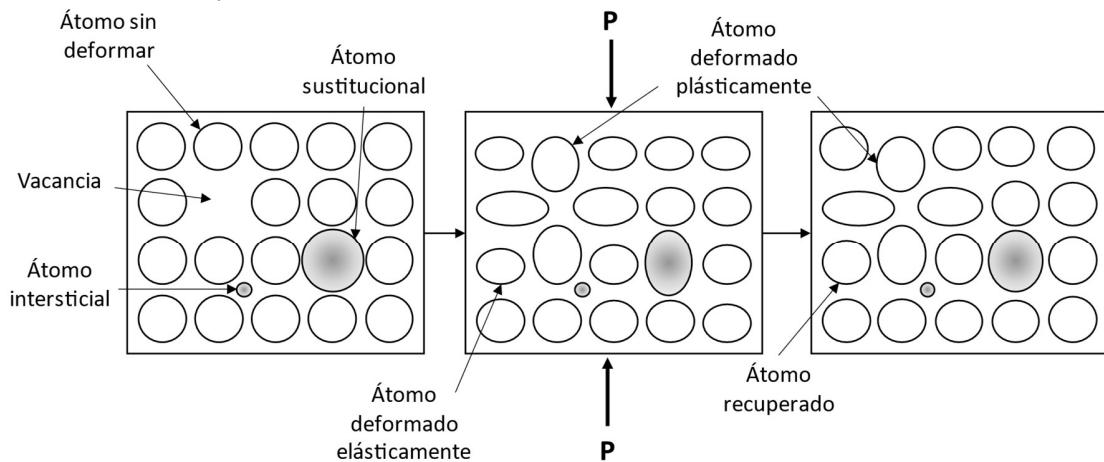
En el proyecto de investigación P20211 se desarrolló una evaluación de la respuesta mecánica de muestras birrefringentes sometidas simultáneamente a cargas de compresión y estimulación térmica. La evaluación se realizó por medio de la integración de las técnicas de desplazamiento de fase por corrimiento de carga y de temperatura. Obteniendo como principal resultado una estrategia computacional híbrida para evaluar el campo de esfuerzos, combinando procedimientos ópticos y algoritmos de desenvolvimiento de fase.

Los esfuerzos residuales, de ahora en adelante ER, están presentes en la mayoría de los elementos o piezas funcionales, desde componentes electrónicos hasta el fuselaje de aviones o naves espaciales [5]–[8]. Este tipo de esfuerzos pueden tener un comportamiento benéfico o perjudicial sobre los materiales, dependiendo de su ubicación, dirección y magnitud. En casos críticos pueden llevar al fallo anticipado o catastrófico de componentes que se encuentren en servicio [9].

Los ER son una respuesta mecánica a cargas externas que generan deformaciones plásticas en el interior de un material, generalmente producto de un proceso de manufactura. Vistas desde un punto volumétrico, estas deformaciones deben ser contenidas por las áreas aledañas con el fin de conservar la dimensionalidad estructural. Por esta razón se considera que los esfuerzos residuales se encuentran atrapados en el material [3].

La Figura 1-1 muestra el comportamiento de algunos defectos presentes en la microestructura de un material, al aplicar y retirar una carga mecánica **P**. Estos defectos funcionan como concentradores de esfuerzos, es decir, incrementan el valor del esfuerzo aplicado. Pudiendo superar el límite elástico y produciendo deformaciones internas. Finalmente, al retirar la carga **P** las deformaciones plásticas ejercen un esfuerzo sobre las zonas aledañas, el cual se conoce como esfuerzo residual.

**Figura 1-1:** Generación de esfuerzos residuales a partir de defectos microestructurales. Adaptado de [10].



Existen antecedentes de fallos producidos por esfuerzos residuales reconocidos históricamente, uno de ellos es el caso de la grieta presente en la campana de la libertad, en Estados Unidos. Esta grieta fue ocasionada por ER resultantes de un enfriamiento no uniforme posterior a su fundición. Por otro lado, en 1967 los ER presentes en una viga del puente de 680 metros de longitud, Silver Bridge, ocasionaron la aparición de una grieta de 2.5 mm, lo que ocasionó el colapso del puente, hecho que dejó 46 fallecidos. En otro ámbito, en Países Bajos entre 1979 y 1986, se registró la muerte de más de 200 personas debido a fallos causados por fatiga mecánica en implantes de válvulas cardíacas. Los fallos se asociaron a la presencia de ER en un componente interno de las válvulas [11]–[15].

**Figura 1-2:** Colapso del puente Silver Bridge en diciembre de 1967. Tomado de [16].



El estudio de los ER ha tomado gran importancia por diferentes factores. El principal es el peligro que conlleva no considerarlos en la fase de diseño, pues esto ha llevado a fallas catastróficas durante la operación de elementos mecánicos, estructurales o incluso médicos [1], [14], [17]. Por otro lado, la identificación de los ER ha permitido mejorar los procesos de manufactura y hacerlos más eficientes en términos de la calidad de los productos [18], [19].

Existen diferentes métodos para medir ER, la mayoría de estos métodos son destructivos o semi destructivos, pues es necesario remover una parte de la muestra para analizar su deformación. como la perforación de agujeros "*hole drilling method*" [20] También existen técnicas no destructivas, las cuales se basan en la medición indirecta de los ER por medio de variables externas [20]–[23]. Entre ellas están la difracción de rayos X y los métodos magnéticos [24], [25].

La fotoelasticidad es una técnica de medición no destructiva que ha sido utilizada en el estudio de los campos de esfuerzos sobre los materiales [26]. Adicionalmente, por medio de la fotoelasticidad se ha estudiado el comportamiento de los ER en materiales birrefringentes. En [27] los autores desarrollaron un sistema para medir esfuerzos en rodamientos basado en esta técnica, la cual les permitió identificar las partes del proceso de manufactura donde se generaban ER y como estos afectaban la medición del campo de esfuerzos.

Por otro lado, la presencia de ER en artículos de vidrio es ineludible debido a los gradientes de temperatura presentes en los procesos de fabricación. Por esta razón y aprovechando la birrefringencia existente en este material, algunos autores han reportado la implementación de sistemas de medición de ER en líneas de producción. En las referencias [18], [19], [28], [29] se reporta el uso de la fotoelasticidad para conocer el esfuerzo y la resistencia de varios productos a partir de los ER en tres dimensiones. También mencionan la utilidad de esta técnica para evaluar superficies con geometrías complejas y realizan un planteamiento sobre los beneficios de este tipo de medición de ER en elementos como botellas, vasos, fibras, entre otros [30].

En el estudio presentado en [31] sobre cristales de poliestireno, los autores realizan una serie de experimentos para determinar la relación entre las temperaturas de moldeo y enfriamiento con los esfuerzos residuales generados en el proceso. Encontrando por medio de la fotoelasticidad que factores como la temperatura y el espesor del material son determinantes en la magnitud y distribución de los ER.

En los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas para la implementación de la fotoelasticidad en el estudio de campos de esfuerzos, puntualmente en técnicas computacionales, el desenvolvimiento de fase y la recuperación del campo de esfuerzos. Por ejemplo, en [32] se describe una técnica para el análisis de patrones en imágenes de fotoelasticidad usando información de textura y técnicas de aprendizaje de máquinas. En [33] los autores analizaron las diferencias en el campo de esfuerzos asociadas al uso de diferentes fuentes de iluminación y a variaciones en los valores de carga. En [34] se reporta la identificación de las zonas de altas concentraciones de franjas por medio del análisis de texturas y el uso de fuentes de iluminación infrarroja.

De igual forma, en [35] se describe el proceso para la recuperación de información en zonas de alta densidad de franjas para casos donde se aplican cargas dinámicas. En [36] identifican zonas de alta concentración de esfuerzos por medio de descriptores de textura y estudian el efecto de las longitudes de onda sobre la densidad de franjas. Durante el congreso internacional de ingeniería mecánica y mecatrónica de 2017 se presentó [37], donde los autores describen el aumento en la carga mecánica aplicada como una técnica para hacer crecer regiones con pérdida de información.

En [38] los autores desarrollaron una nueva forma de implementar en simultaneo las técnicas de fotoelasticidad y termografía para hallar el campo de esfuerzos sobre una muestra bajo una carga mecánica y térmica. Esto se logra en base al método "*Computational hybrid phase shifting technique*" (CHPST) desarrollado en [39]. Para los casos donde el corrimiento de franjas es producto del aumento de temperatura se desarrolló la técnica conocida como "*Thermal transient stepping technique*" (TTST) [40] La cual hace uso de algoritmos computacionales para caracterizar esfuerzos residuales a partir de los cambios de color en los patrones de franja en una secuencia de imágenes de fotoelasticidad.

Durante este trabajo se buscó aprovechar la experiencia de los directores en el campo de la fotoelasticidad y la termografía para apoyar el proceso de estudio de los esfuerzos residuales. De forma específica, la relación entre los esfuerzos residuales y un campo de esfuerzos producto de nuevas a cargas mecánicas o térmicas en tiempo real y sin destruir la muestra. Como resultado se desarrolló un método para determinar el comportamiento de los esfuerzos residuales bajo estas circunstancias.

La presencia de esfuerzos residuales ha sido motivo de estudio debido a su efecto sobre las propiedades mecánicas de los materiales. Ignorar su comportamiento o presencia ha ocasionado fallos súbitos y catastróficos, lo que ha llevado a pérdidas humanas y económicas. En este trabajo se utilizó la fotoelasticidad para estudiar los campos de esfuerzos generados por esfuerzos residuales. Esta técnica permite visualizar e identificar los ER en tiempo real sin destruir la muestra. Al mismo tiempo se planteó la respuesta a la siguiente pregunta de investigación, ¿Cómo se ve afectado el campo de esfuerzos por la presencia de esfuerzos residuales dentro de una pieza que es sometida a cargas mecánicas y térmicas?

## 1.2 Objetivos

### ▪ General

Desarrollar un método para la determinación del campo de esfuerzos de muestras bajo la influencia de esfuerzos residuales, sometidas a cargas mecánicas y térmicas, empleando la técnica de saltos térmicos transitorios y descriptores dinámicos de textura.

### ▪ Específicos

1. Diseñar y construir un banco de pruebas para llevar a cabo de forma simultánea ensayos de fotoelasticidad en reflexión y termografía, modificando los valores de la carga y la temperatura aplicadas en muestras de distintas geometrías.
2. Establecer una metodología para la adquisición de imágenes de fotoelasticidad y termografía, definiendo factores como los sensores, la fuente de iluminación y la preparación de las muestras, con el fin de obtener imágenes de alta calidad.
3. Establecer una metodología para el procesamiento de las imágenes de fotoelasticidad y termografía, usando como base el método híbrido de saltos térmicos transitorios para la reconstrucción del campo de esfuerzos.
4. Validar los resultados obtenidos experimentalmente con modelos analíticos simulados computacionalmente, por medio de métricas como MSE o SSIM que permitan explicar la relación entre el campo de esfuerzos con el tipo de esfuerzo residual, la geometría, el espesor, la temperatura y la carga aplicada.

### 1.3 Contribuciones

Con el presente trabajo se busca aportar en el estado del arte del estudio del campo de esfuerzos y los esfuerzos residuales por medio de la fotoelasticidad, demostrando las ventajas y aplicabilidad que está técnica tiene a nivel industrial en términos del control de calidad y de los procesos de manufactura. Por otro lado, se identifica el efecto de los esfuerzos residuales sobre el campo de esfuerzos en diferentes configuraciones de origen y ubicación.

La integración de la fotoelasticidad y la termografía de forma simultánea por medio de métodos híbridos de corrimiento de fase permite detectar y caracterizar la evolución del comportamiento del campo de esfuerzos en muestras que presenten esfuerzos residuales, sometidas a estímulos mecánicos y térmicos, mediante la reconstrucción y comparación de los campos de esfuerzos y temperatura.

Durante el desarrollo de este trabajo se presentaron dos ponencias internacionales con publicación de evento científico. Sobre la caracterización de esfuerzos residuales a partir de las dinámicas de color y el método TTST. El primero como autor principal y el segundo como coautor.

- Rendón-Arango, J., Fandiño Toro, H., Briñez de León, J., y Restrepo Martínez, A. "A dynamic characterization of thermal stimulation for residual stresses using digital photoelasticity", Proc. SPIE 11841, Optics and Photonics for Information Processing XV, 1184105 (1 August 2021); <https://doi.org/10.1117/12.2594518>.
- Fandiño-Toro, H., Rendón-Arango, J., Briñez-de León, J., y Restrepo-Martínez, A. "Thermal transient stepping: a powerful thermal-based approach for evaluating the stress field by using digital photoelasticity", Proc. SPIE 11509, Optics and Photonics for Information Processing XIV, 1150909 (21 August 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2568751>

## 1.4 Estructura del documento

El presente documento está distribuido en siete capítulos, siendo el primero la introducción, la cual se divide en justificación, objetivos, contribuciones y estructura del documento. Por otro lado, la estructura de los capítulos 2, 3 y 4 es diferente, siendo cada uno segmentado en las secciones de estado del arte, metodología, resultados y discusión.

El capítulo dos se centra en las bases teóricas y experimentales respecto a la fotoelasticidad, su funcionamiento, aplicaciones y avances desarrollados. Planteando los lineamientos utilizados durante las adquisiciones de fotoelasticidad realizadas durante este trabajo.

En el capítulo tres se describen los fundamentos teóricos alrededor de los esfuerzos residuales, como se generan, su comportamiento usual y el efecto que tienen en las propiedades mecánicas de los materiales. También se reporta el procedimiento empleado para generar dos tipos de esfuerzos residuales en las muestras de polimetilmetacrilato y su resultado.

El capítulo cuatro presenta el desarrollo de las etapas de preprocesamiento, procesamiento y análisis de resultados sobre los videos de fotoelasticidad adquiridos. En términos de los algoritmos implementados para caracterizar y evaluar los esfuerzos residuales. Adicionalmente, se enseña la reconstrucción tridimensional de los campos de esfuerzos con presencia de ER.

En el capítulo cinco se encuentran las conclusiones encontradas en base al estudio del comportamiento de los esfuerzos residuales, respecto a un campo de esfuerzos generado por una carga externa o por una estimulación térmica. Adicionalmente, se mencionan una serie de limitaciones encontradas y recomendaciones para trabajos futuros.

En los últimos dos capítulos se encuentran las referencias utilizadas a lo largo del documento y los anexos.



## **2. FOTOELASTICIDAD DIGITAL**

Durante este capítulo se exponen dos conceptos fundamentales en el desarrollo teórico de este trabajo. El primero es el campo de esfuerzos, el cual hace referencia a la distribución de esfuerzos dentro de un material. El segundo es la fotoelasticidad, haciendo énfasis en la importancia de los patrones de franja, ya que estos contienen la información sobre la distribución de esfuerzos y los ER presentes en las muestras evaluadas.

Adicionalmente, se presenta la metodología empleada para adquirir la información de fotoelasticidad. Definiendo elementos del montaje experimental como la fuente de aplicación de carga, la fuente de iluminación y la cámara de adquisición. También se exponen las técnicas computacionales para recuperar los campos de esfuerzos a partir de los fotogramas de fotoelasticidad. Las cuales se aplicaron en adquisiciones experimentales y en conjuntos de imágenes computacionales. Reconstruidas a partir de modelos matemáticos para geometrías como discos y placas con concentradores sometidas a cargas mecánicas de compresión.

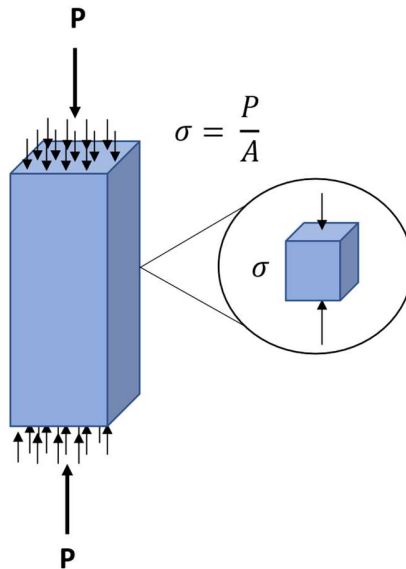
### **2.1 Estado del arte**

#### **2.1.1 Campo de esfuerzos**

Antes de abordar el campo de esfuerzos en profundidad es necesario definir el concepto de fuerza, que es uno de los más estudiados en el campo de la física mecánica. Existen dos tipos de fuerza, una es de cuerpo y describe la relación entre cuerpos que no se encuentran en contacto físico. Por ejemplo, la fuerza magnética o la gravedad. El segundo tipo de fuerza es de superficie, la cual se genera por el contacto físico entre dos o más cuerpos. Dependiendo de su dirección puede ser un fenómeno de compresión, tracción, flexión u otro [41].

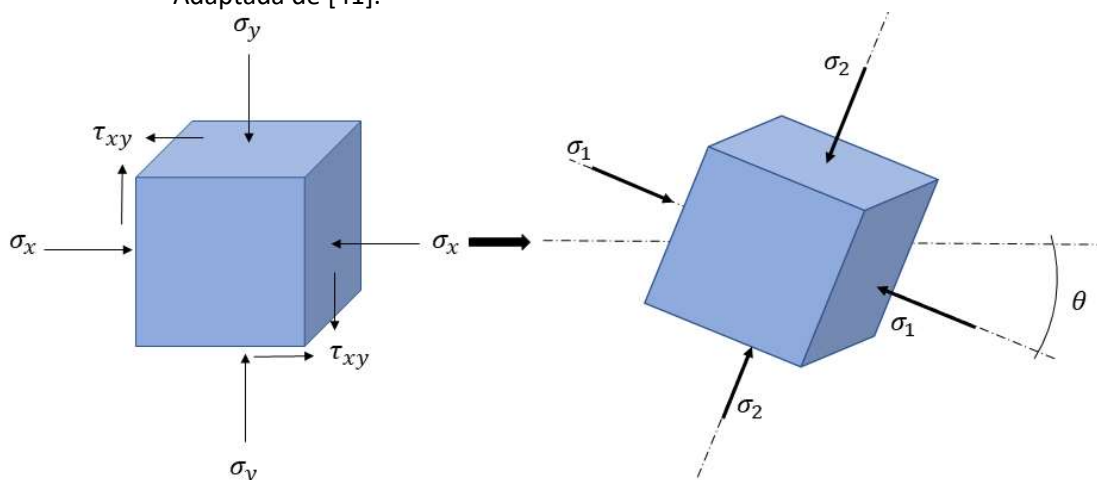
Se conoce como esfuerzo a la intensidad de la fuerza que actúa en determinada dirección sobre un cuerpo. En otras palabras, el esfuerzo es la relación entre la fuerza y el área superficial donde es aplicada [41]. La Figura 2-1 muestra una barra rectangular sometida a una carga compresiva  $P$ , la cual genera un esfuerzo  $\sigma$  sobre el área  $A$  de la sección transversal.

**Figura 2-1:** Ejemplificación del esfuerzo normal  $\sigma$  en una barra rectangular. Adaptada de [41].



Para todos los elementos infinitesimales de un material sometido a una carga, los esfuerzos presentes se pueden distribuir en términos de dos tipos de componentes. En una están los esfuerzos normales o axiales ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ), las cuales son responsables de las deformaciones longitudinales. El otro tipo de componentes son los esfuerzos tangenciales o cortantes ( $\tau_{xy}$ ), los cuales se orientan paralelos al plano de acción de la fuerza y producen las deformaciones geométricas. Como resultado de esta distribución se obtiene un sistema de esfuerzos en equilibrio respecto a un plano de referencia, como se aprecia en la Figura 2-2. Al rotar el plano de referencia  $\theta$  ° los esfuerzos cortantes desaparecen y las componentes resultantes son  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , las cuales se conocen como esfuerzos principales y representan el mayor y menor esfuerzo normal para cada posición dentro de la muestra [41].

**Figura 2-2:** Ejemplificación de los esfuerzos normales y cortantes, y los esfuerzos principales. Adaptada de [41].



Las Ecuación 1 - 3 permiten calcular los esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y su respectiva dirección  $\theta$ , para cada ubicación dentro del modelo en función de los esfuerzos axiales  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y el cortante  $\tau_{xy}$ . Los esfuerzos principales y su dirección permiten definir el estado de cargas mecánicas dentro del elemento de estudio, el cual es representado como mapa de esfuerzos.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

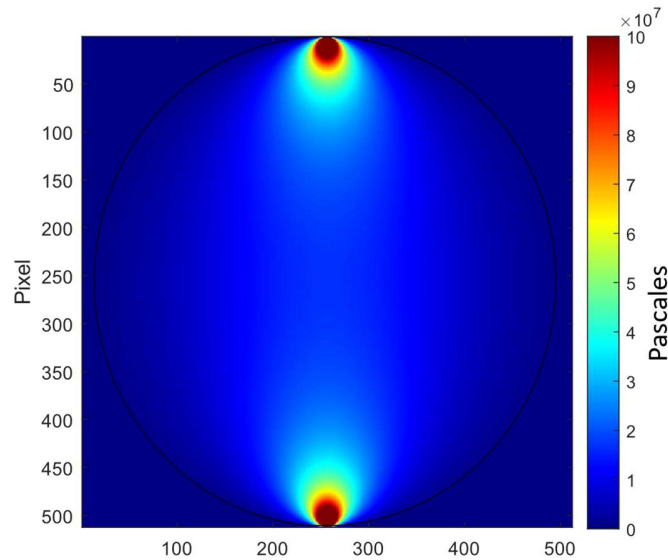
$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

El mapa de esfuerzos describe el comportamiento mecánico de una pieza bajo el efecto de una carga estática o dinámica, por medio de la distribución de los esfuerzos principales a lo largo de la pieza [33], [42]. Esto es importante para determinar las zonas con esfuerzos máximos ya que son las zonas con mayor probabilidad de fallar. Generalmente se encuentran cerca de los puntos de aplicación de fuerza o en discontinuidades geométricas, a las que también se les conoce como concentradores de esfuerzos [43]–[45].

En la Figura 2-3 se presenta el campo de esfuerzos para un disco bajo compresión diametral en términos de la diferencia de esfuerzos principales en Pascales, visto como mapa de colores. Donde las zonas de color rojo corresponden a los puntos de aplicación de carga.

**Figura 2-3:** Campo de esfuerzos para un disco bajo compresión diametral en términos de la diferencia de esfuerzos principales, visto como mapa de colores. Autoría propia.

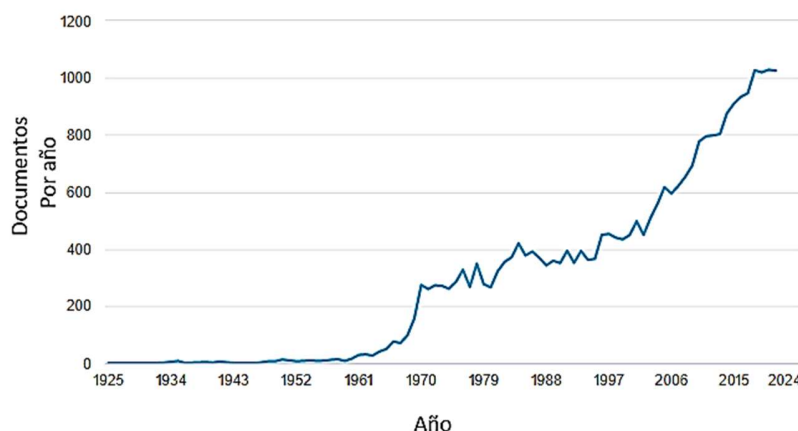


### 2.1.2 Fotoelasticidad

Luego de definir el campo de esfuerzos se puede abordar el concepto de fotoelasticidad. Esta es una técnica experimental de campo completo, utilizada para analizar la distribución de esfuerzos en piezas sometidas a cargas mecánicas.

A principios de los años 60's se presentó una importante evolución en esta técnica debido al desarrollo de la era digital [46]. Desde entonces se pueden encontrar más de 25.000 artículos publicados en Scopus relacionados con la fotoelasticidad, en áreas como la medicina, odontología e ingeniería. La Figura 2-4 muestra la tendencia en el crecimiento respecto a la investigación al rededor del campo de la fotoelasticidad.

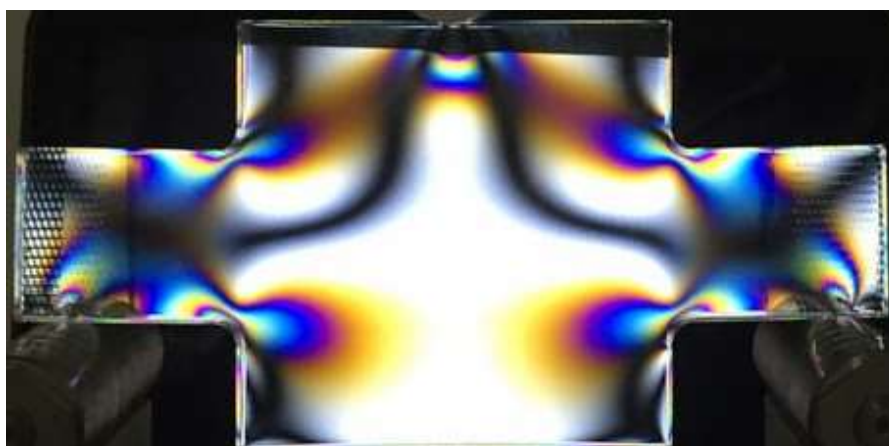
**Figura 2-4:** Publicaciones en Scopus en los últimos años relacionadas con fotoelasticidad. Consultado en marzo de 2022.



Esta técnica aprovecha que existen materiales que experimentan doble índice de refracción o birrefringencia bajo la presencia de esfuerzos mecánicos [47], [48]. Este fenómeno se observa utilizando montajes ópticos de luz polarizada, y se evidencia mediante la presencia de franjas de color que modulan la información de los esfuerzos en el cuerpo cargado, como se aprecia en la Figura 2-5.

En los patrones de colores obtenidos por polarizaciones lineales destacan dos tipos de franjas. Las primeras, de igual color son conocidas como isocromáticas y representan zonas donde la diferencia de esfuerzos principales es constante. Por otro lado, están las franjas oscuras, conocidas como isoclínicas, las cuales contienen la información de la dirección de los esfuerzos principales [49].

**Figura 2-5:** Montaje de fotoelasticidad en flexión con polarizador plano para muestra de acrílico. Autoría propia.



En un montaje de fotoelasticidad, el valor de la intensidad de color correspondiente a los patrones de franja capturados es dependiente a la configuración del arreglo óptico. Es decir, factores como

el sensor de la cámara, los ángulos de polarización y el comportamiento espectral de la fuente de iluminación alteran la visualización y el registro de las imágenes de fotoelasticidad. Por lo tanto, es necesario llevar un proceso de calibración en este tipo de experimentos [50].

La luz emergente de la fuente de iluminación debe ser polarizada antes y después de atravesar la muestra birrefringente para obtener el retardo de fase generado por esta, el cual es visto en patrones de colores cuando se utiliza una fuente de luz blanca. En caso de utilizar una fuente monocromática, los patrones se verán en tonos de gris [51].

### 2.1.3 Ley de esfuerzo óptico

La relación entre el retardo de fase y la diferencia de esfuerzos principales en un elemento birrefringente sometido a una carga se define matemáticamente mediante la Ecuación 4, la cual se conoce como Ley de Esfuerzo óptico. En esta ecuación  $h$  es el espesor del material,  $C$  su coeficiente de esfuerzo-óptico,  $\lambda$  la longitud de onda de la luz incidente [36].

$$\Delta\delta = \frac{2\pi h C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Ecuación 4}$$

Por otro lado, la Ecuación 5 expresa el valor de orden de franja  $N$  de un pixel en términos de su retardo de fase  $\Delta\delta$  dividido por  $2\pi$ .

$$N = \frac{\Delta\delta}{2\pi} \quad \text{Ecuación 5}$$

Al reemplazar el retardo de fase  $\Delta\delta$  de la Ecuación 5 en la Ecuación 4, se obtiene la Ecuación 6. La cual expresa la diferencia de esfuerzos principales a partir del orden de franja  $N$ . El cual se da en función del espesor del material  $h$ , su coeficiente óptico  $C$ , la longitud de onda de la luz incidente  $\lambda$  y la diferencia de esfuerzos principales  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ . Donde las dos primeras son constantes referentes al material y la tercera a la fuente de iluminación. El número del orden de franja es proporcional al valor del esfuerzo presente.

$$N = \frac{h * C * (\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} \quad \text{Ecuación 6}$$

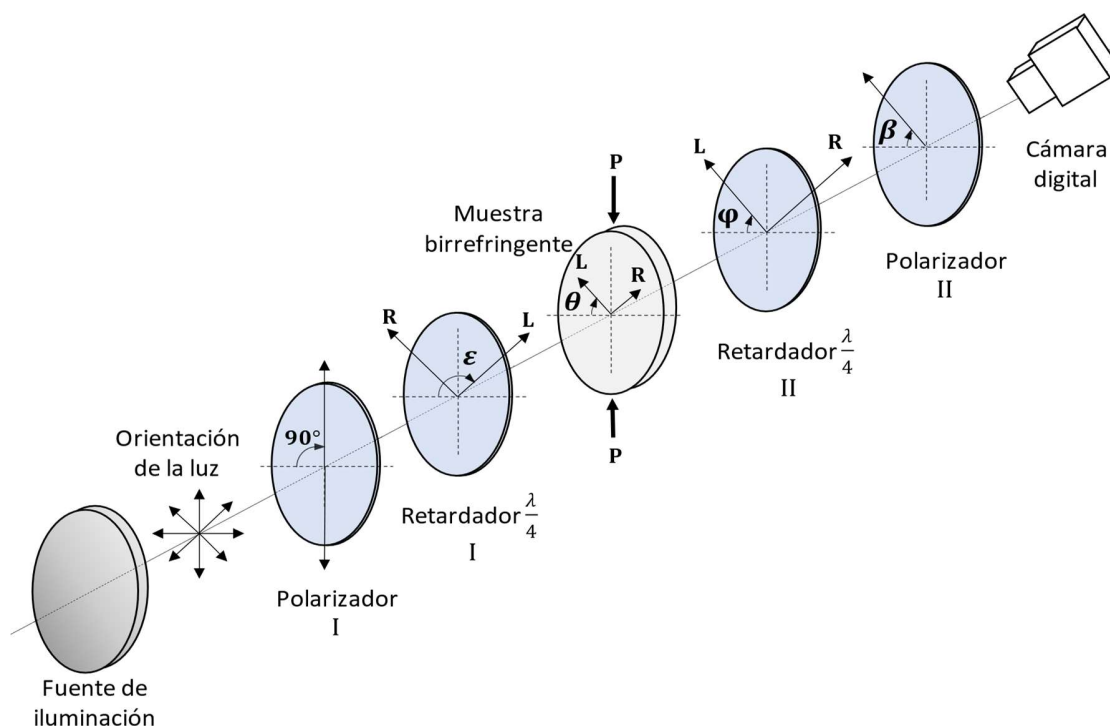
### 2.1.4 Polarización circular

Si bien la literatura reporta una variedad de montajes ópticos utilizados en estudios de fotoelasticidad digital, es común encontrar montajes donde la luz que incide sobre la muestra cargada se polariza circularmente mediante el conjunto de polarizadores lineales y retardadores de cuarto de onda [52]. Por medio de este tipo de montaje Hecker and Morche se convirtieron en los primeros en obtener los parámetros isoclínicos e isocromáticos de forma simultánea para una muestra cargada mecánicamente [53].

La Ecuación 7 representa las intensidades registradas para un valor de esfuerzo arbitrario por un montaje de fotoelasticidad con polarización circular, como el que se presenta en la Figura 2-6. Donde los ángulos de  $\varphi$  y  $\beta$  representan la orientación del polarizador II y el retardador  $\frac{\lambda}{4}$  II respectivamente, respecto al eje de referencia. El término  $\delta$  hace referencia al retardo de fase inducido por la muestra birrefringente sobre la luz incidente. Y el ángulo  $\theta$  es la orientación del eje lento dentro de la muestra, respecto al eje de referencia [54], [55].

$$I = I_b + \frac{I_a}{2} + \frac{I_a}{2} * [\sin 2(\beta - \varphi) \cos(\delta) - \sin 2(\theta - \varphi) \cos 2(\beta - \varphi) \sin(\delta)] \quad \text{Ecuación 7}$$

**Figura 2-6:** Montaje de fotoelasticidad para un polariscopio circular. Adaptado de [56].



## 2.1.5 Evaluación del campo de esfuerzos

En 1986 Hecker and Morche presentaron un método conocido como corrimiento de fase, “*Phase Shifting technique*” (PST) [53]. Este consiste en generar un retardo de fase por medio del cambio en el ángulo de polarización de la luz, obteniendo tres patrones de franjas diferentes para un mismo estado de esfuerzos. Los ángulos utilizados fueron de  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $-60^\circ$ , manteniendo un delta de fase igual respecto a la imagen central. Por medio de los patrones de franjas obtenidos calcularon la intensidad de luz incidente, la diferencia de esfuerzos principales y su dirección [57]–[60].

Posteriormente se desarrollaron otras técnicas para generar corrimientos de fase modificando los ángulos de polarización y los saltos de carga. A esta técnica se le conoce como “*Load Stepping technique*” (LST). La Tabla 1 muestra las ecuaciones propuestas por Nurse para la reconstrucción del campo de esfuerzos con 6 imágenes en diferentes configuraciones de carga y polarización [52], [61].

**Tabla 1:** Ecuaciones de intensidad propuestas por Nurse para la reconstrucción del campo de esfuerzos por LST convencional. Adaptado de [56].

#	$\rho$	$\gamma$	$\phi$	$\beta$	Ecuación de intensidad
1	90	45	-45	90	$\text{Img}_1 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 + \cos(\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$
2	90	45	-45	0	$\text{Img}_2 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 - \cos(\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$
3	90	45	-45	90	$\text{Img}_3 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 + \cos(\delta + \Delta\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$
4	90	45	-45	0	$\text{Img}_4 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 - \cos(\delta + \Delta\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$
5	90	45	-45	90	$\text{Img}_5 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 + \cos(\delta - \Delta\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$
6	90	45	-45	0	$\text{Img}_6 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 - \cos(\delta - \Delta\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$



### ▪ Técnica híbrida de corrimiento de fase computacional

En [62] los autores recopilan las técnicas empleadas a lo largo de los años para la adquisición y el análisis de la información obtenida por fotoelasticidad. Al realizar la comparación entre todas las técnicas evaluadas, los autores encontraron que la más completa era el *PST*, ya que permite determinar valores isoclínicos e isocromáticos de forma simultánea y con mayor precisión.

En 2018 fue presentado un método híbrido para la reconstrucción del campo de esfuerzos, conocido como “*Computational hybrid phase shifting technique*” (*CHPST*). Este método requiere el uso de *LST* para obtener tres de las seis imágenes mencionadas en la Tabla 1. Específicamente la primera, la tercera y la quinta, las cuales hacen referencia al campo claro y se nombrarán  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  en adelante. Las imágenes dos, cuatro y seis ( $I_2$ ,  $I_4$  e  $I_6$ ) correspondientes al campo oscuro son obtenidas de un procesamiento computacional a partir de las primeras tres imágenes. La Tabla 2 contiene las ecuaciones correspondientes al desarrollo de esta técnica [39].

**Tabla 2:** Ecuaciones de intensidad propuestas por Briñez para la reconstrucción del campo de esfuerzos por el método CHLST. Adaptado de [39].

#	$\rho$	$\gamma$	$\phi$	$\beta$	Ecuación de intensidad
1	90	45	-45	90	$\text{Img}_1 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 + \cos(\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$
2	Computacional				$\text{Img}_2 = \text{Inv}(\text{Img}_1)$
3	90	45	-45	90	$\text{Img}_3 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 + \cos(\delta + \Delta\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$
4	Computacional				$\text{Img}_4 = \text{Inv}(\text{Img}_3)$
5	90	45	-45	90	$\text{Img}_5 = \frac{1}{n} \int_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda=\lambda_n} \frac{I_a(\lambda)}{2} [1 + \cos(\delta - \Delta\delta)] * S_{\text{RGB}}(\lambda) d\lambda$
6	Computacional				$\text{Img}_6 = \text{Inv}(\text{Img}_5)$

### ▪ Técnica de salto térmico transitorio

En [38] los autores desarrollaron una nueva forma de implementar en simultaneo las técnicas de fotoelasticidad y termografía en base al método *CHLST* desarrollado en [39]. En este caso el corrimiento de franjas es producto de la estimulación térmica generada sobre la muestra. Para llevar a cabo este método se debe implementar una estrategia que permita seleccionar correctamente las imágenes correspondientes a  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$ . Esto implica aplicar el salto térmico ideal para generar un corrimiento de franjas que permita desenvolver el campo de esfuerzos.

## 2.2 Metodología

### 2.2.1 Imágenes de fotoelasticidad digital

#### ▪ Imágenes sintéticas a partir de modelos analíticos

Los modelos analíticos son la representación matemática del estado de esfuerzos para cada punto dentro de las geometrías analizadas, respecto a una carga externa **P**. A partir del estado de esfuerzos teórico, esfuerzos principales y cortante, es posible reconstruir una imagen de fotoelasticidad sintética para una muestra sometida a una carga **P**.

#### Modelo de disco bajo compresión diametral

Las Ecuación 8 - 10 a continuación, presentan el estado plano de esfuerzos para cada posición **x, y** de un disco bajo compresión diametral. Donde  $\sigma_{xx}$  y  $\sigma_{yy}$  representan los esfuerzos normales en las direcciones correspondientes, mientras  $\tau_{xy}$  corresponde al esfuerzo cortante. Por otro lado, **P** es la fuerza aplicada, **R** y **t** son el radio y el espesor del disco respectivamente [63], [64].

$$\sigma_{xx} = -\frac{2 * P}{\pi * t} \left\{ \frac{x^2(R - y)}{((R - y)^2 - x^2)^2} + \frac{x^2(R + y)}{((R + y)^2 + x^2)^2} - \frac{1}{2 * R} \right\} \quad \text{Ecuación 8}$$

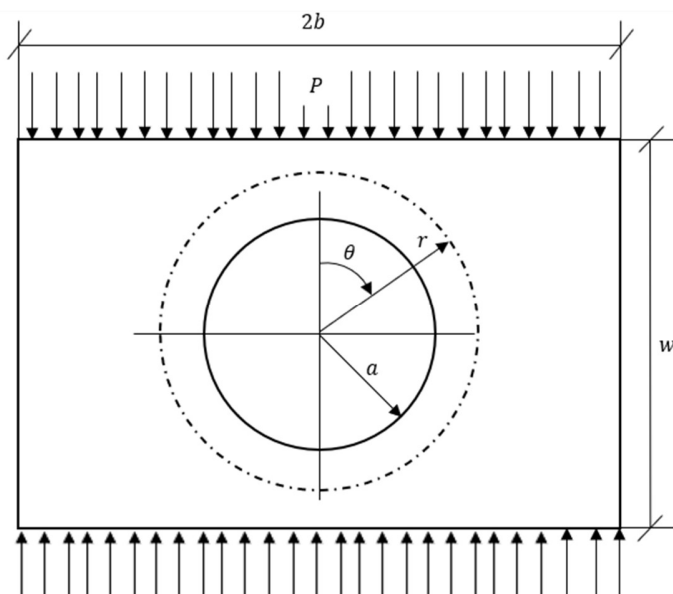
$$\sigma_{yy} = -\frac{2 * P}{\pi * t} \left\{ \frac{(R - y)^3}{((R - y)^2 - x^2)^2} + \frac{(R + y)^3}{((R + y)^2 + x^2)^2} - \frac{1}{2 * R} \right\} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2 * P}{\pi * t} \left\{ \frac{x * (R + y)^2}{((R + y)^2 + x^2)^2} - \frac{x * (R - y)^2}{((R - y)^2 + x^2)^2} \right\} \quad \text{Ecuación 10}$$

#### Modelo de placa con concentrador

Este modelo está compuesto por una placa rectangular con una perforación circular en el centro de radio **a**, el ancho de la placa es **2b** y su longitud **w**. Su espesor no se tiene en cuenta al considerarlo como estado plano de esfuerzos. La Figura 2-7 muestra el modelo bajo una carga distribuida **P** y su reacción en la zona inferior. También se muestra una representación en coordenadas polares, en términos de **r** y  $\theta$  [65].

**Figura 2-7:** Representación de las cargas estáticas y variables presentes en el modelo de placa con concentrador. Adaptado de [65].



Las Ecuación 11 - 13 presentan los esfuerzos, radial ( $\sigma_r$ ), angular ( $\sigma_\theta$ ) y cortante ( $\sigma_{r\theta}$ ) para cada ubicación  $r$ ,  $\theta$  dentro de la placa [65].

$$\sigma_r = \frac{P}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{p}{2} \left( 1 - \frac{4 * a^2}{r^2} + \frac{3 * a^4}{r^4} \right) * \cos(2\theta) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{p}{2} \left( 1 + \frac{3 * a^4}{r^4} \right) * \cos(2\theta) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\sigma_{r\theta} = -\frac{P}{2} \left( 1 + \frac{2 * a^2}{r^2} - \frac{3 * a^4}{r^4} \right) * \sin(2\theta) \quad \text{Ecuación 13}$$

#### ▪ Valores de intensidad sintéticos

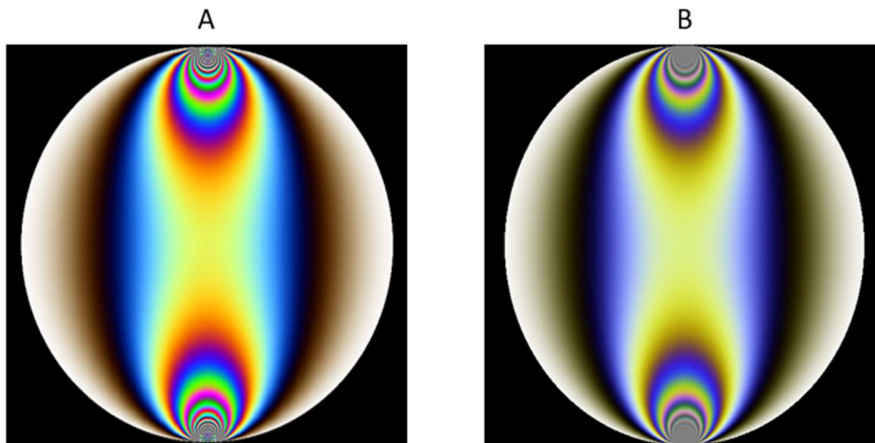
Adicional a representar el estado mecánico de cada uno de los puntos de las muestras analizadas, el campo de esfuerzos contiene información necesaria para la reconstrucción de una imagen de fotoelasticidad sintética. Para esto se utiliza la Ecuación 4, la ley de esfuerzo óptico para encontrar el valor de la diferencia de fase  $\Delta\delta$  asociada a la diferencia de esfuerzos principales de cada uno de los puntos del modelo y a una longitud de onda específica  $\lambda$ .

El valor de intensidad sintético para una imagen de fotoelasticidad  $I$  no solo depende del valor de la diferencia de fase para cada punto, sino también de los valores de la fuente de iluminación  $I_a$  y del fondo  $I_b$ , como se muestra en la Ecuación 14, la cual es una simplificación de las ecuaciones presentadas en la Tabla 2, ya que no se consideran los ángulos de rotación entre los polarizadores y los retardadores.

$$I = I_b + \left( \frac{I_a}{2} * 1 + \cos(\Delta\delta) \right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Adicionalmente, fue necesario implementar una corrección de color a las imágenes reconstruidas por medio de una matriz Adobe RGB aproximando los cambios generados por el sensor de adquisición y la fuente de iluminación [66], [67]. La Figura 2-8 presenta dos imágenes sintéticas de fotoelasticidad para un disco bajo compresión diametral con y sin corrección de color. Estas imágenes fueron reconstruidas a partir de los patrones de franjas asociados a los canales de color rojo, verde y azul, simulando la composición de una imagen RGB.

**Figura 2-8:** Imágenes de fotoelasticidad sintéticas. **(A)** Sin corrección de color. **(B)** Con corrección de color. Autoría propia.



### 2.2.2 Metodología para la adquisición de imágenes de fotoelasticidad

La adquisición de las imágenes es el proceso mediante el cual se discretiza el fenómeno que se quiere registrar, en este caso, el comportamiento de una muestra birrefringente mientras se le aplica una carga mecánica o térmica. Estas cargas, dependiendo de su intensidad generan un patrón de franjas observable y analizable por medio de fotoelasticidad.

### ▪ Preparación y selección de muestras

El material seleccionado fue el polimetilmetacrilato, de ahora en adelante PMMA. Este polímero es fabricado principalmente bajo procesos de prototipado rápido, moldeo por inyección y troquelado en caliente. El PMMA es utilizado en la fabricación de elementos ópticos como lentes, microscopios, y fibras. En cuanto a su comportamiento térmico, el PMMA pasa a un estado vítreo entre el rango de 60 y 70 ° C. Cuando se encuentra entre 70 y 120 ° C tiene un comportamiento viscoelástico y por encima de 120 ° C entra en un estado de caucho. Por encima de 350 ° C comienza un proceso de despolimerización [68]–[70]. La Tabla 3, a continuación, presenta un listado de las propiedades del PMMA.

**Tabla 3:** Propiedades del polimetilmetacrilato. Adaptado de [69].

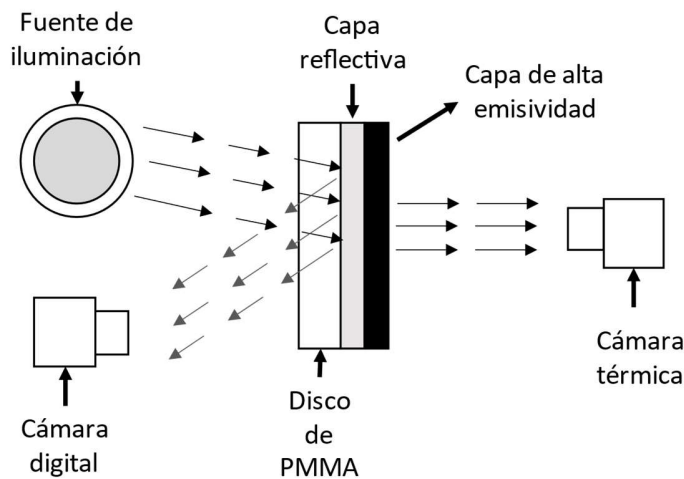
<b>Propiedades PMMA</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad</b>
<b>Densidad</b>	1.40	g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorción de agua</b>	0.3	%
<b>Punto de fusión</b>	220-240	°C
<b>Índice de refracción</b>	1.49	
<b>% de elongación</b>	5	%
<b>Conductividad térmica</b>	0.12 – 0.17	(k(W/mK))
<b>Relación de Poisson</b>	0.370	
<b>Resistencia última a tensión</b>	72	Mpa
<b>Módulo de tensión</b>	3.10	Gpa
<b>Resistencia última a compresión</b>	124	Mpa
<b>Módulo de compresión</b>	283	Gpa
<b>Resistencia última cortante</b>	35	Mpa
<b>Módulo cortante</b>	1.7	Gpa

La geometría seleccionada para las muestras experimentales fue un disco plano con diferentes radios y espesores, esta geometría también es conocida como disco brasileño “*Brazilian disk*”. La cual ha sido utilizada en la investigación sobre la distribución de esfuerzos, especialmente por medio de la fotoelasticidad. Por lo tanto, su patrón de franjas como respuesta a una estimulación mecánica es conocido y sirve como punto de referencia al comparar su campo de esfuerzos con uno que presente anomalías, como las generadas por la presencia de esfuerzos residuales[71]–[73]. Adicionalmente, se realizó la evaluación sobre otras geometrías como anillos y placas con orificios.

Por otro lado, en la literatura se ha reportado el uso de pintura negra mate en la parte posterior de una muestra para obtener el perfil de distribución de temperatura, lo cual permite relacionar la distribución de temperaturas con la de esfuerzos [54], [74].

Para las muestras sometidas a una estimulación térmica se utilizó un montaje en reflexión, como se observa en la Figura 2-9. Para ellos se aplicaron dos capas de pintura en una de las caras de la muestra. La primera, es una capa reflectiva con el fin de reflejar la luz incidente sobre el cuerpo birrefringente y la segunda es una capa de negro mate con emisividad cercana a uno. Esta última facilita la observación por medio de la cámara térmica.

**Figura 2-9:** Recubrimientos empleados en muestras de PMMA para montaje en reflexión. Adaptado de [38].



#### ▪ Caracterización de fuentes de iluminación

Durante los experimentos se utilizaron dos tipos de fuentes de iluminación, dependiendo del montaje realizado. En primer lugar, para experimentos de transmisión se utilizó una lámpara led de 18 W, referencia RW7225 marca Osblack. Y para montajes en reflexión, en los cuales la fuente de iluminación se encuentra en el mismo lado que la cámara, se empleó una lámpara fluorescente de marca HoveeLuty referencia FI25W.

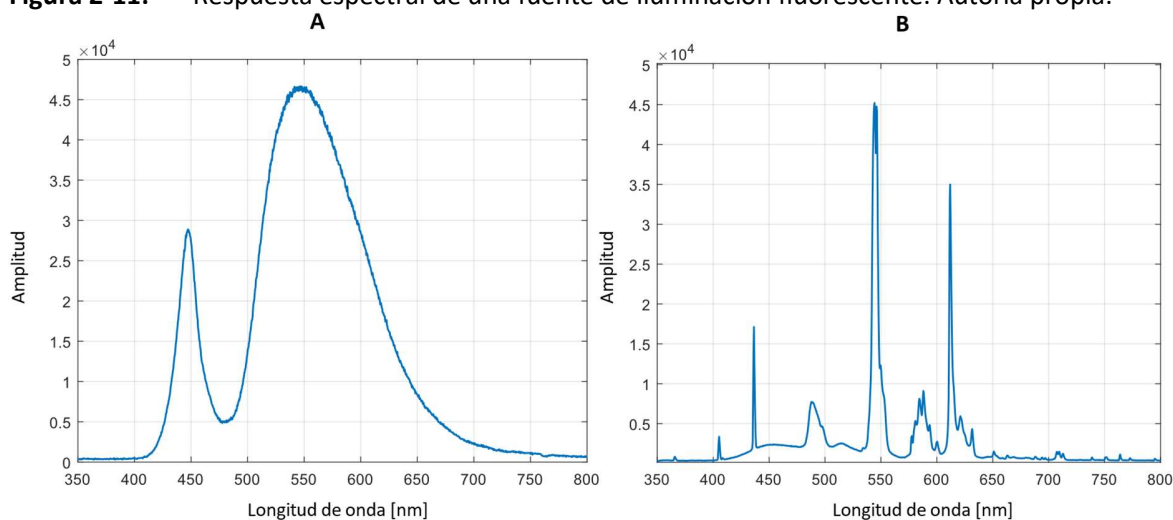
Por medio de un espectrómetro de marca Thermo y referencia ND-1000 se logró establecer la respuesta espectral que emiten los dos tipos de fuente de iluminación. La Figura 2-10 muestra el proceso de medición para la lámpara fluorescente.

**Figura 2-10:** Medida de la respuesta electromagnética en lámpara fluorescente. Autoría propia.



La Figura 2-11 (A) presenta la respuesta electromagnética de la fuente de iluminación LED. La cual tiene una distribución tipo campana entre las longitudes de onda de 450 – 660 nm. Mientras la Figura 2-11 (B) muestra la respuesta electromagnética obtenida para la fuente de iluminación fluorescente, esta lámpara tiene respuestas puntuales a las longitudes de onda de 440, 540 y 620. Ambas fuentes encuentran su respuesta máxima en la frecuencia de 540 nm.

**Figura 2-11:** Respuesta espectral de una fuente de iluminación fluorescente. Autoría propia.

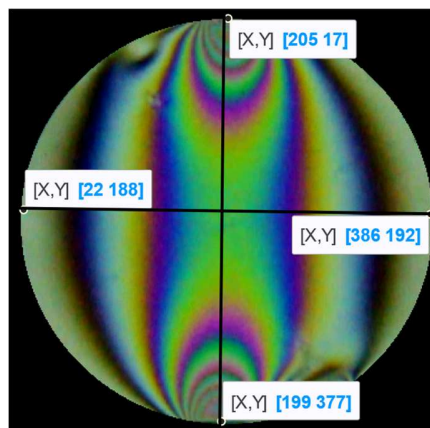


### ▪ Discretización del fenómeno experimental

Por medio de la adquisición de videos de fotoelasticidad se logró discretizar el fenómeno de aplicación de carga o temperatura sobre muestras de PMMA. De esta forma se logró registrar la evolución en los patrones de franja debido a la aplicación de un estímulo externo. La cámara utilizada para el registro es una 'Canon', referencia 'Rebel T5i' configurada a una velocidad de adquisición de 30 fotogramas por segundo, ISO 100 y exposímetro -2.

La Figura 2-12 muestra un fotograma de un disco bajo compresión diametral visto por medio de fotoelasticidad, este disco tiene un radio de **25 mm** y un área de **1963,5 mm<sup>2</sup>** y fue discretizado con un radio promedio de **181** pixeles y un área promedio de **102.922 pixel<sup>2</sup>**. Es decir, a cada **mm<sup>2</sup>** del disco le corresponden **52,4** pixeles. Por lo tanto, cada pixel abarca un estimado de **20 μm<sup>2</sup>** de la superficie del disco.

**Figura 2-12:** Fotograma de un disco bajo compresión discretizado en pixeles. Autoría propia.



En la literatura se encuentran diferentes técnicas para resolver los esfuerzos presentes en un disco bajo compresión diametral, algunas de ellas utilizan métodos de discretización como FEM "*Finite element method*", DEM "*Discrete element method*" o una mezcla de ambos FDEM "*Finite discrete element method*". La Tabla 4 presenta siete referencias en las cuales se evalúan los esfuerzos en un disco por medio de un método que discretiza el fenómeno. Entre los métodos se encuentran los elementos finitos, los elementos discretos finitos y la fotoelasticidad. Para todos ellos se presenta una relación entre la cantidad de elementos discretos por unidad de área, siendo la fotoelasticidad la de mayor resolución, con un número de elementos por unidad de área tres veces superior a la segunda técnica con mayor resolución.



**Tabla 4:** Relación de elementos discretizados y el área de un disco en compresión por diferentes métodos.

Referencia	Radio [mm]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Método	Número de elementos	$\frac{\# \text{ elementos}}{U. \text{ de área}}$
[75]	50	7.853,2	FEM (Abaqus)	3.000	0,4
[76]	25	1.963,5	FEM (Ansys)	2.860	1,4
[77]	25	1.963,5	FDEM	16.889	8,6
[78]	40	5.026,5	FDEM	52.308	10,4
[79]	20	1.256,6	FEM (Ansys)	17.504	13,9
[80]	40	5.026,5	FEM (Ansys)	77.405	15,4
Discretización usada en el presente trabajo	25	1.963,5	Fotoelasticidad	102.922	52,4

#### ▪ Evaluación de la representación visual en imágenes de fotoelasticidad

Para el desarrollo de este trabajo la representación visual de las imágenes de fotoelasticidad se evaluó en términos de los niveles de ruido, resolución, contraste y borrosidad. Estos factores afectan directamente la calidad de los patrones de franja y por consiguiente la capacidad de recuperar información almacenada [81]–[84]. Por lo tanto, imágenes de pobre representación visual pueden llevar a una estimación errónea de los campos de esfuerzos o incluso a la imposibilidad de recuperar el campo de esfuerzos.

La visualización en las imágenes de fotoelasticidad se puede definir en términos de la capacidad de identificar los patrones de franjas a partir de las imágenes obtenidas [85], [86]. La Tabla 5 lista los principales parámetros que afectan la visualización de las imágenes de fotoelasticidad.

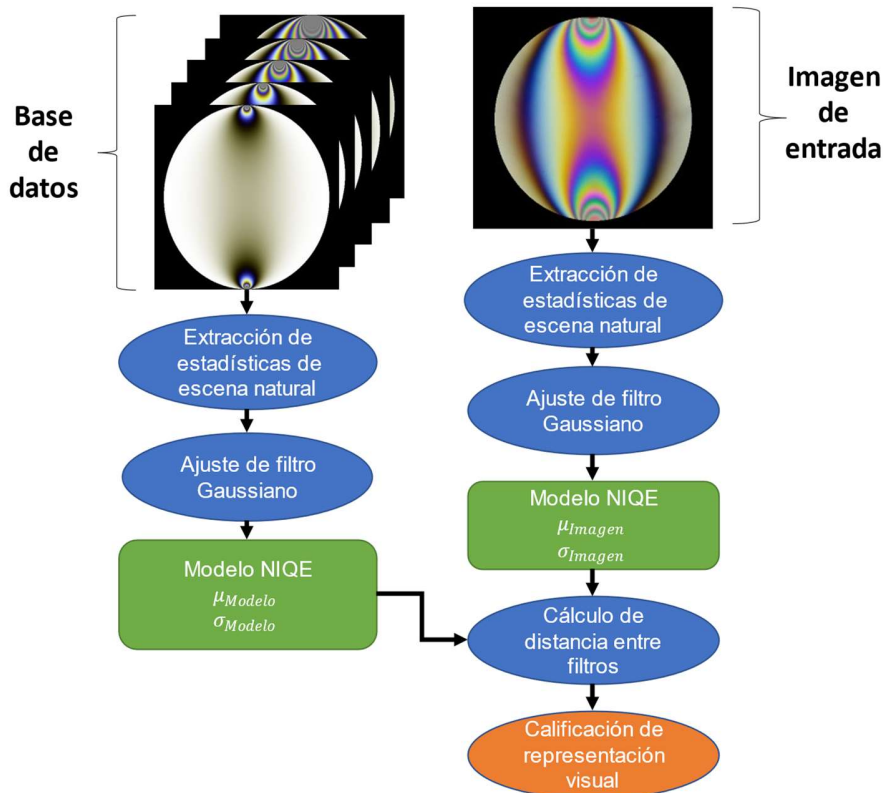
**Tabla 5:** Parámetros que afectan la visualización de las imágenes de fotoelasticidad.

PARÁMETRO	EFEECTO
<b>Resolución</b>	Imágenes de mayor tamaño al poseer un número mayor de píxeles permiten recuperar más información, por otro lado, la modulación en las zonas de contacto es mayor en imágenes de menor tamaño.
<b>Ruido</b>	Imágenes con ruido electrónico o del ambiente generan una pérdida de información en puntos aleatorios de la imagen que afectan los algoritmos de desenvolvimiento de fase.
<b>Contraste</b>	Permite distinguir valores de píxeles diferentes en regiones específicas, como las de altas concentraciones de franjas.
<b>Borrosidad</b>	Desenfoca los bordes de los patrones de franjas en el mapa isocromático.

En este trabajo empleó la métrica de calidad NIQE “*Naturalness image quality evaluator*”, la cual asigna un valor calificativo en base a la percepción de su visualización en comparación a una base de datos. Valores más cercanos a cero denotan una mejor visualización [87], [88]. La base de datos de referencia para la evaluación de las imágenes de fotoelasticidad se creó a partir de 720 imágenes computacionales de una secuencia de aplicación de carga. Cada imagen representa el patrón de franjas de fotoelasticidad de un disco bajo compresión diametral con una carga creciente entre 0 y 4000 Newtons [89].

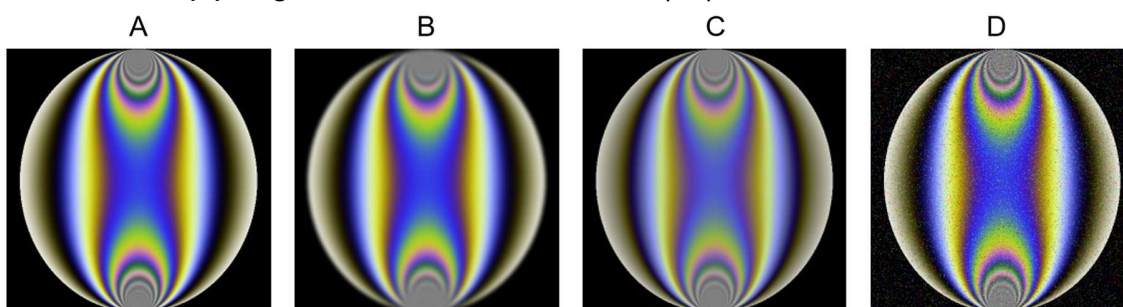
La Figura 2-13 presenta el proceso empleado por la métrica NIQE para evaluar la representación visual de las imágenes de fotoelasticidad. La función NIQE divide la imagen de entrada en bloques de dimensión 96 x 96 píxeles, este tamaño es el utilizado por defecto en el software <sup>®</sup>Matlab. Posteriormente, calcula características estadísticas como la media Gaussiana multivariante y la desviación estándar, representativas de la escena natural. Para luego compararlas con los valores estadísticos extraídos de la base de datos.

**Figura 2-13:** Cálculo de calificación de calidad por métrica NIQE para imagen experimental de fotoelasticidad. Tomando como referencia una base de datos construida a partir de 720 imágenes sintéticas de fotoelasticidad.



La Figura 2-14 presenta imágenes sintéticas de fotoelasticidad con o sin defectos de visualización, para el caso de un disco bajo compresión diametral. Estas imágenes fueron evaluadas con la métrica NIQE y su resultado se presenta en la Tabla 6. Como resultado, se encontró que la métrica NIQE se ve afectada por la presencia de estos defectos. Siendo el ruido gaussiano el que más efecto tiene sobre la visualización de las imágenes.

**Figura 2-14:** Imágenes sintéticas de fotoelasticidad para un disco bajo compresión diametral. (A) Imagen sin defectos. (B) Imagen con borrosidad. (C) Imagen con bajo contraste. (D) Imagen con ruido Gaussiano. Autoría propia.

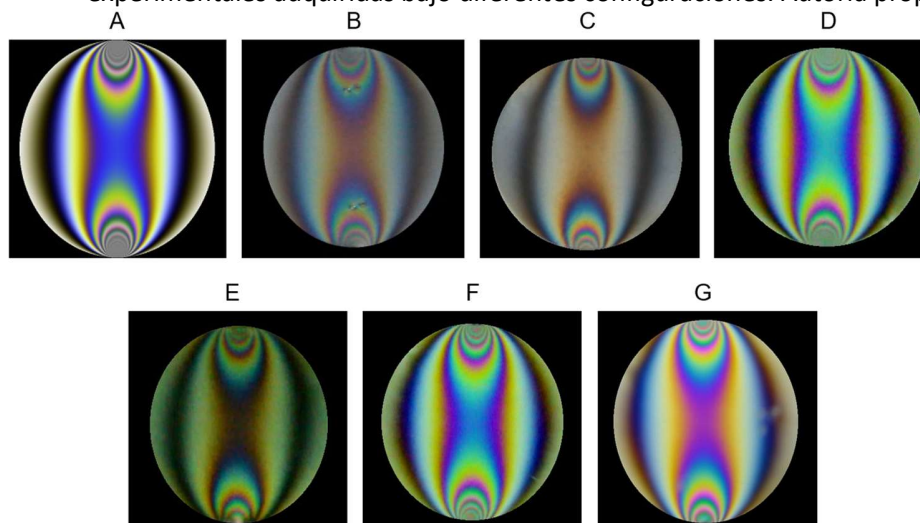


**Tabla 6:** Evaluación de la visualización de las imágenes de la Figura 2-14.

Imagen	A	B	C	D
Desempeño NIQE	1,30	2,57	3,27	17,5

De igual forma se realizó la evaluación de la visualización en diferentes imágenes adquiridas de forma experimental, las cuales se presentan en la Figura 2-15. La imagen (A) sirve como referencia mientras las imágenes (B) – (G) fueron adquiridas variando configuraciones de iluminación, tamaño de imagen, ISO entre otras. Siendo la imagen G la que cuenta con mejor visualización.

**Figura 2-15:** Imágenes de fotoelasticidad para un disco bajo compresión. (A) Sintética. (B) – (G) experimentales adquiridas bajo diferentes configuraciones. Autoría propia.



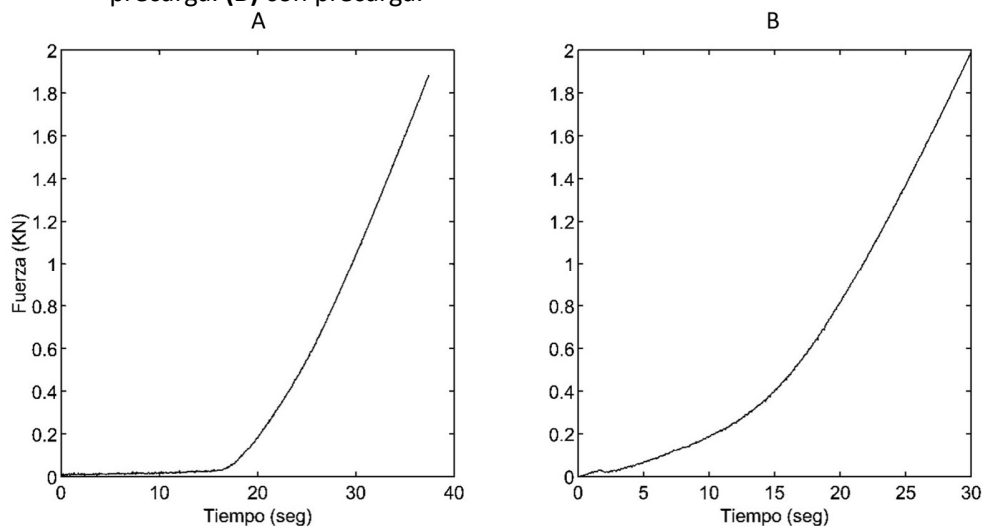
**Tabla 7:** Evaluación de visualización de imágenes presentadas en la Figura 2-15.

Imagen	A	B	C	D	E	F	G
Desempeño NIQE	1,3	3,05	3,09	2,8	3,48	3,25	2,35

### 2.2.3 Corrimiento de fase por carga térmica y mecánica

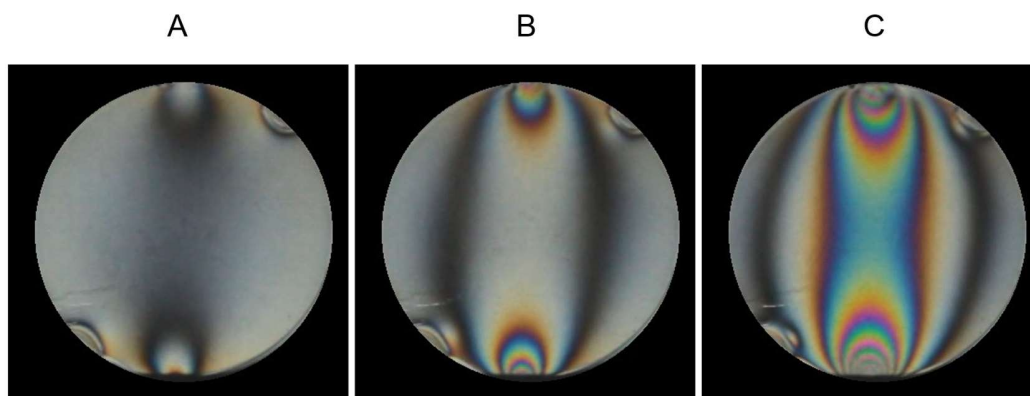
Los patrones de franjas de fotoelasticidad para las muestras experimentales fueron generados por medio de la estimulación mecánica, la cual se produjo en una máquina de ensayos universales de referencia 'SHIMADZU AUTOGRAPGH AGX – 50 KN'. En general, se aplicó una rampa de carga entre 100 – 2500 Newtons. Los 100 Newtons iniciales se les conoce como precarga y se aplican con el fin de ahorrar el tiempo que utiliza la máquina en la calibración antes de comenzar un ensayo. La Figura 2-16 muestra las curvas de cargas para dos discos, sin y con precarga. Para el segundo caso se evidenció un ahorro de 10 segundos, lo que se traduce en una recuperación de información más eficiente, ya que las imágenes capturadas durante esa franja de tiempo no aportan información relevante para la recuperación del campo de esfuerzos.

**Figura 2-16:** Curvas de carga para dos discos de PMMA bajo compresión diametral. **(A)** sin precarga. **(B)** con precarga.



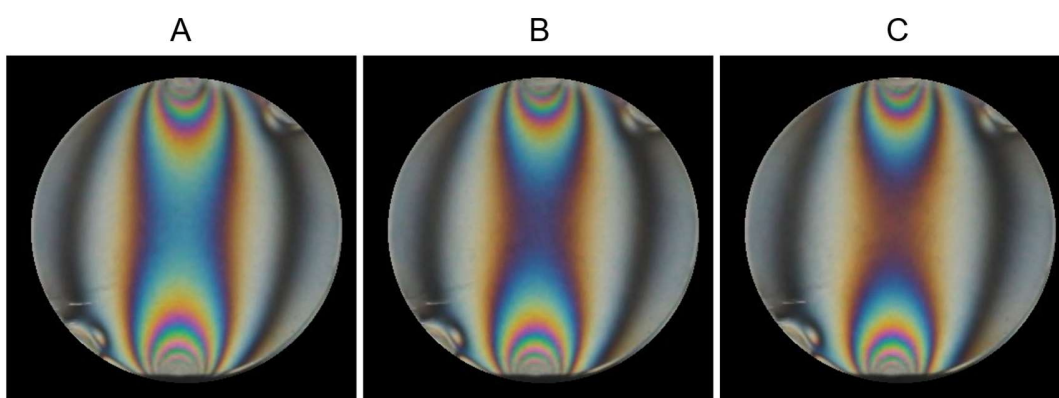
La aplicación de una carga mecánica ascendente sobre una muestra birrefringente genera un aumento proporcional en la densidad de franjas de fotoelasticidad, como se ve en Figura 2-17. La cual presenta un disco de PMMA sometido a compresión visto por medio de un montaje de fotoelasticidad en reflexión. Las cargas presentes en la Figura 2-17 son de **(A)** 150, **(B)** 714 y **(C)** 2000 Newtons respectivamente.

**Figura 2-17:** Aumento en la densidad de franjas sobre una muestra con ER en compresión, debido al aumento de carga mecánica. **(A)** 150 Newtons. **(B)** 714 Newtons. **(C)** 2000 Newtons. Imágenes adquiridas desde un montaje de fotoelasticidad en reflexión.



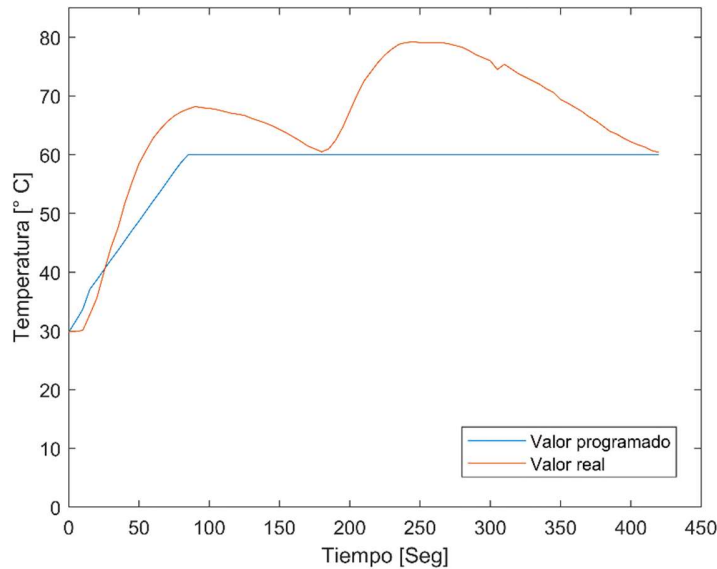
Por otro lado, en el caso donde existe una carga mecánica constante y se estimula la muestra térmicamente, la densidad de franjas disminuye a medida que la temperatura aumenta. A este fenómeno se le conoce como relajación de tensiones por difusión y se refiere a la reducción de carga en función del tiempo. En la Figura 2-18 **(A)** - **(C)** se representan los patrones de franjas correspondientes a las temperaturas de 24, 40 y 53 grados Celsius [57], [58], [90].

**Figura 2-18:** Disminución de la densidad de franjas por aumento de carga térmica, sobre muestra precargada con 2000 Newton. **(A)** 27 °C. **(B)** 40 °C. **(C)** 53 °C.



La Figura 2-19 muestra los comportamientos real y teórico para el controlador de temperatura de marca 'RKC' de referencia 'Rex - 100'. Como el comportamiento real no es completamente ascendente, en los valles se presenta un efecto resorte en la densidad de franjas. Este fenómeno fue tenido en cuenta para seleccionar el rango de los fotogramas a utilizar para el desenvolvimiento de los campos de esfuerzo, conservando la continuidad de los corrimientos de franjas térmicos.

**Figura 2-19:** Comportamientos real y teórico para controlador de temperatura.

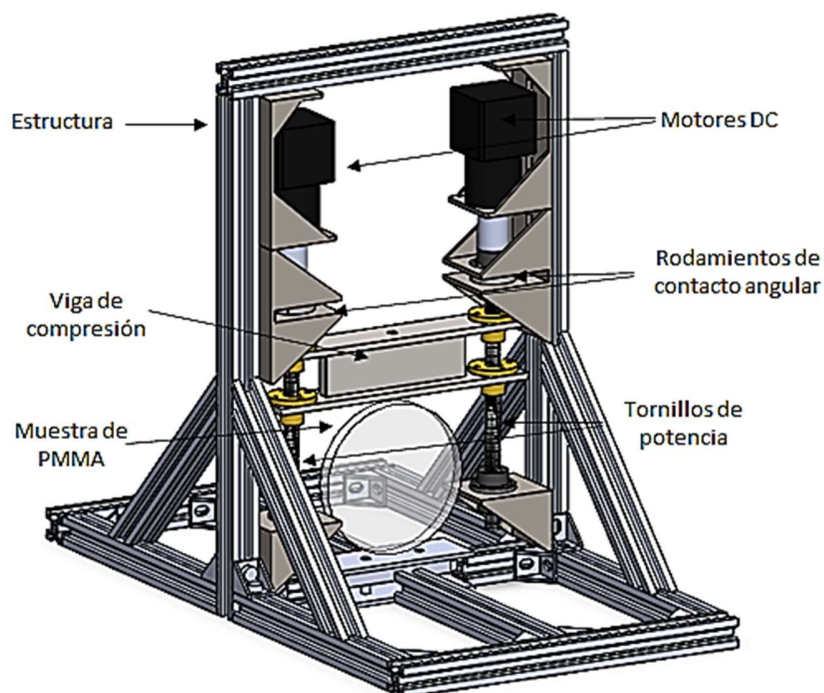


## 2.2.4 Diseño y construcción de banco de pruebas para ensayos de fotoelasticidad

El diseño y construcción de un banco de pruebas atendió la necesidad de reducir la dependencia de la disponibilidad de laboratorios con máquinas de ensayos universales. Permitiendo la realización de experimentos de fotoelasticidad de forma rápida, con control en la aplicación de carga y temperatura. Se debe tener en cuenta que la dependencia de los laboratorios no puede ser eliminada puesto que los ambientes bajo norma y de condiciones controladas son necesarios para obtener resultados estándares y reproducibles.

En el anexo A se presenta el reporte de las etapas de diseño y construcción, enfatizando los sistemas funcionales compuestos por: estructura, sistema de control, componentes ópticos y las fuentes de carga, térmica e iluminación. También se listan los componentes de cada uno de los sistemas y su función dentro del prototipo. Con el banco de pruebas se buscó garantizar los requisitos mínimos para la realización de los experimentos de fotoelasticidad, donde se generaron patrones de franjas y posteriormente su corrimiento por medio de cargas mecánicas y térmicas. La Figura 2-20 presenta el diseño computacional desarrollado para el banco de pruebas, señalando algunos de sus componentes principales.

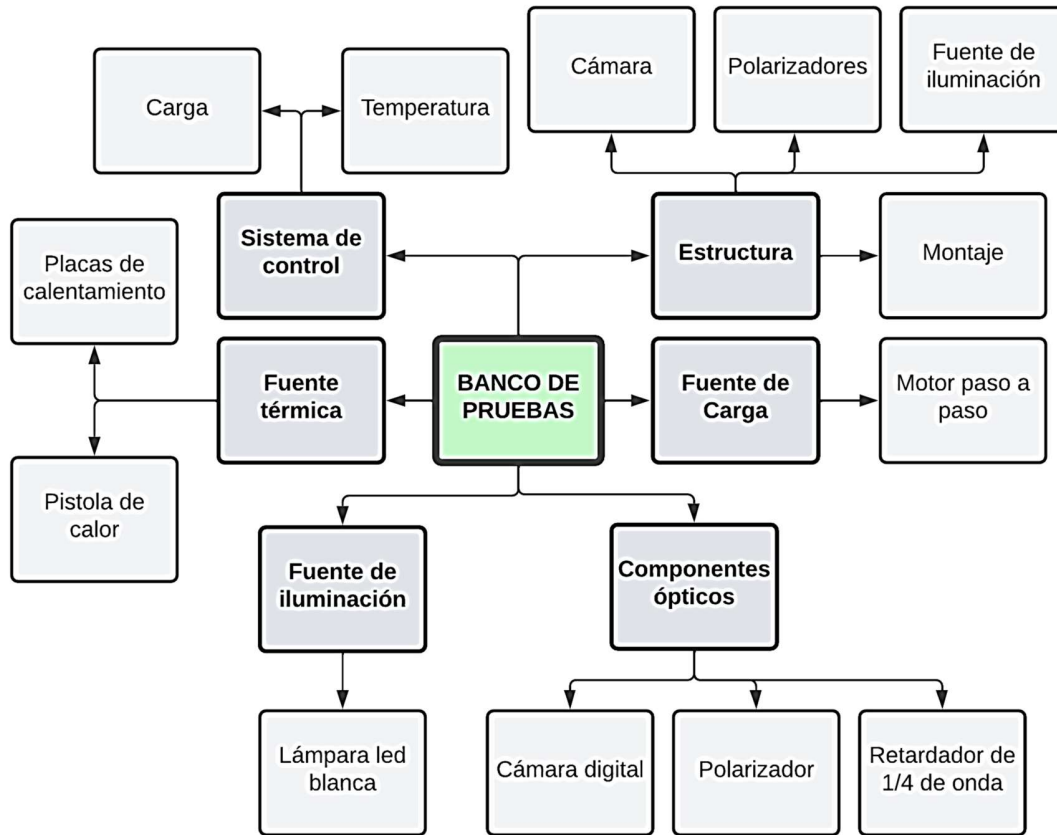
**Figura 2-20:** Modelo computacional para banco de pruebas.



Los sistemas funcionales están compuestos por una serie de elementos que en conjunto buscan resolver las necesidades de diseño en el prototipo. La Figura 2-21 muestra los seis conjuntos principales, el sistema de control, la fuente térmica, la estructura, la fuente de carga, la fuente de iluminación y los componentes ópticos. Adicionalmente, se presentan los elementos más relevantes de cada uno de los sistemas.

Luego de adquirir los elementos comerciales, se realizaron los planos de fabricación y ensamble para los soportes de ambos motores, rodillos y tornillos de potencia. Al tener todas las piezas completas se comenzó el proceso de ensamble, como se ve en la Figura 2-22. Inicialmente se unió la estructura y se reforzó con platinas de aluminio, para luego comenzar a posicionar los soportes donde finalmente se ensamblaron los sistemas funcionales.

**Figura 2-21:** Esquema de sistemas funcionales y elementos principales para banco de pruebas de fotoelasticidad. Autoría propia.



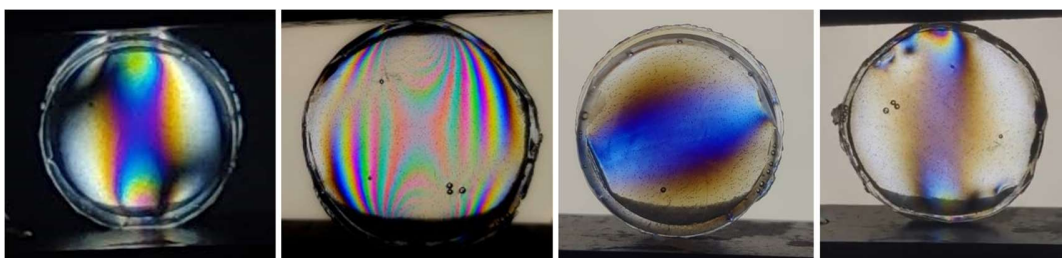
**Figura 2-22:** Proceso de ensamble y prueba del banco de pruebas. Autoría propia.



La Figura 2-23 presenta algunas de las adquisiciones de fotoelasticidad obtenidas en el prototipo, las cuales son discos bajo compresión diametral con o sin presencia de ER.



**Figura 2-23:** Adquisiciones logradas en el prototipo de aplicación de esfuerzos y ER.



## 2.3 Discusión

En este capítulo se establecen las bases teóricas para la experimentación por medio de fotoelasticidad, desde el concepto de esfuerzo hasta el de polarización. Se resaltan los principales elementos de un montaje experimental y como a partir del uso de luz polarizada se pueden obtener patrones de franjas. Adicionalmente se presentó el respaldo matemático y conceptual implementado para recuperar la diferencia de esfuerzos principales presentes en las muestras, por medio de las intensidades de pixeles.

Se presentó la metodología para la adquisición de los campos de esfuerzos en muestras sometidas a cambios dinámicos de aplicación de carga o temperatura. Y se estableció la forma de estimulación sobre la muestra para obtener el corrimiento de franjas adecuado que permitiera el desenvolvimiento de los patrones de franjas. Adicionalmente se presentaron los algoritmos implementados para la recuperación del campo de esfuerzos. Los cuales son *CHPST* y *TTST* para los casos de estimulación por carga y temperatura respectivamente.

A partir de las imágenes presentadas en la Figura 2-23 se logró establecer una serie de propuestas de mejora en el funcionamiento del prototipo.

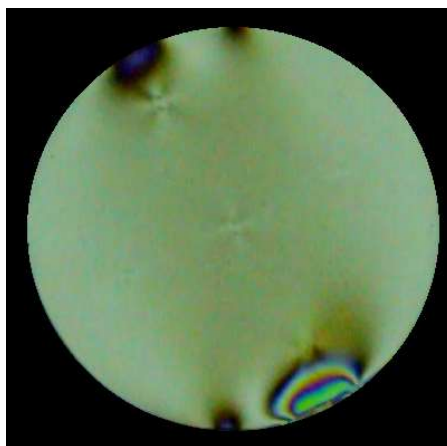
- Reemplazar el sensor de carga tipo viga en voladizo por uno tipo membrana. Este cambio permitiría garantizar la precisión y la replicabilidad de los experimentos. Ya que se desvincularía la posición de la muestra como un factor que afecte la medición.
- Implementar un sistema de posicionamiento vertical para evitar las sombras visibles en las zonas de aplicación de carga.
- Implementar un sistema de polarización circular que permita reducir la presencia de las franjas isoclínicas.

### 3. ESFUERZOS RESIDUALES

Durante este capítulo se presentan los conceptos alrededor de los esfuerzos residuales y la propuesta para el estudio del comportamiento de estos en muestras de PMMA, también conocido como acrílico. Principalmente se utilizó la geometría de un disco para el estudio, aproximando un estado plano de esfuerzos. También se utilizaron otras geometrías como anillos con diferente diámetro interno y placas con concentradores.

Algunos de los ER presentes en las muestras fueron generados de manera intensional por medio de deformaciones plásticas en frío o combinando la aplicación de cargas mecánicas y térmicas. También se observaron los ER producto de procesos de manufactura como: corte laser, corte con sierra, taladrado, torneado y otros. La Figura 3-1 muestra un fotograma de una secuencia de fotoelasticidad para un disco con dos ER en diagonal ubicados en los bordes superior e inferior.

**Figura 3-1:** Esfuerzos residuales en un disco de PMMA, visto en fotoelasticidad. Autoría propia.

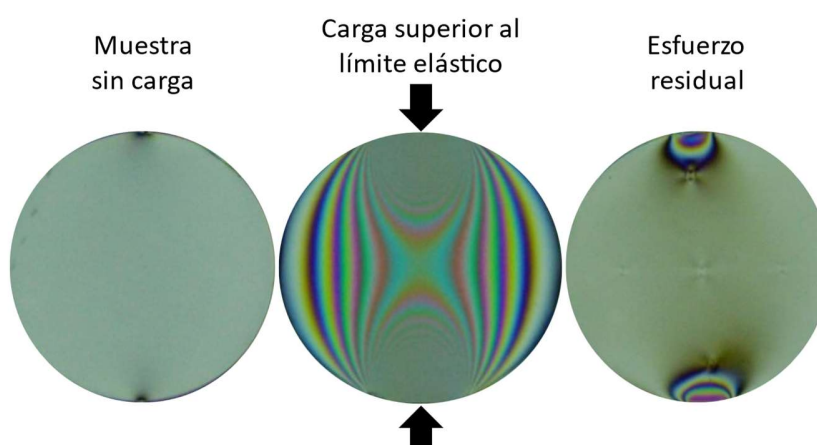


## 3.1 Estado del arte

### 3.1.1 Concepto de los esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales son esfuerzos remanentes que se encuentran en el interior de un material luego de retirada la fuente del esfuerzo original. Los ER son producto de la aplicación de cargas estáticas o dinámicas que sobrepasan el límite elástico en una o más zonas de la geometría, generando deformaciones locales al interior del cuerpo, como se ven en la Figura 3-2. En su mayoría, la presencia de este tipo de esfuerzos se debe a procesos de manufactura empleados en la transformación de un material. Son ejemplos la inyección de polímeros, la deformación de metales, la fundición, el corte o troquelado, soldadura, entre otros [5], [91]–[93].

**Figura 3-2:** Generación de esfuerzo residual en una muestra circular por efecto de una carga de compresión. Autoría propia.



Existen tres mecanismos principales en la creación de esfuerzos residuales. El primero es la deformación plástica no uniforme, presente en procesos de manufactura que modifican la geometría del material. El rolado, la forja y el doblado son algunos ejemplos. El segundo mecanismo es la modificación de la superficie, muy común en acabados superficiales como el maquinado, grabado o rectificado de piezas. Y el último mecanismo es el cambio de fase o densidad, el cual ocurre por la presencia de amplios gradientes de temperatura como los producidos en soldaduras o fundiciones [94].

Varios autores dividen los tipos de esfuerzos residuales en tres categorías, según su tamaño. La primera la componen los ER de mayor tamaño, aquellos que están balanceados en el volumen de un cuerpo deformable, usualmente están en el rango milimétrico y se conocen como macro

esfuerzos residuales. Seguidamente están los ER que se encuentran en equilibrio intergranular y se ubican en un rango de micrómetros. Finalmente, están los ER de menor tamaño, son aquellos que se alojan en un solo grano de la estructura y están en el nivel atómico [3], [95].

Cuando un material con ER es sometido a una carga externa, el nuevo campo de esfuerzos es alterado por la presencia del ER, ya que este último puede ser aditivo o sustractivo. Es decir, puede aumentar o disminuir el valor del nuevo campo de esfuerzos. Por lo tanto, su efecto puede ser benéfico o perjudicial. Por ejemplo, las tensiones residuales compresivas ayudan a prevenir la corrosión, mejoran la resistencia superficial y la resistencia al agrietamiento [95], [96]. Por otro lado, ER de tracción suelen ser perjudiciales, en [95] los autores reportan reducciones del 30 % en la resistencia a la fatiga en placas de níquel que poseían este tipo de tensiones [97].

La magnitud y la ubicación de los esfuerzos residuales en un material son determinadas por la deformación original a la que es sometido el elemento. La deformación también puede influir sobre el efecto en las propiedades mecánicas, dado que pueden estar presente en la macro o microestructura del material, afectando la resistencia a la fatiga, a la corrosión, el esfuerzo máximo, entre otros. Por otro lado, su presencia logra alterar el campo de esfuerzos haciendo que los residuales funcionen como amortiguadores o intensificadores, lo cual aumentaría o disminuiría el efecto de propagación de grietas en casos de fatiga [3], [98].

La Tabla 8 muestra una serie de procesos de manufactura y los esfuerzos residuales típicos producto de estos. La búsqueda, detección y cuantificación de ER tiene un alto impacto en diferentes procesos de manufactura, ya que permite llevar a cabo procedimientos de inspección, control de calidad, estado del producto y desarrollo de tecnología. Por medio de la identificación de las zonas más afectadas en la transformación del material, permitiendo tomar acciones preventivas con el fin de mejorar el estado final del producto. Este tipo de pruebas son aplicadas usualmente sobre probetas normalizadas, antes y después de los procesos, dada la dificultad que representa realizar pruebas en elementos que se encuentren en funcionamiento [24].

**Tabla 8:** Listado de procesos de manufactura que generan esfuerzos residuales. Adaptado de [3].

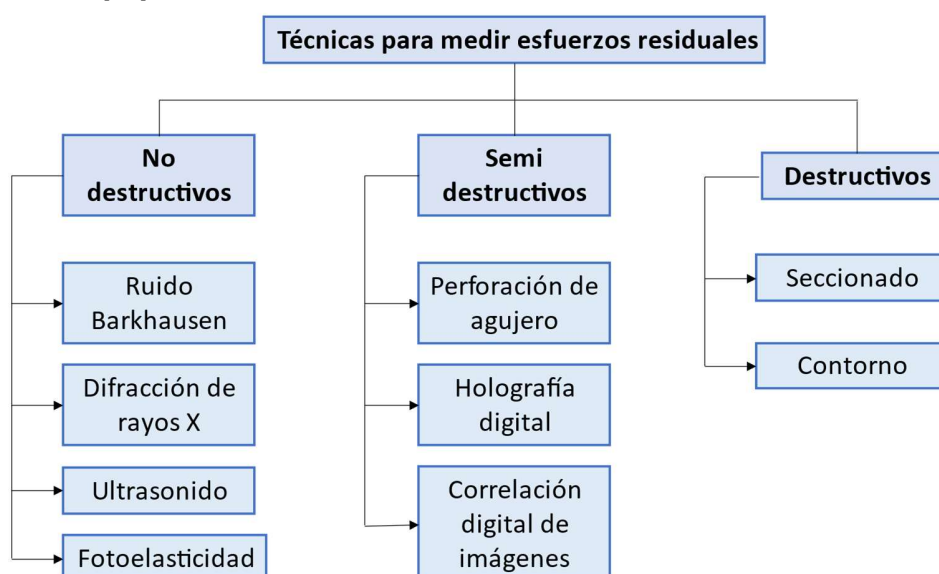
Tipo de esfuerzo residual	Proceso
Esfuerzos residuales mecánicos	Torneado
	Fresado
	Perforado
Esfuerzos residuales de unión	Soldadura
	Adhesión
Esfuerzos residuales por formado	Templado
	Endurecimiento
Esfuerzos residuales de superficie	Revestimiento
	Galvanizado

### 3.1.2 Técnicas de medición de esfuerzos residuales

Existen diferentes técnicas para medir los esfuerzos residuales en los materiales. Estas se dividen en destructivas, semi destructivas y no destructivas, como se ve en la Figura 3-3, la cual lista las principales técnicas para medir este tipo de esfuerzos.

Los métodos destructivos y semi destructivos miden la reducción del esfuerzo en el material al remover parcial o completamente el área afectada, en términos del desplazamiento generado debido a la ausencia del residual. Por otro lado, las técnicas no destructivas se centran en medir propiedades específicas que ayudan a determinar la magnitud del esfuerzo residual presente, entre ellas están, difracción por rayos X, ruido de Barkhausen, ultrasonido, entre otras [21].

**Figura 3-3:** Clasificación de métodos para la medición de esfuerzos residuales. Adaptado de [21].



### ▪ **Medición de ER en materiales compuestos**

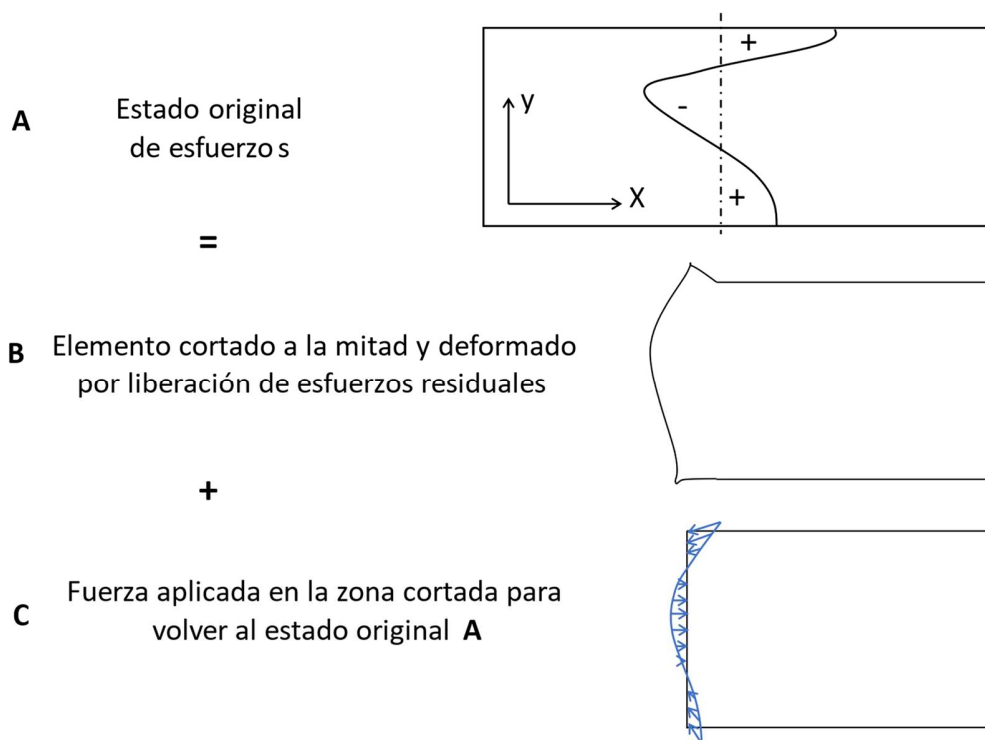
Los materiales compuestos son producto de la unión de dos o más materiales con el fin de obtener propiedades superiores a las originales. En este proceso se pueden generar ER dependiendo de la discordancia entre la matriz y los refuerzos, ocasionando la separación de los materiales. Por ejemplo, en [99] se presenta el estudio de una delaminación causada por ER alojados en la matriz del compuesto. Para este tipo de materiales existen una lista de métodos experimentales para medir esfuerzos residuales. Estos se pueden dividir en cuatro grupos [22].

- Métodos de respuesta mecánica, que monitorean la respuesta elástica del laminado al liberar el esfuerzo residual de forma mecánica. Por ejemplo, remoción de láminas, agujero profundo y métodos de corte [20].
- Métodos que consideran cambios debido a la fractura, los cuales estiman los esfuerzos residuales por el cambio en la resistencia del material bajo una falla previamente identificada [100].
- Métodos que consideran cambios en la estructura, los cuales se basan en las alteraciones generadas por los esfuerzos residuales en la estructura del material. La mayoría son no destructivos y no tienen contacto con la muestra. Rayos-x, espectroscopía y fotoelasticidad son unos de ellos [101].
- Métodos que consideran la respuesta a los cambios de temperatura. Entre estos se encuentran la medición de curvatura y calentamiento localizado [102].

### ▪ **Modelos analíticos**

El método de contorno es uno de los modelos más utilizados en el cálculo de esfuerzos residuales. Este se basa en el principio de superposición de Bueckner's, el cual establece que el estado de esfuerzos del escenario **A** es igual a la suma de los escenarios **B** y **C**. En **A** se presenta un elemento en equilibrio mecánico con ER que serán determinados. En **B** el elemento es cortado a la mitad y deformado elásticamente por la liberación de los ER y el desplazamiento generado por la deformación es medido. En **C** el elemento es forzado a volver a su estado original **A**. La Figura 3-4 ejemplifica este principio [103]–[107].

**Figura 3-4:** Principio de superposición para calcular esfuerzos residuales a partir de la medida del contorno de la superficie cortada. Adaptado de [103].



Matemáticamente el principio de superposición se representa por la Ecuación 15.

$$\sigma^A(x, y) = \sigma^B(x, y) + \sigma^C(x, y) \quad \text{Ecuación 15}$$

Existen modelos analíticos enfocados en esfuerzos residuales. La mayoría son producto de análisis experimentales, debido a la dificultad de estimar la distribución de esfuerzos luego de deformar la pieza [23], [108], [109]. Por ejemplo, la modelación numérica de los esfuerzos residuales producto de la soldadura se hace en base a un análisis termo-elastoplástico. Sin embargo, el método es complejo y poco aplicable por fuera de niveles investigativos [110], [111].

El estudio de la distribución de los esfuerzos residuales generados por diferentes procesos de manufactura ha permitido mejorar la calidad final de los productos, evitando pérdidas en el proceso. Por ejemplo. En láminas roladas la distribución de los esfuerzos residuales es parabólica en la sección transversal, bajo compresión en los bordes y tensión en el centro. En [112] presentan un modelo matemático para estimar esta distribución en función del espesor y el ancho. De forma análoga los autores presentan otros modelos para procesos de oxicorte en láminas, rolado en caliente para diferentes perfiles, secciones soldadas y deformaciones en frío [113], [114].

### ▪ **Métodos ópticos**

Uno de los métodos ópticos utilizados en la medición de ER es la holografía digital, esta técnica consiste en la reconstrucción del campo óptico en términos de intensidad y fase. Este proceso se divide en dos etapas, conocidas como registro y construcción. En la primera se almacena la información necesaria en forma de franjas de interferencia, y en la segunda etapa, se reconstruyen las ondas originales en una placa fotosensible. Este proceso conduce a la obtención de una imagen tridimensional del objeto capaz de reproducir zonas de luz, sombras y la textura del material [115]. En la fotografía digital cada uno de los puntos o píxeles de la imagen representa la intensidad de un punto en el objeto. En la holografía esta correspondencia no es puntual, es decir, cada punto del holograma conserva información de todos los puntos del objeto [116].

En la medición de ER la holografía se utiliza como técnica complementaria de los métodos semi destructivos y destructivos. Luego de remover la zona del material donde se encontraba el ER se determina el desplazamiento por el relajamiento del material por medio del registro holográfico. Por ejemplo. En [117] los autores retiraron del material la zona con presencia de ER por medio de una ablación láser, y posteriormente calcularon los ER a diferentes profundidades de la superficie con los desplazamientos medidos holográficamente. En [118], [119] se presentan casos similares con estimulación térmica y apoyados en métodos de elementos finitos.

Otra técnica óptica utilizada para medir ER es la correlación digital de imágenes o DIC (*'Digital image correlation'*). Esta es una herramienta no interferométrica empleada para calcular discontinuidades, desplazamientos y deformaciones en las tres componentes dimensionales de superficies planas [120], [121]. El cálculo se realiza comparando las imágenes digitales de la superficie antes y después de ser deformada. En casos aplicados, permite identificar la ubicación y magnitud de grietas, así mismo, analizar su crecimiento y por medio de un análisis inverso estimar las propiedades elásticas y plásticas del material. Este método requiere únicamente el uso de imágenes en escala de grises, las cuales se pueden obtener con cámaras de bajo costo, haciendo que los equipos para realizar DIC sean de baja complejidad. Por otro lado, se puede utilizar a microescala con ayuda de microscopios de alta resolución.

De forma análoga a la técnica de holografía la correlación digital de imágenes se emplea para determinar el desplazamiento de la muestra luego de utilizar un método semi o destructivo. En [122] los autores utilizaron DIC para estimar los esfuerzos residuales a nivel microscópico que



---

estaban presentes en una placa de vidrio metálico antes de realizar una perforación. Para lograr la resolución necesaria los investigadores emplearon imágenes de un microscopio de escaneo electrónico. De igual forma se han reportado casos donde se emplea esta técnica en compuestos o incluso en recubrimientos térmicos [121], [123].

Adicional a las dos técnicas presentadas anteriormente, también existe el método birrefringente o fotoelasticidad, como se conoce comúnmente. El fundamento teórico y experimental de este método fue expuesto en el Capítulo 2, por lo que se procede a presentar algunas aplicaciones reportadas en la literatura. La primera es el estudio de los ER presentes en piezas moldeadas por inyección y el efecto en sus propiedades [124]–[126], también se reporta la evaluación de ER en ambientes de condiciones de alta humedad y temperatura [127], [128]. De igual forma se reporta el efecto de los ER en el campo de esfuerzos de piezas con geometrías complejas [129], [130].

## **3.2 Metodología**

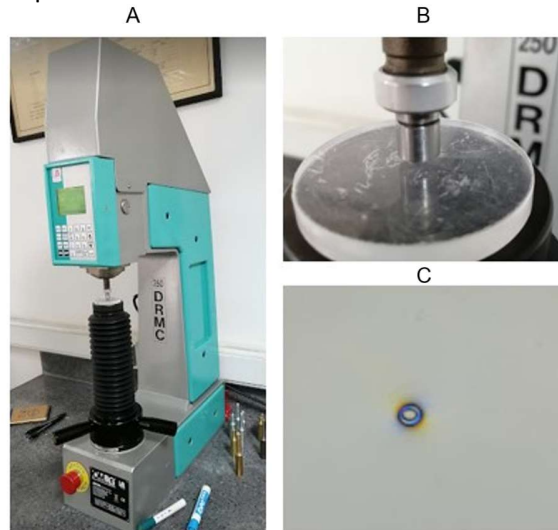
### **3.2.1 Generación experimental de esfuerzos residuales**

Los esfuerzos residuales son producto de micro deformaciones localizadas en el interior del material. Estas deformaciones son creadas generalmente por variaciones abruptas de carga o temperatura. A continuación, se presentan dos procedimientos empleados durante este estudio para generar esfuerzos residuales sobre las muestras de PMMA.

#### **▪ Esfuerzos residuales por indentación**

En un primer caso se utilizó una máquina semiautomática para medir durezas Rockwell y Brinell de referencia 'OMAG DRMC 250'. Esta máquina realiza una indentación en la superficie y mide la fuerza necesaria para provocar una deformación superficial en el material. La indentación se generó por medio de un indentador de tipo 'Bola' con diámetro de 1/16 de pulgada y se obtuvo una dureza promedio de 37 Rockwell b. Por la naturaleza del proceso se generaron esfuerzos residuales alrededor de la deformación, los cuales son observables por medio de fotoelasticidad, cómo se presenta en la Figura 3-5.

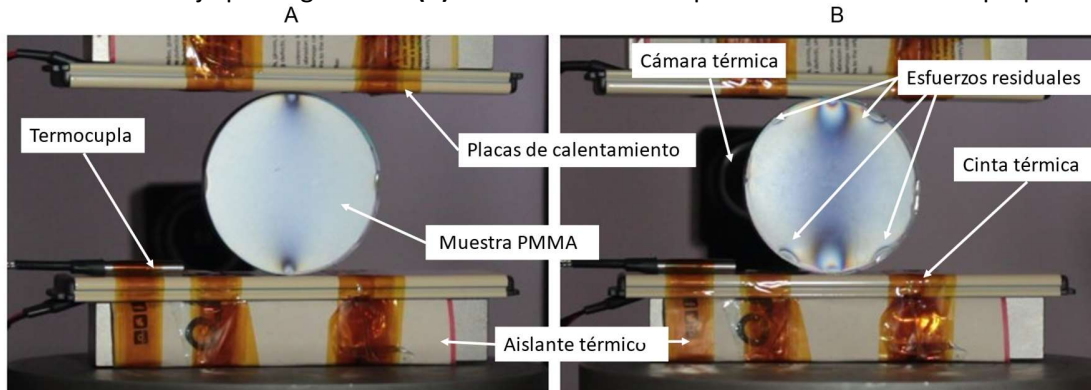
**Figura 3-5:** (A) Proceso de medición de dureza en una muestra de PMMA. (B) Indentación por medio de un indentador tipo bola. (C) Esfuerzos residual resultante del proceso. Autoría propia.



#### ▪ Esfuerzos residuales de borde

Otro tipo de ER generado sobre las muestras de PMMA obedece a la combinación entre cargas mecánicas y térmicas sobre el borde de la muestra. La fuerza aplicada estuvo entre 100 – 2500 Newtons con una tasa de deformación de 2 milímetros por minuto. Luego se estimuló térmicamente la muestra, por medio de dos placas con resistencias eléctricas. La carga térmica fue manipulada por medio de un controlador de temperatura de marca 'RKC' de referencia 'Rex – 100'. Se estableció un valor límite de 50 ° C, el cual es alcanzado luego de 50 segundos. La Figura 3-6 muestra este proceso y su resultado. De igual forma se realizaron ER por el mismo método, sin someter la muestra a una estimulación térmica, es decir, una deformación en frío.

**Figura 3-6:** Esfuerzos residuales generados para calentamiento y carga mecánica. (A) Muestra bajo precarga sin ER. (B) Muestra rotada con presencia de ER. Autoría propia.



### 3.2.2 Simulación de esfuerzos residuales

El modelo de esfuerzos residuales desarrollado computacionalmente se realizó con base al método de superposición de esfuerzos, como lo presentó T. Kihara en las referencias [23], [131]. El campo de esfuerzos resultante para una muestra con ER cuando es sometida a una carga mecánica dependerá de la dirección y magnitud de los campos de esfuerzos que interactúen.

Siendo  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_2$  y  $\psi'$  los esfuerzos principales y su dirección, para el campo de esfuerzos de una muestra con esfuerzos residuales. Al aplicar una carga externa  $\mathbf{P}$  sobre una muestra sin ER se genera otro campo de esfuerzos, el cual está definido por  $\sigma_1^0$ ,  $\sigma_2^0$  y  $\psi^0$ . El campo de esfuerzos resultante de la interacción de los dos campos de esfuerzos está dado por los esfuerzos principales  $\sigma_1'^0$ ,  $\sigma_2'^0$  y su respectiva dirección  $\psi'^0$ . Esta relación se describe en la Ecuación 16 y la Ecuación 17.

$$\sigma'_x - \sigma'_y = (\sigma_x'^0 - \sigma_y'^0) - (\sigma_1^0 - \sigma_2^0) \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\sigma'_x - \sigma'_y = (\sigma_1'^0 - \sigma_2'^0) \cos(2\psi'^0) - (\sigma_1^0 - \sigma_2^0) \cos(2\psi^0)$$

$$\tau'_{xy} = \tau_{xy}'^0 - \tau_{xy}^0 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\tau'_{xy} = 0.5(\sigma_1'^0 - \sigma_2'^0) \sin(2\psi'^0) - 0.5(\sigma_1^0 - \sigma_2^0) \sin(2\psi^0)$$

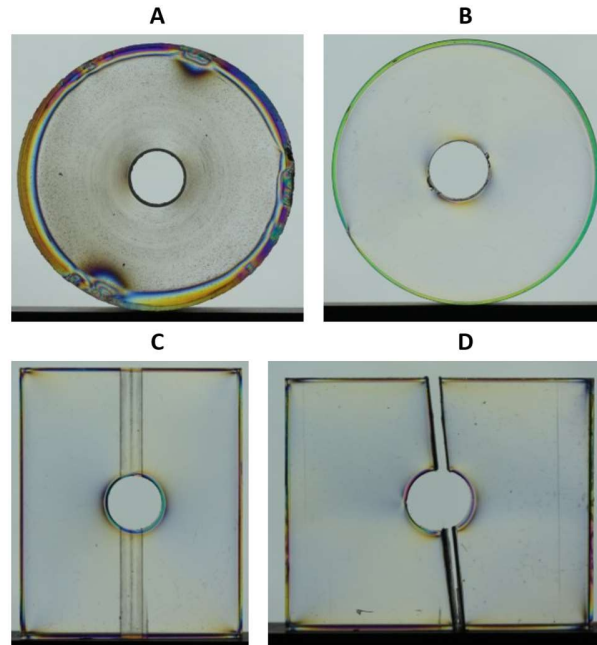
Antes de aplicar el método de superposición de esfuerzos para la construcción del modelo simulado, se deben obtener los campos de esfuerzos correspondientes a las muestras con esfuerzos residuales y con carga  $\mathbf{P}$  aplicada. Dependiendo de la dirección de los campos el resultado puede ser la suma o resta de ambos.

## 3.3 Resultados

### 3.3.1 ER producto de diferentes procesos de manufactura

La Figura 3-7 presenta cuatro imágenes de fotoelasticidad correspondientes al resultado en términos de ER de diferentes procesos de manufactura en piezas de PMMA. **(A)** muestra un cilindro luego de reducir su diámetro en un torno. Este proceso generó esfuerzos residuales en el contorno de la muestra, especialmente en los puntos de sujeción de la mordaza. En **(B)** se expone un disco al cual se le realizó una perforación con un taladro de banco. **(C)** presenta la remoción de material en una placa, dejando un pequeño patrón de franjas en el contorno de la perforación. Por último, **(D)** exhibe una placa con concentrador cortada por una sierra de banco.

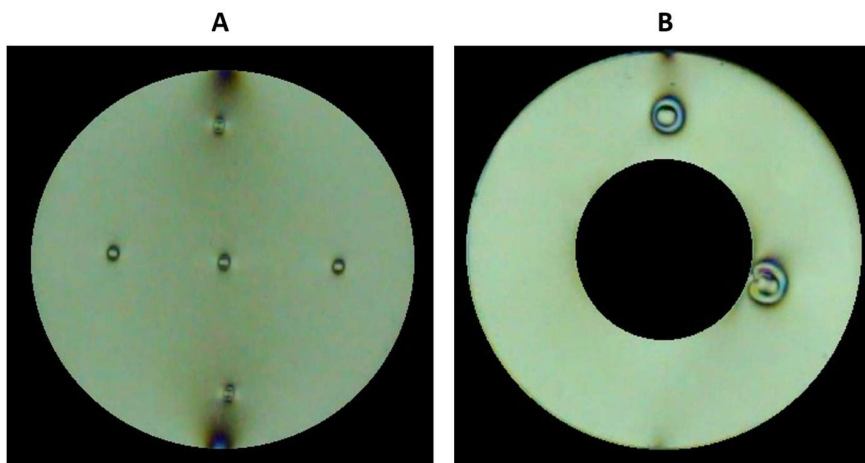
**Figura 3-7:** Esfuerzos residuales producto de diferentes procesos de manufactura vistos en fotoelasticidad. **(A)** Torneado. **(B)** Perforación con taladro. **(C)** Fresado. **(D)** Corte por sierra de banco. Autoría propia.



### 3.3.2 ER por indentación

La Figura 3-8 presenta dos fotogramas de fotoelasticidad en transmisión para **A** un disco y **B** un anillo, a los cuales se les generaron ER por medio de indentaciones. La ubicación de las indentaciones se realizó según las zonas de esfuerzos dentro de las muestras, altos, medios y bajos esfuerzos.

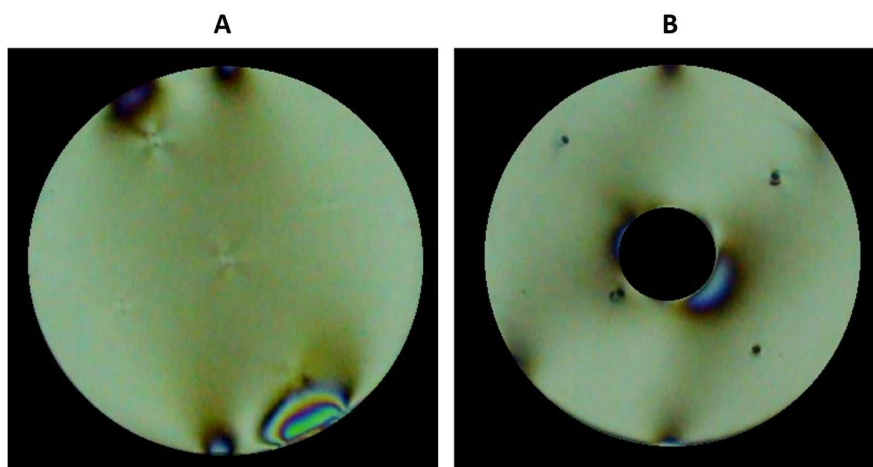
**Figura 3-8:** Esfuerzos residuales generados por indentación. **(A)** Disco. **(B)** Anillo. Autoría propia.



### 3.3.3 ER de borde

Se realizaron esfuerzos residuales de borde en muestras de PMMA de tipo disco y anillos como se muestra en la Figura 3-9. Donde la imagen **(A)** presenta una muestra tipo disco con ER de tipo borde en parte superior izquierda e inferior derecha. Y la imagen **(B)** presenta una muestra tipo anillo con ER de borde en la parte superior izquierda e inferior derecha del diámetro interno. Adicional a los ER residuales de borde las muestras presentan deformaciones por indentaciones. Todos los ER de estas muestras fueron generados mediante deformaciones en frío.

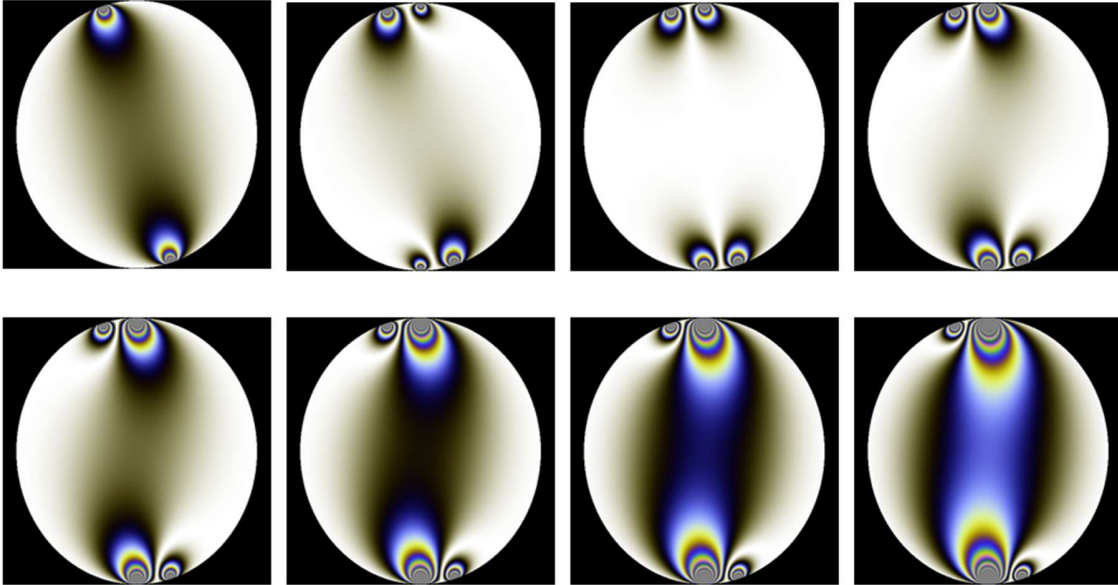
**Figura 3-9:** Proceso y resultado de la generación de ER por deformación en frío. **(A)** imagen antes de la compresión. **(B)** muestra bajo compresión rotada con ER de borde. Autoría propia.



### 3.3.4 ER simulados

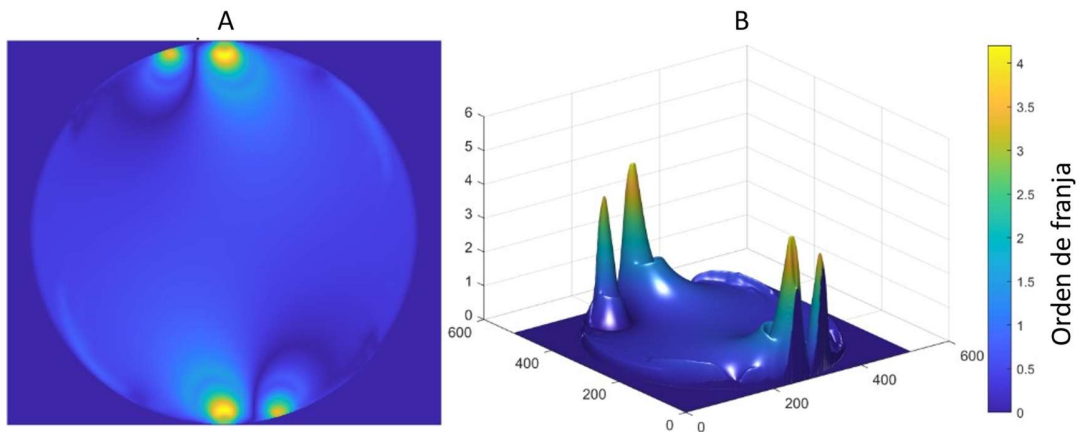
En la Figura 3-10 se presenta el caso donde la dirección de los campos de esfuerzos pertenecientes al ER y a la carga  $P$  es contraria, por lo cual, el campo resultante es la resta de ambos. El resultado se da en una secuencia computacional para un disco de PMMA de 5 centímetros de diámetro, con esfuerzos residuales de borde y bajo compresión diametral. A medida que la carga  $P$  aumenta el patrón de franjas asociado a los ER de borde disminuye. Por otro lado, entre ambos patrones de franjas se crea una zona de frontera sin patrones de franja que se desplaza en dirección del ER a medida que  $P$  aumenta entre 0 y 2500 Newtons.

**Figura 3-10:** Secuencia computacional para un disco bajo compresión diametral con esfuerzos residuales de borde. Considerando la resta entre estos. Autoría propia.



El resultado de la superficie de esfuerzos encontrada en términos de ordenes de franjas para la secuencia de la Figura 3-10 se presenta en la Figura 3-11. En **(A)** se muestra la vista superior, mientras **(B)** presenta la reconstrucción tridimensional, en la cual la ausencia del ruido de la cámara permite visualizar una figura más limpia y unos esfuerzos más definidos.

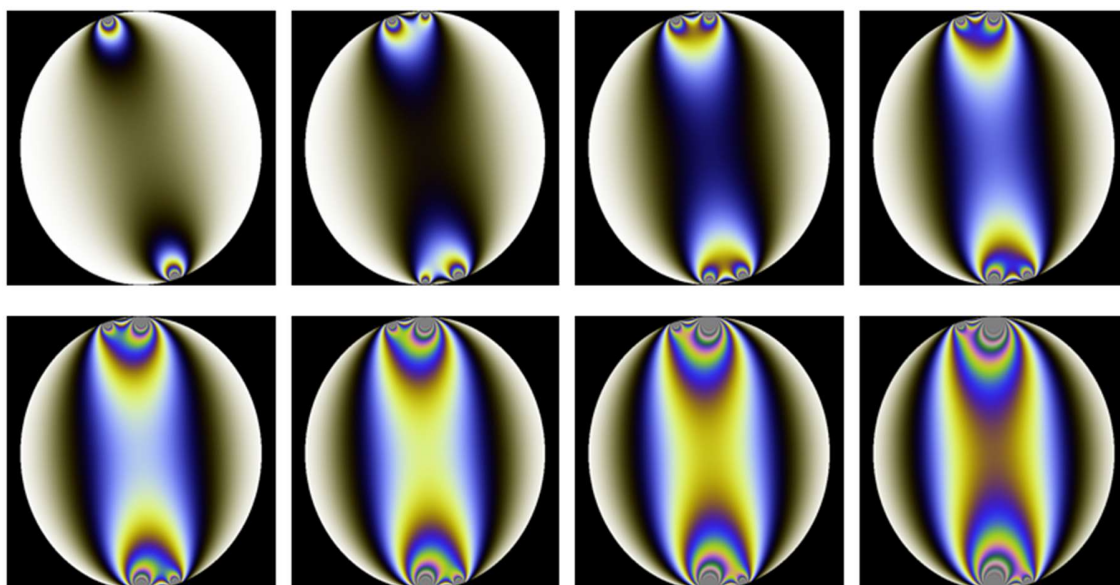
**Figura 3-11:** Reconstrucción del campo de esfuerzos de la secuencia presentada en la Figura 3-10. (A) Vista superior. (B) Reconstrucción tridimensional. Autoría propia.



Para el caso en el que la dirección de los campos de esfuerzos asociados a los ER y a la carga compresiva  $\mathbf{P}$  converge, el campo de esfuerzos resultante es la suma de ambos. La Figura 3-12 presenta una secuencia de imágenes con la interacción entre los patrones de franjas de dos ER de borde y los patrones de franja de una carga de compresión  $\mathbf{P}$  en aumento. En este caso la frontera

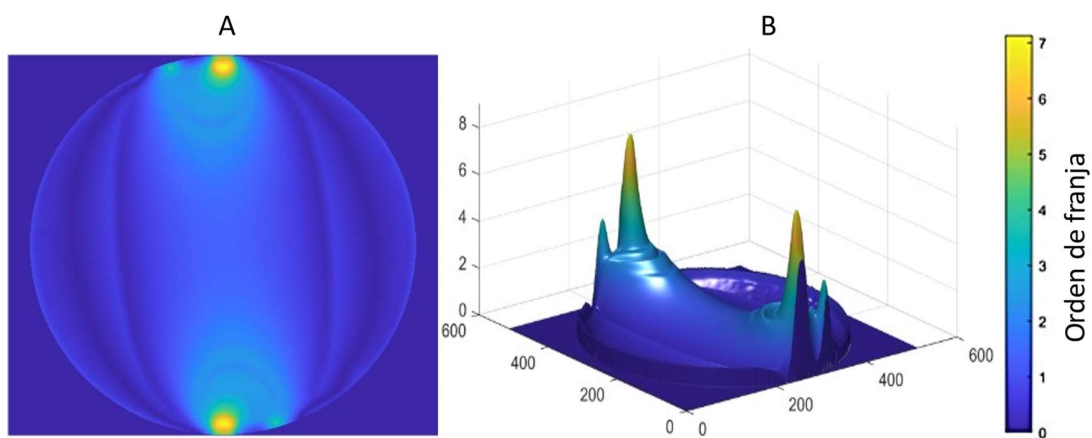
entre el ER y el punto de aplicación de carga se define por un orden de franja entre ellos, el cual aumenta a medida que incrementa el valor de  $P$ .

**Figura 3-12:** Secuencia computacional para un disco bajo compresión diametral con esfuerzos residuales de borde. Considerando la suma entre estos. Autoría propia.



El resultado de la superficie de esfuerzos encontrada en términos de ordenes de franjas para la secuencia de la Figura 3-12 se presenta en la Figura 3-13. En **(A)** se muestra la vista superior, mientras **(B)** presenta la reconstrucción tridimensional, en la cual la ausencia del ruido de la cámara permite visualizar una superficie limpia y unos esfuerzos más definidos. Para este caso el orden de franja máximo es de 7, mientras en el Figura 3-11 es de 4.

**Figura 3-13:** Reconstrucción del campo de esfuerzos de la secuencia presentada en la Figura 3-12. (A) Vista superior. (B) Reconstrucción tridimensional. Autoría propia.



### 3.4 Discusión

Durante el capítulo se presentó el resultado de los patrones de franja de fotoelasticidad asociados a los ER generados por cuatro tipos de procesos de manufactura: reducción de diámetro en un torno, perforación en un taladro de banco, remoción de material en una fresadora y corte en una sierra de banco. De los cuatro procesos, la reducción de diámetro en torno generó ER de mayor magnitud. Esto podría deberse a la reducción de la capacidad de resistencia del material por el calentamiento generado en el proceso. Adicionalmente, las mordazas recrean un empotramiento en una cara de la muestra impidiendo que se pueda recuperar la deformación en el material. Por otro lado, los otros procesos de manufactura no generaron esfuerzos residuales tan definidos, lo cual se podría asociar a la aplicación de un esfuerzo menos agresivo que el empleado en el torno y la capacidad de recuperación volumétrica durante el proceso.

Los esfuerzos residuales generados por el indentador OMAG DRMC 2 obedecen a una deformación en frío generada por una carga puntual sobre la superficie de la muestra. Este tipo de ER presenta la ventaja de poder ser generado sobre cualquier ubicación de la superficie de la muestra. Permitiendo evaluar el comportamiento del ER estando cerca o lejos de los puntos de aplicación de una carga mecánica. Por otro lado, los ER resultantes de la combinación de la aplicación de cargas mecánicas y térmicas tienen una magnitud mayor, por lo tanto su efecto sobre el campo de esfuerzos es más influyente.

El campo de esfuerzos resultante en una muestra con ER sometida a una carga mecánica dependerá de la dirección y la magnitud de los campos de esfuerzos asociados. Esfuerzos residuales aditivos pueden suponer un riesgo en estructuras o elementos operacionales, haciendo las veces de concentradores de esfuerzos y aumentando el valor real del esfuerzo presente. Por otro lado, ER negativos logran reducir el valor del esfuerzo real de la muestra, mejorando propiedades mecánicas como la resistencia a la fatiga y la resistencia superficial.



## 4. ESTRATEGIA PARA ANALIZAR IMÁGENES DE FOTOELASTICIDAD CON ESFUERZOS RESIDUALES

En este capítulo se describe el proceso metodológico propuesto para llevar a cabo el preprocesamiento y procesamiento de los videos de fotoelasticidad y termografía adquiridos experimentalmente. Para la etapa de preprocesamiento se describen las condiciones que deben tener los datos experimentales para ser analizados, adicionalmente se listan las transformaciones geométricas y submuestreos aplicados a las secuencias originales para obtener conjuntos de 720 fotogramas por cada experimento. Por otro lado, en la etapa de procesamiento se aplican algoritmos de evaluación sobre la dinámica del color en pixeles específicos o en todos los pixeles de la secuencia de imágenes. Con esto se logró identificar comportamientos característicos en las zonas donde se encuentran los esfuerzos residuales. También se describen otros algoritmos implementados como lo son, agrupamiento por medio de K-means, apilamiento temporal y trayectorias de color.

La recuperación de los campos de esfuerzos en muestra con esfuerzos residuales se logró mediante el uso de la técnica híbrida de saltos de carga (*CHLST*), para los casos donde la densidad de franjas de fotoelasticidad aumentó. Para el caso contrario se utilizó la técnica de saltos térmicos transitorios (*TTST*). Adicionalmente, se presenta la reconstrucción del campo de esfuerzos generados por esfuerzos residuales de borde y por indentación. Los primeros son generados por una aplicación mixta de cargas compresiva y térmica en el borde de una muestra. Y la segunda se produjo por una deformación en frío sobre la superficie de la muestra.

## 4.1 Marco teórico

### 4.1.1 Termografía

La termografía infrarroja es una técnica de imagen que permite visualizar la temperatura superficial de un cuerpo a partir su radiación emitida. Cuando esta radiación se mide con una cámara termográfica, el resultado es una imagen conocida como termograma. Donde cada pixel representa la temperatura superficial de los elementos medidos [132]. Para adquirir termogramas, es necesario especificar parámetros como la temperatura ambiente, distancia de captura, humedad relativa y la emisividad de la superficie. La cual es una propiedad que representa la cantidad de radiación térmica emitida por un cuerpo y varía según las propiedades de superficie, como la pintura, el color y el acabado superficial. Esta propiedad varía entre cero y uno, siendo este último el valor conocido como emisividad de cuerpo negro. El cual es un objeto teórico que emite el 100% de su energía, usualmente empleado para calibrar los montajes de termografía [133].

- **Ley de Stefan - Boltzman**

La Ecuación 18 es conocida como la ley de Stefan – Boltzman y relaciona el flujo de calor  $Q$  por radiación de un cuerpo con la diferencia de temperaturas, emisividad  $e$ , área superficial  $A$  y la constante de Stefan – Boltzman  $\sigma_{S-B}$ .

$$Q = e\sigma_{S-B}A(T_c^4 - T_a^4) \quad \text{Ecuación 18}$$

- **Ley de Planck**

La ley de Planck describe la energía térmica irradiada por un cuerpo negro que se encuentra en estado de equilibrio térmico y se presenta en la Ecuación 19. La cual está en función de la constante de Planck,  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  [Js], la velocidad de la luz  $c$ , la longitud de onda  $\lambda$ , La constante de Boltzman  $K$  y la temperatura de equilibrio en grados Kelvin  $T$ .

$$N_{\lambda,b} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(1 - e^{\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right)}\right)} \quad \text{Ecuación 19}$$

- **Ley de desplazamiento de Wien**

La ley de desplazamiento de Wien permite determinar la longitud de onda en la cual la radiancia es máxima en un objeto y está definida por la Ecuación 20.

$$\lambda_{max} = \frac{2897.8}{T} \quad \text{Ecuación 20}$$

### 4.1.2 Comportamiento dinámico del color en fotoelasticidad

Uno de los métodos más comunes para digitalizar fenómenos dinámicos por medio de fotoelasticidad es a través de videos [134]. Los cuales registran el cambio en los patrones de franjas provocado por una estimulación externa. Usualmente se convierten los videos en secuencias de fotogramas para relacionar el cambio en los patrones de franjas con los valores de la estimulación externa [56].

El cambio en la intensidad de los pixeles a lo largo del tiempo se puede ver como una señal temporal en el espacio RGB, la cual contiene la información relacionada con la variación de los esfuerzos en puntos específicos de la muestra [135], [136].

### 4.1.3 Trayectorias de color

Las trayectorias de color son reconstruidas a partir del cambio en intensidad de pixeles en un espacio **R, G, B** a lo largo de la secuencia de fotogramas. Por lo tanto, la distancia recorrida de esta trayectoria se puede estimar por medio de la sumatoria de la distancia euclidiana entre cada uno de los pixeles, como se muestra en la Ecuación 21. Donde **T** es la distancia de la trayectoria y los valores de **R, G y B** corresponden a la intensidad de color de cada canal en el pixel evaluado [56].

$$T = \sum_{i=2}^{720} \sqrt{(R_{i-1} - R_i)^2 + (G_{i-1} - G_i)^2 + (B_{i-1} - B_i)^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

### 4.1.4 K-means

El algoritmo K-means es una técnica de agrupamiento no supervisada utilizada en conjuntos de datos para crear un número predefinido de conjuntos. La principal característica de cada grupo es albergar los datos semejantes dentro del mismo conjunto. Las categorías son formadas a partir de las similitudes y diferencias entre los datos y los centroides. Estos últimos son valores principales de cada conjunto, los cuales en principio son seleccionados de forma aleatoria para luego ser refinados de forma iterativa por el algoritmo [137].

La evaluación de las similitudes y las diferencias entre los centroides y los datos se da mediante la medición de la cohesión y la separación entre estos. La primera busca los datos más cercanos a los centroides, mientras la segunda garantiza la distancia entre las diferentes categorías. Es decir, se

busca que entre los datos de una misma categoría haya una menor distancia, caso contrario respecto a un centroide y los datos de categorías diferentes [138], [139].

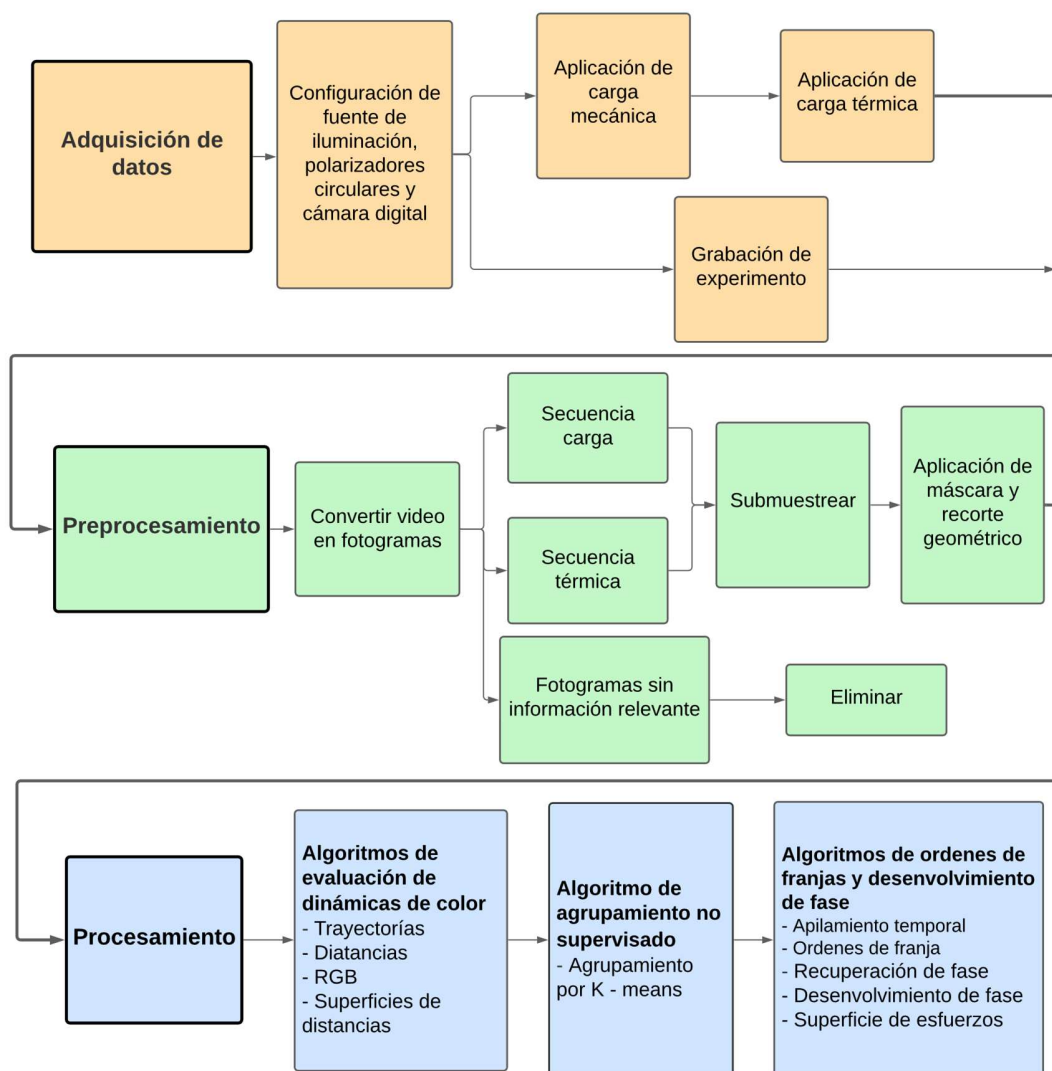
## **4.2 Metodología para el procesamiento de imágenes de fotoelasticidad**

Finalizada la etapa de adquisición presentada en la sección '2.2.2: Metodología para la adquisición de imágenes de fotoelasticidad', se obtuvieron imágenes y videos que contienen el cambio en la densidad de franjas de fotoelasticidad, debido a una variación en la estimulación mecánica o térmica. En esta etapa se implementaron algoritmos para evaluar el comportamiento de zonas de interés dentro de la muestra y otros que describen el desempeño global sobre todo el campo de esfuerzos.

La Figura 4-1 sintetiza el proceso implementado en tres secciones, adquisición, preprocesamiento y procesamiento. La etapa de adquisición se centró en establecer los parámetros necesarios para obtener videos de fotoelasticidad aprovechables, lo cual implicó definir los elementos ópticos y su configuración de uso. Adicionalmente, los valores de las cargas mecánicas y térmicas aplicados sobre las muestras birrefringentes. Luego, en la etapa de preprocesamiento se convirtieron los videos adquiridos en secuencias de fotogramas. A las cuales se le aplicaron transformaciones geométricas para eliminar información irrelevante, por ejemplo, fotogramas sin desplazamiento de franjas o parte de los fotogramas que no contuvieran la muestra.

Finalmente, sobre las secuencias con información del desplazamiento de franjas se ejecutaron una serie de algoritmos basados en el comportamiento del color, para evaluar el comportamiento de los esfuerzos residuales durante la aplicación de cargas mecánicas o térmicas. Algunos de los algoritmos implementados fueron, K-means, trayectorias de color, apilamiento temporal y RGB. Este último hace referencia a la extracción de la señal temporal de un pixel seleccionado, la cual corresponde a la variación de intensidad separada por canal de color.

**Figura 4-1:** Esquema del proceso de adquisición, preprocesamiento y procesamiento de imágenes de fotoelasticidad.



#### 4.2.1 Preprocesamiento

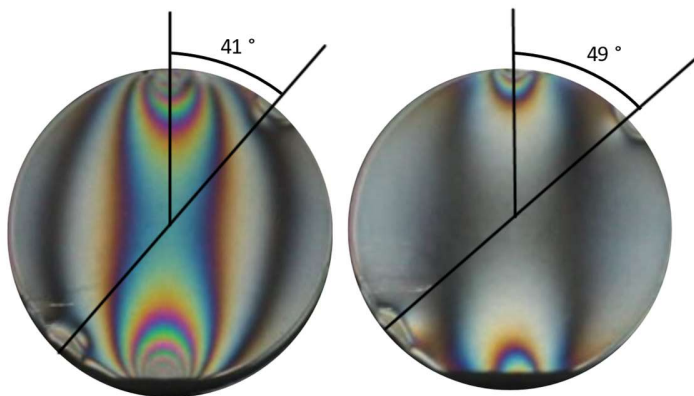
##### ▪ Revisión visual

La primera etapa del preprocesamiento consistió en realizar una inspección visual de los videos adquiridos, determinando su idoneidad para la etapa de procesamiento. En caso contrario, fueron descartados al detectar la presencia de eventos que pudiesen afectar la repetibilidad o los resultados del ensayo. Algunos de los eventos que se detectaron se listan a continuación.

- Desplazamiento de la muestra. Este evento implica una pérdida de la referencia espacial de la muestra entre fotogramas, es decir, la evaluación del comportamiento de un pixel a lo largo de la secuencia contendría información de más de un punto, razón por la cual la información obtenida no sería confiable. La Figura 4-2 muestra un ejemplo de este caso en donde la muestra se rotó  $8^\circ$ .
- Integridad de la muestra. La presencia de imperfecciones como rayones, muescas o deformaciones producen una alteración en los valores de intensidad relacionados a las franjas de fotoelasticidad.
- Desplazamiento insuficiente de franjas de fotoelasticidad. La implementación de técnicas con poca estimulación mecánica o térmica sobre la muestra produce un bajo corrimiento de franjas.

Esta inspección permite determinar las etapas del video, es decir, los momentos donde se aplica la carga mecánica inicial y luego cuando se aplica la estimulación térmica. Estableciendo un punto de referencia para la sincronización entre la secuencia de fotogramas y las curvas de carga y temperatura.

**Figura 4-2:** Rotación de  $8^\circ$  en el sentido de las manecillas del reloj en muestra de PMMA durante la aplicación de una carga térmica.



#### ▪ Separación de imágenes aprovechables

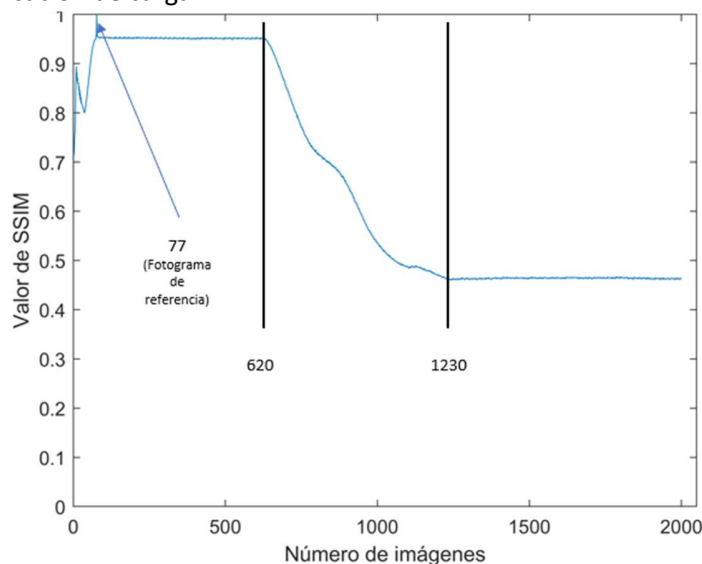
La cámara utilizada durante este trabajo es de marca 'Canon' referencia 'Rebel T5i' configurada a una velocidad de adquisición de 30 fotogramas por segundo, ISO 100 y exposímetro -2. Las imágenes aprovechables son aquellas que se encuentran en una de las etapas de aplicación de carga o temperatura sobre la muestra. Es decir, son aquellas que contienen información sobre el cambio en los patrones de franja a medida que la muestra es estimulada. Antes de poder realizar

la separación de las imágenes es necesario convertir el video original en una secuencia de fotogramas. La cantidad de estos dependerá de la duración del video y la tasa de adquisición en la cámara.

Posteriormente se calculó el índice de similitud estructural SSIM "*Structural similarity*" de todos los fotogramas de la secuencia respecto al fotograma inicial, el cual se utilizó como referencia. Los fotogramas sin cambio en el valor SSIM correspondían a momentos sin estimulación mecánica o térmica y fueron eliminados por contener información irrelevante.

La Figura 4-3 muestra el valor SSIM del fotograma de referencia, en este caso el número 77 respecto a cada una de las imágenes de una secuencia de aplicación de carga. Se seleccionó el fotograma 77 como referencia debido al comportamiento anómalo registrado en imágenes anteriores, esta conducta es asociada con el movimiento inicial de la cámara. Posteriormente se muestra un comportamiento constante en el valor de SSIM hasta el fotograma 620, en este punto la máquina de ensayos universales comienza a ejercer carga sobre la muestra ocasionando la aparición de los primeros patrones de franjas. Esta conducta continua hasta la imagen 1230, cuando la aplicación de carga termina. A partir de esta información se determinó que el intervalo de fotogramas aprovechables está entre el 620 y 1230.

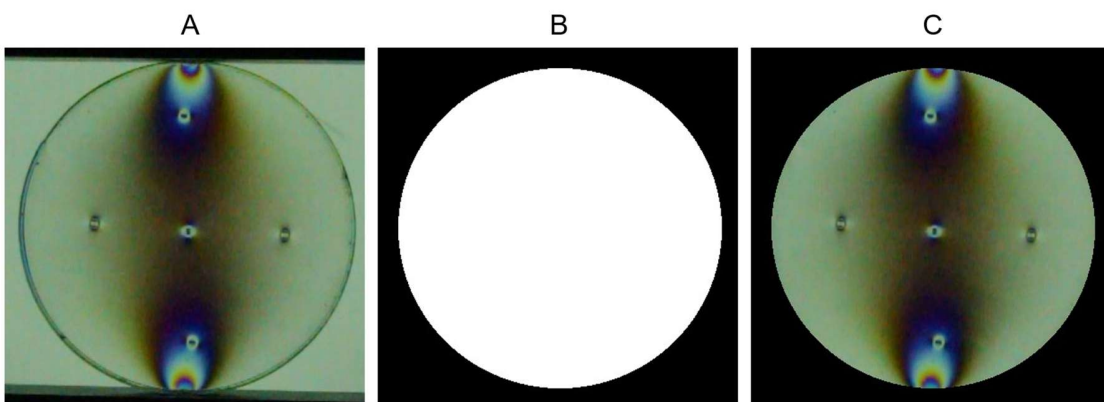
**Figura 4-3:** Valor de SSIM para el fotograma 77 respecto a los fotogramas de la secuencia de aplicación de carga.



### ▪ Aplicación de máscara

El fondo de los fotogramas contiene información innecesaria por lo cual se procedió a removerlo al aplicar una máscara. La cual se generó a partir de una plantilla creada manualmente con las dimensiones de cada muestra y se aplicó de forma automática a todos los fotogramas de la secuencia. Adicionalmente, este proceso permite eliminar los defectos de borde generados por la sombra provocada por el espesor de la muestra. La Figura 4-4 ejemplifica la extracción y aplicación de la máscara en un fotograma.

**Figura 4-4:** (A) Imagen de referencia sin máscara. (B) Máscara extraída de (A). (C) Imagen final.



### ▪ Submuestreo

La longitud de las secuencias de imágenes aprovechables adquiridas oscila entre 1000 y 4000 fotogramas. Debido a la extensa diferencia de rangos se aplicó un algoritmo para submuestrear las secuencias y estandarizarlas a un único valor total de 720 fotogramas. Este proceso favorece la aplicación de algoritmos cuya demanda computacional aumenta significativamente al procesar secuencias con mayor número de fotogramas.

La Tabla 9 muestra el tiempo de ejecución computacional para tres algoritmos de evaluación de superficie en una secuencia de aplicación de carga con 4000 fotogramas, a la cual se le realizaron tres submuestreos del 80 %, 50 % y 20 % respectivamente. Este último obtuvo cerca de un tercio del tiempo utilizado para la secuencia original en los dos primeros algoritmos. Al momento de aplicar el algoritmo de K-means el equipo donde se realizó la prueba mostraba una alerta de fuera de memoria al ejecutarlo con 2000 fotogramas o más.

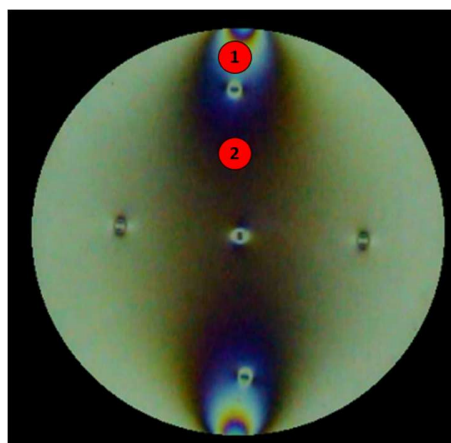


**Tabla 9:** Tiempos de ejecución (minutos) para algoritmos de evaluación de superficie bajo diferentes porcentajes de submuestreo.

% Submuestreo (# Fotogramas)	20 % (720)	50 % (2000)	80 % (3200)	100 % (4000)
Algoritmo de superficies	1,7	2,5	4,0	6,6
Algoritmo de trayectorias	3,1	4,3	5,7	11,7
Algoritmo de k means	8,2	Fuera de memoria	Fuera de memoria	Fuera de memoria

Posteriormente se evaluó la pérdida de información al realizar el submuestreo. Esto se hizo comparando las señales de intensidad de color a lo largo de las cuatro secuencias producto de los diferentes niveles de submuestreo. Se realizó una comparación del error cuadrático medio de la señal temporal extraída en los píxeles 1 y 2, resaltados en rojo en la Figura 4-5, y se registró en la Tabla 10. Allí se puede observar que la mayor variación es del 0,3 % para el canal azul del píxel 2.

**Figura 4-5:** Píxeles seleccionados para la aplicación de algoritmo de evaluación de intensidad.



**Tabla 10:** Comparación del error cuadrático medio obtenida entre las señales temporales de los puntos 1 y 2 para cada submuestreo.

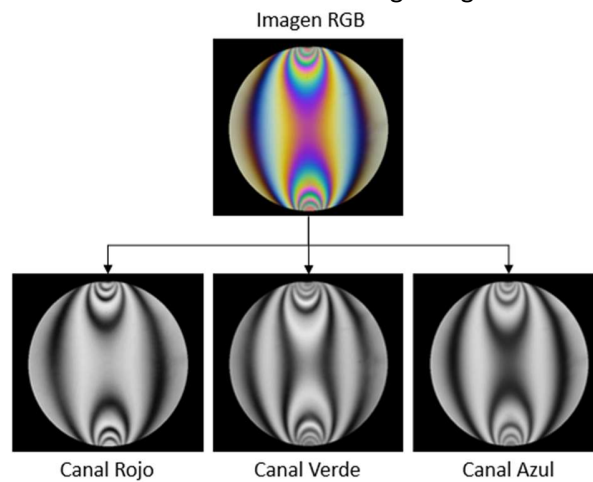
% Submuestreo		20 %	50 %	80 %	100 %	% Variación
Punto 1	R	90,6	90,37	90,57	90,55	0,06
	G	115,46	115,45	115,42	115,46	0,00
	B	100,38	100,1	100,06	100,08	0,30
Punto 2	R	82,64	82,78	82,84	82,82	0,22
	G	109,05	108,9	108,9	108,89	0,15
	B	100,91	101,05	101,13	101,12	0,21

## 4.2.2 Procesamiento

### ▪ Evaluación de dinámicas de color

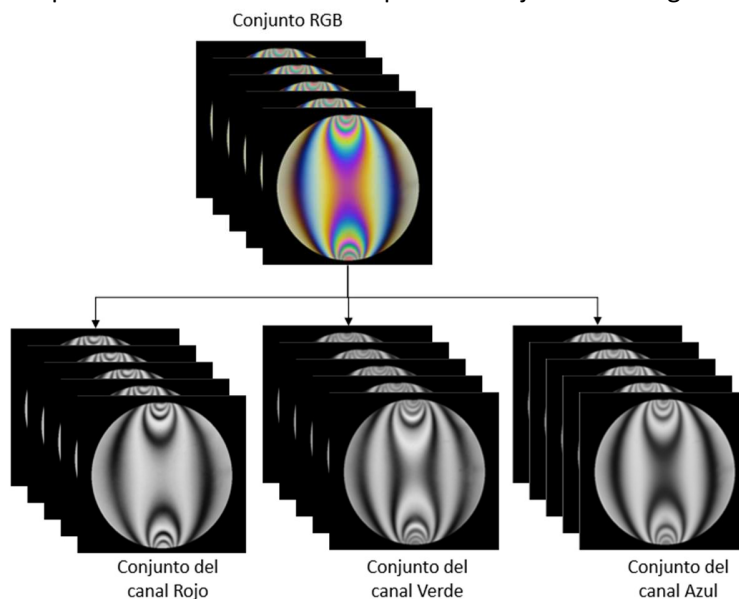
Los fotogramas obtenidos a partir de los videos de fotoelasticidad son imágenes digitales compuestas por tres canales de color: rojo, verde y azul. Los cuales corresponden al espacio de color RGB, como se representa en la Figura 4-6. Por otro lado, cada canal se puede expresar como una matriz independiente de dimensiones  $n * m$ , donde estos valores representan el alto y el ancho de la imagen, respectivamente.

**Figura 4-6:** Composición de canales RGB en una imagen digital.



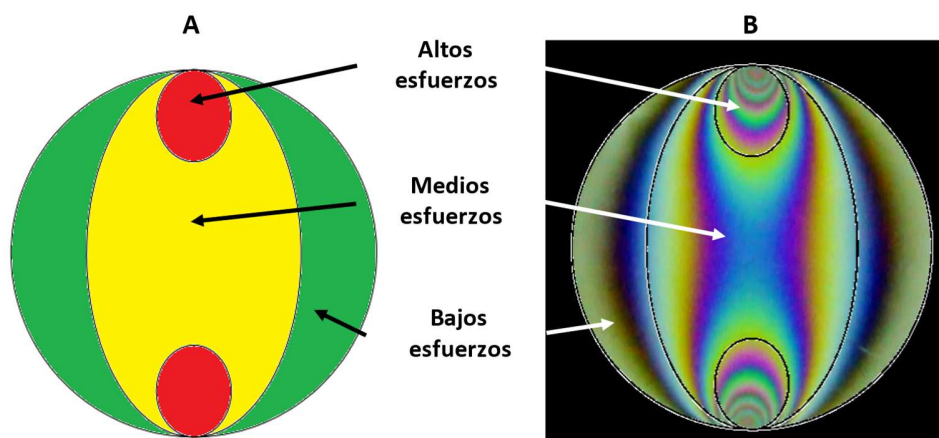
Al contar con un conjunto de 720 imágenes RGB se tiene un total de  $720 * 3$  matrices de tamaño  $n * m$ , correspondientes a cada canal de color, lo cual se representa en la Figura 4-7.

**Figura 4-7:** Composición de canales de color para un conjunto de imágenes RGB.



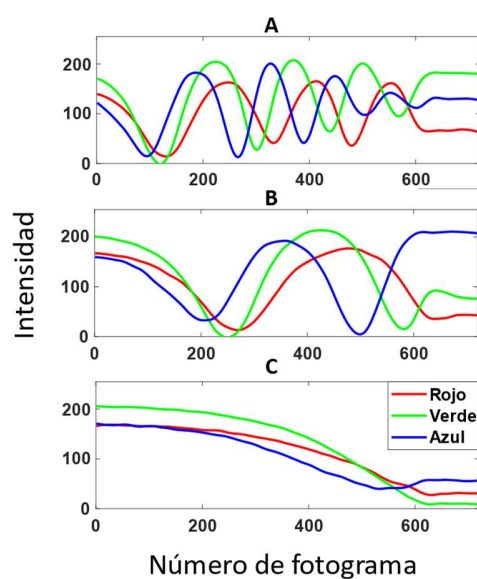
En la Figura 4-8 se etiquetaron tres zonas con diferentes categorías de esfuerzos: altos, medios y bajos. Posteriormente se evaluaron los comportamientos en la dinámica de color para cada región, estableciendo la referencia de cada zona de esfuerzos por canal de color y su trayectoria en el espacio de color RGB.

**Figura 4-8:** Ubicación de las zonas de altos, medios y bajos esfuerzos. **(A)** Imagen de referencia. **(B)** Fotograma experimental.



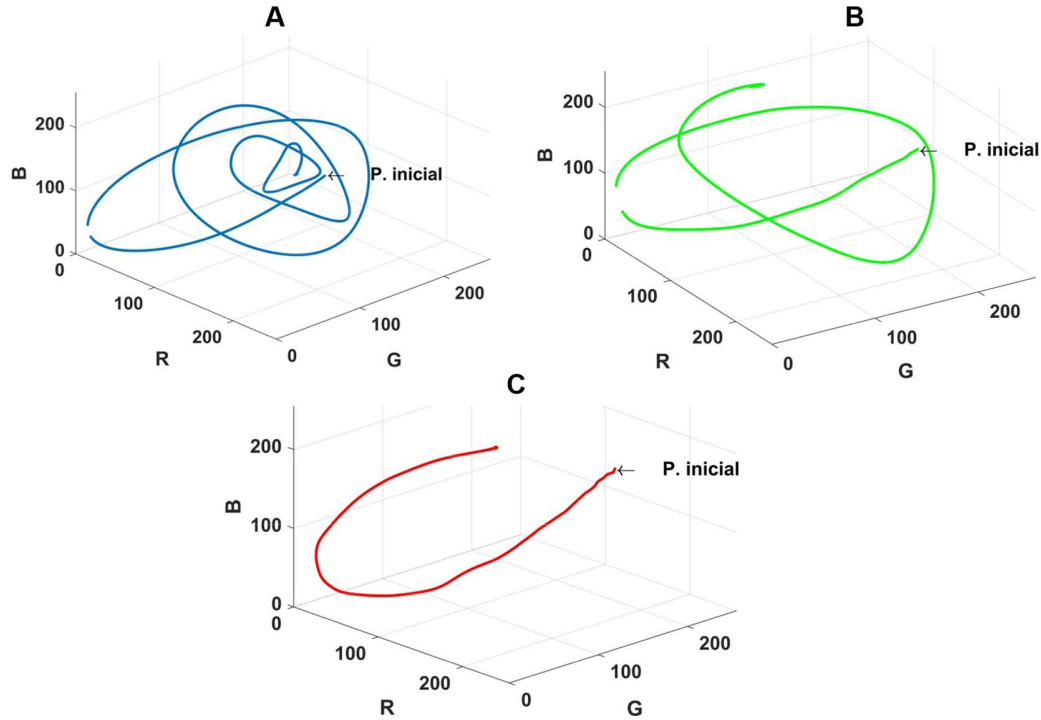
En la Figura 4-9 se presenta el comportamiento típico en términos de intensidades de canal de color para los pixeles ubicados en las zonas de altos, medios y bajos esfuerzos. Donde cada periodo en la señal representa el aumento de un orden de franja. Para este caso la carga aplicada fue de 2500 Newtons.

**Figura 4-9:** Comportamiento por canal de color para las zonas de altos **(A)**, medios **(B)** y bajos **(C)** esfuerzos.



Para construir las trayectorias de color se toman los valores de los pixeles seleccionados como una señal tridimensional, donde los canales de color RGB son los ejes principales. Y el cambio en los valores de intensidad trazan una trayectoria en el espacio de color. El Comportamiento de las zonas de referencia de altos, medios y bajos esfuerzos se presentan en la Figura 4-10.

**Figura 4-10:** Comportamiento de referencia en el espacio de color para las diferentes zonas de esfuerzos. **(A)** Altos. **(B)** Medios. **(C)** Bajos.

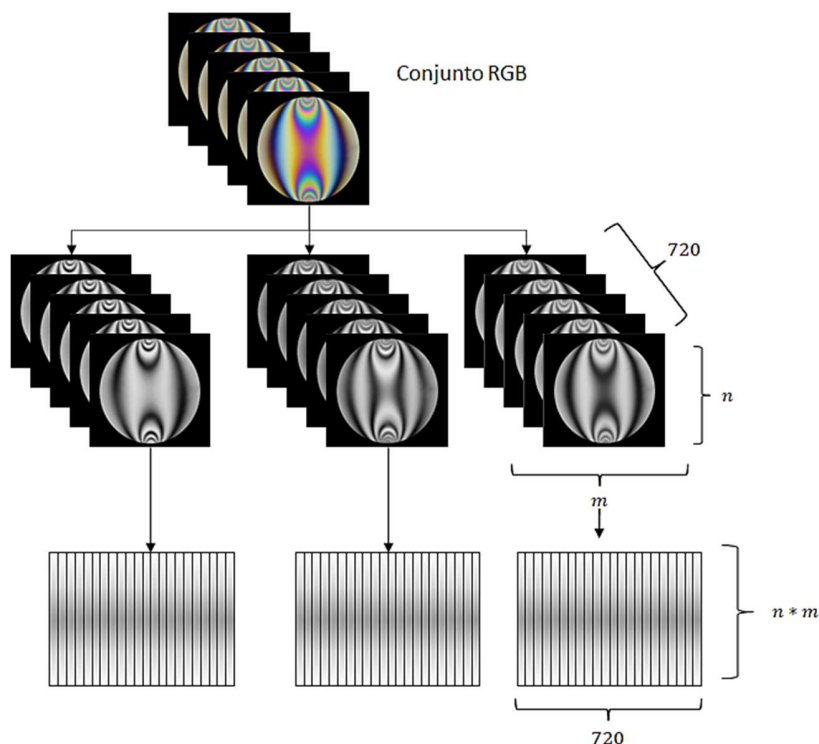


#### ▪ Agrupamiento no supervisado

El algoritmo de K-means se utilizó para identificar conjuntos de pixeles con comportamientos de color similar a lo largo de la secuencia de imágenes. Para esto, los datos ingresados fueron los valores de intensidad RGB de la totalidad de pixeles durante los 720 fotogramas de una secuencia.

Los valores de intensidad RGB de cada fotograma se encuentran en un arreglo multidimensional de  $[\mathbf{n}, \mathbf{m}, \mathbf{3}]$ , donde  $\mathbf{n}$  y  $\mathbf{m}$  son el número de filas y columnas de la imagen respectivamente. Estos datos fueron reorganizados antes de ingresarlos en el algoritmo de K-means, inicialmente se separaron los canales de color de cada fotograma y cada uno se reorganizó en un vector columna, obteniendo tres vectores de tamaño  $[\mathbf{n} * \mathbf{m}, \mathbf{3}]$  por cada fotograma, es decir **2160** vectores columna. Finalmente se crearon tres matrices a partir de estos vectores, como se muestra en la Figura 4-11.

**Figura 4-11:** Reorganización de los datos antes de ingresarlos en el algoritmo de K-means.



Luego de procesar la información el algoritmo entrega un vector unitario de longitud  $n * m$ , el cual contiene las categorías asociadas a cada píxel. Posteriormente se utilizaron las posiciones almacenadas de los píxeles para reconstruir una matriz de tamaño  $n * m$  donde se visualizan los conjuntos encontrados por el algoritmo.

Adicionalmente a las tres matrices de dimensión  $[n * m, 720]$ , es necesario ingresar el número deseado de conjuntos para establecer los centroides de las diferentes categorías y realizar la respectiva agrupación de datos. En este caso se utilizó una técnica de validación interna, es decir, se realizó una evaluación de la estructuración de los conjuntos sin tomar información ajena al algoritmo y su resultado, ayudando a establecer el método óptimo de agrupamiento y el número de categorías. La Tabla 11 a continuación, muestra los valores de los índices de evaluación para el número óptimo de grupos arrojado por diferentes métodos de evaluación para el método de agrupamiento de K-means.

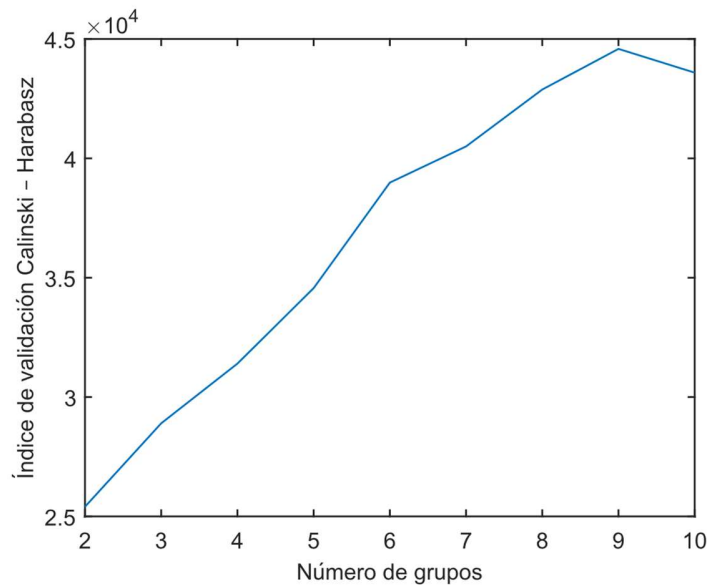
Para el criterio de Calinski – Harabasz el mayor valor pertenece al mejor índice de evaluación, mientras para el criterio de Davies – Bouldin el menor número corresponde al número de grupos con mejor agrupamiento.

**Tabla 11:** Número óptimo de categorías y sus índices de evaluación para el agrupamiento por K-means.

Criterio de evaluación	Método de agrupamiento	
	K-means	
	Número de categorías óptimo	Índice
Calinski - Harabasz	9	$3.8 \times 10^4$
Davies - Bouldin	9	1.025

En la Figura 4-12 se presenta la curva de validación por el criterio de Calinski – Harabasz para el algoritmo de agrupamiento no supervisado K-means.

**Figura 4-12:** Índices de validación de agrupamiento por el método K-means bajo el criterio de Calinski – Harabasz.



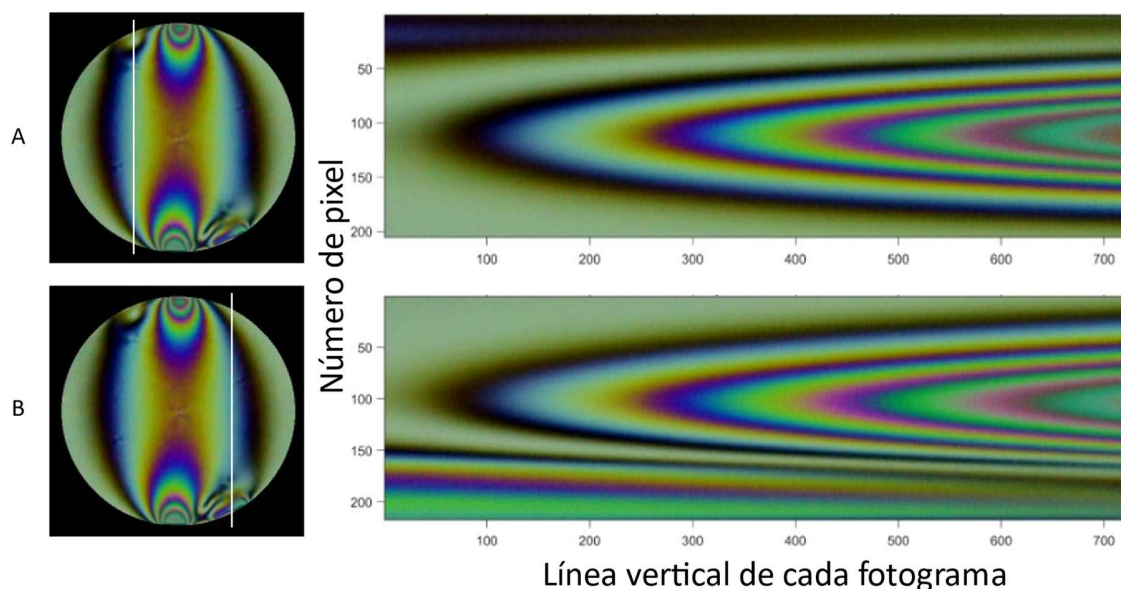
#### ▪ Apilamiento temporal

Este algoritmo, también conocido como “*Time-Stacks*”, muestra la evolución del cambio de ordenes de franjas durante la estimulación mecánica o térmica y permite comparar con diferentes zonas de la muestra. Para lograrlo se realizó la extracción de una fila o columna de cada uno de los fotogramas de la secuencia temporal y se concatenaron en una única imagen [56].

La Figura 4-13 muestra las diferencias del comportamiento de los ER dependiendo de su magnitud, ya que el residual inferior es de mayor tamaño y representa una mayor resistencia a los campos de esfuerzos generados por esfuerzos externos. En la parte superior de la imagen (**A**) se aprecia que al llegar al fotograma 350, la mitad de la secuencia, el residual superior se ha reducido en un 70 % y su efecto sobre el nuevo patrón de franjas es reducido. Por otro lado, en la imagen (**B**) se aprecia

el efecto del residual inferior sobre el nuevo patrón de franjas donde reduce su espacio y obliga a un mayor apilamiento de franjas. Adicionalmente se aprecia una línea sin franjas que se desplaza entre el residual y las franjas del nuevo campo de esfuerzos.

**Figura 4-13:** Apilamiento temporal de líneas verticales bajo la aplicación de carga mecánica. Esfuerzos residuales **(A)** Superior. **(B)** Inferior.



#### ▪ Recuperación del campo de esfuerzos

Durante el desarrollo de este trabajo se evaluaron dos tipos de secuencias de imágenes de fotoelasticidad con corrimiento de franjas. En el primer tipo el desplazamiento de franjas se logró por la aplicación de una carga mecánica. Para recuperar el valor de la fase de estas secuencias de imágenes se utilizó la técnica CHPST "*Computational hybrid phase stepping technique*". En el segundo tipo de secuencias están las muestras cuyo desplazamiento de franjas se logró mediante la estimulación térmica. En estos casos se implementó la técnica TTST "*Thermal transient stepping technique*" para recuperar el valor de la fase.

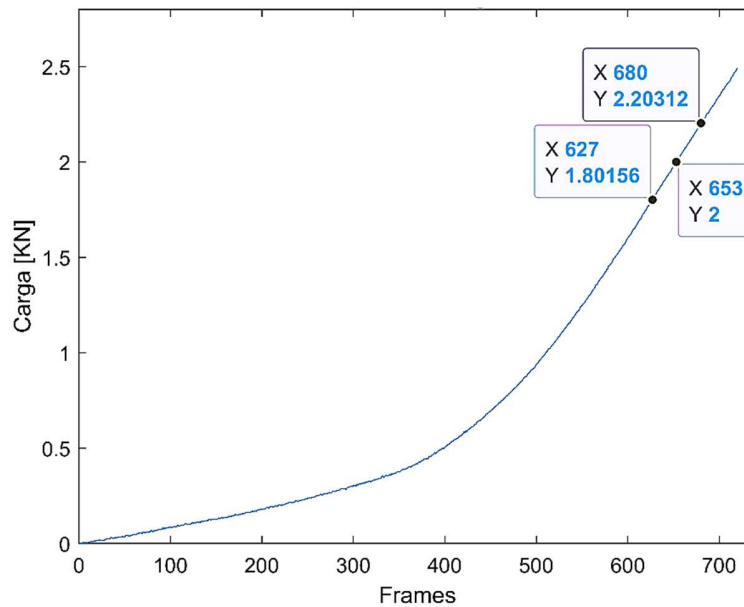
Se estableció como objetivo evaluar las analogías entre los desplazamientos de franja generados por los dos tipos de secuencias. Lo primero fue seleccionar las imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  de una secuencia de aplicación de carga. Las cuales corresponden a las configuraciones ópticas planteadas en la Tabla 2: Ecuaciones de intensidad propuestas por Briñez para la reconstrucción del campo de esfuerzos por el método CHLST. Adaptado de [39]. Donde las imágenes  $I_3$  e  $I_5$  corresponden la respuesta fotoelástica a un salto de carga simétrica superior e inferior respecto a  $I_1$ . En la literatura

se reportan mejores resultados con el uso de un salto de carga del 10 % respecto al valor de referencia [61].

### ▪ Selección de imágenes

La Figura 4-14 a continuación, muestra la selección de los fotogramas  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  a partir de la curva de carga asociada de la secuencia analizada. La cual se sincronizó respecto a los fotogramas submuestreados. Por otro lado, la Tabla 12 muestra los valores de referencia para las imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$ , las cuales se presentan en la Figura 4-15.

**Figura 4-14:** Curva de carga respecto a los fotogramas de la secuencia de aplicación de carga.

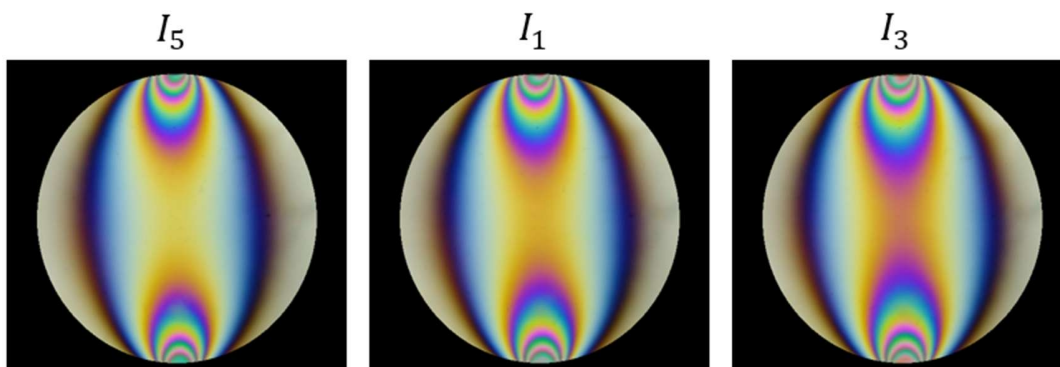


**Tabla 12:** Valores de referencia de las imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  para la secuencia de aplicación de carga.

Imagen	I5	I1	I3
Fotograma	627	653	680
Carga [KN]	1,8	2	2,2

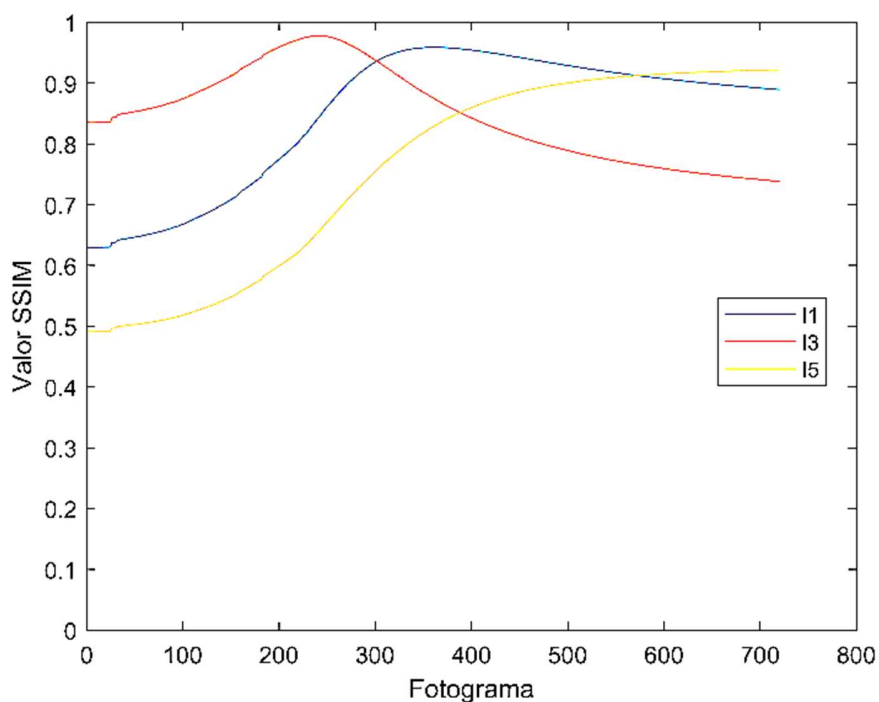


**Figura 4-15:** Imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  seleccionadas a partir de la Figura 4-14.



En cuanto a la selección de las respectivas imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  pertenecientes a la secuencia térmica, la literatura no reporta un salto térmico específico donde se obtenga un resultado óptimo. Por lo que en este caso se implementó una estrategia de identificación basada en la técnica SSIM. Se realizó una comparación entre cada uno de los fotogramas  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  asociados a la secuencia de carga contra los 720 fotogramas de la secuencia térmica para encontrar las tres imágenes con mayor similitud, el resultado se muestra en la Figura 4-16.

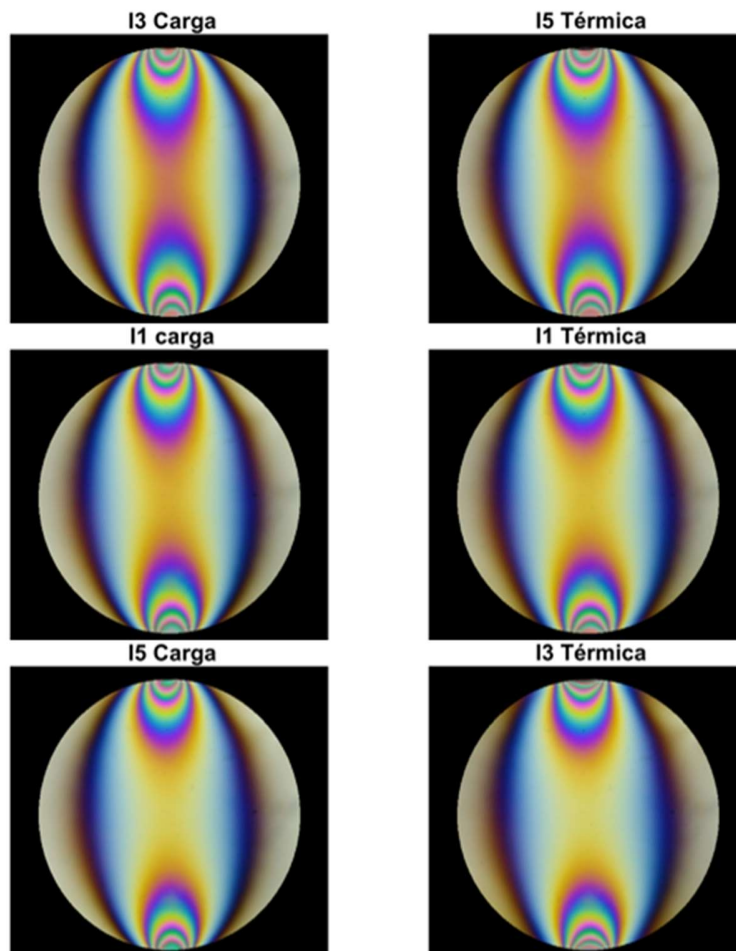
**Figura 4-16:** Valor de SSIM de  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  contra los 720 fotogramas de la secuencia térmica.



Las imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  encontradas por el método SSIM se muestran en la Figura 4-17 y se comparan a los fotogramas utilizados en la secuencia de carga. Donde se evidenció que los dos

métodos de estimulación generan un efecto diferente en la distribución de franjas. Por otro lado, Las imágenes  $I_3$  e  $I_5$  de la secuencia de carga corresponde a la  $I_5$  e  $I_3$  respectivamente, de la secuencia térmica. Este cambio se da debido a que la aplicación de carga genera un aumento en la densidad de franjas mientras la carga térmica la disminuye. La Tabla 13 presenta el número de fotograma y los valores de temperatura y carga asociados las imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  de la secuencia térmica.

**Figura 4-17:** Imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  de la secuencia de carga y sus homólogos de la secuencia térmica encontradas por el método SSIM.



**Tabla 13:** Número de fotograma, valores de temperatura y carga para las imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  asociadas a la secuencia térmica.

Imagen	I5	I1	I3
Fotograma	713	358	243
Temperatura [° C]	54	44	33
Carga [KN]	1,73	1,83	2,05

### ▪ Recuperación y desenvolvimiento del valor de fase

Luego de seleccionar las imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$ , las cuales contienen información de los valores de intensidad antes y después de realizar los saltos de carga o térmicos, se procedió a recuperar el retardo de fase isocromático asociado a dichos saltos. Para ello se utilizaron las Ecuación 22 - 24, las cuales son identidades trigonométricas obtenidas a partir de las ecuaciones presentadas en la Tabla 2: Ecuaciones de intensidad propuestas por Briñez para la reconstrucción del campo de esfuerzos por el método CHLST.

$$ID_1 = \frac{(I_1 - I_2)}{2} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$ID_2 = \frac{(I_3 - I_4 + I_5 - I_6)}{4} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$ID_3 = \frac{(I_5 - I_6 - I_3 + I_4)}{4} \quad \text{Ecuación 24}$$

A partir de las identidades se recuperó el retardo de fase isocromático producido por el salto de carga o térmico, como se muestra en la Ecuación 25, este valor se encuentra entre  $0$  y  $2\pi$ . Finalmente, el valor de fase envuelta se obtiene de despejar  $\delta$  de la Ecuación 26, como se muestra a continuación.

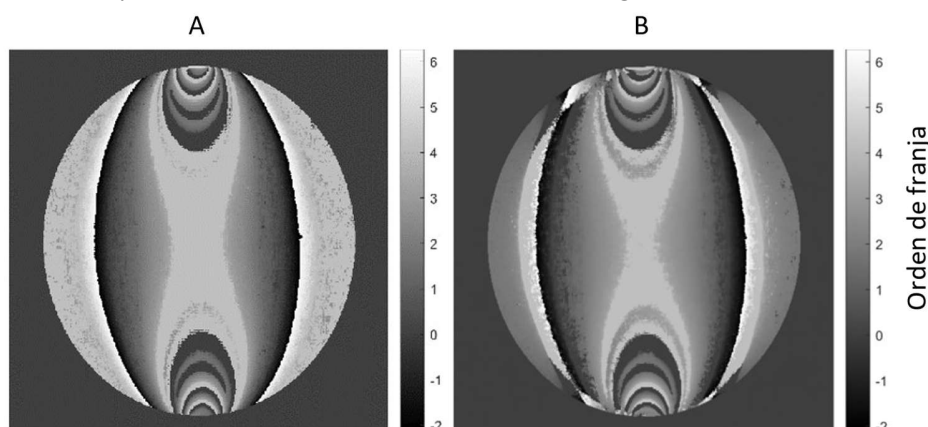
$$\Delta\delta = \arccos\left(\frac{ID_2}{ID_1}\right) \quad \text{Ecuación 25}$$

$$Z = ID_2 * \tan(\Delta\delta) + ID_3 * i \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\delta = \text{atan}(Z) \quad \text{Ecuación 27}$$

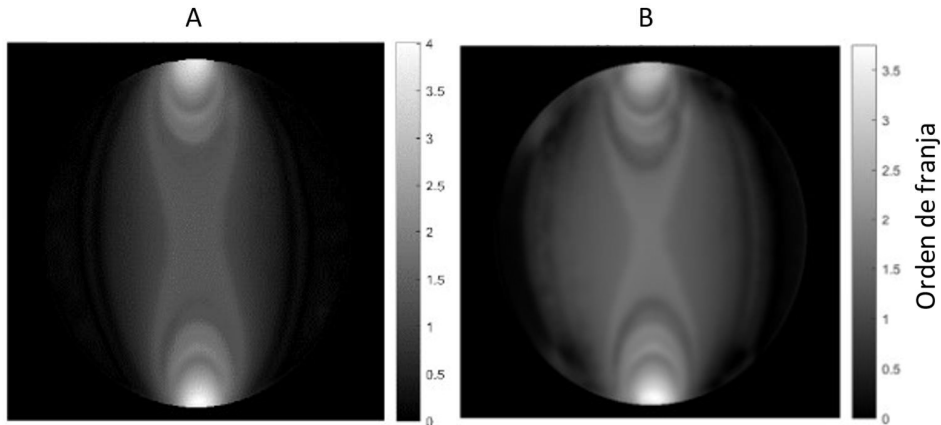
La Figura 4-18 a continuación, muestra los mapas de fase envueltos recuperados para las imágenes seleccionadas de las secuencias de carga y térmicas respectivamente.

**Figura 4-18:** Mapas de fase envueltos. **(A)** Secuencia de carga. **(B)** Secuencia térmica.



Cómo se muestra en la Figura 4-18, los valores de  $\delta$  obtenidos a partir de la Ecuación 26 están definidos entre  $-\pi$  y  $\pi$ , dada su naturaleza periódica. Para obtener el valor real se implementó el algoritmo de desenrollamiento presentado por Giglia y Romero [59]. La Figura 4-19 presenta los mapas de fase desenrollados para las secuencias de carga y térmica.

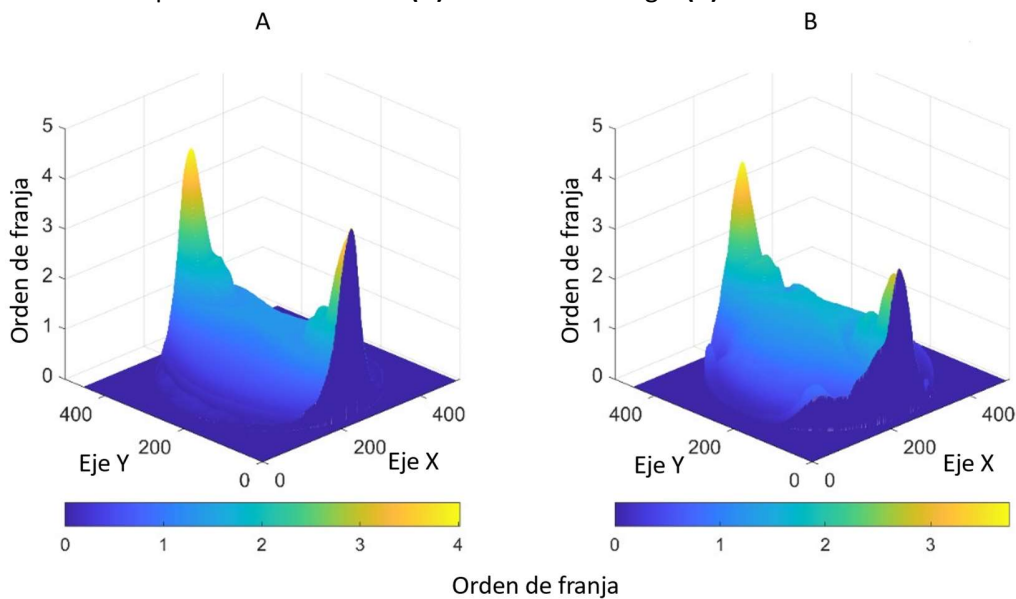
**Figura 4-19:** Mapa de fase desenrollado. **(A)** Secuencia de carga. **(B)** Secuencia térmica.



#### ▪ Superficie de esfuerzos

Una forma más atractiva visualmente para representar el campo de esfuerzos reconstruido, en términos de los órdenes de franja  $N$ , es por medio de la superficie de esfuerzos. La cual se logra a partir de una representación tridimensional de la Figura 4-19. La Figura 4-20 enseña las superficies de esfuerzo para las secuencias de carga y térmica respectivamente.

**Figura 4-20:** Superficie de esfuerzos. **(A)** Secuencia de carga. **(B)** Secuencia térmica.



## 4.3 Resultados

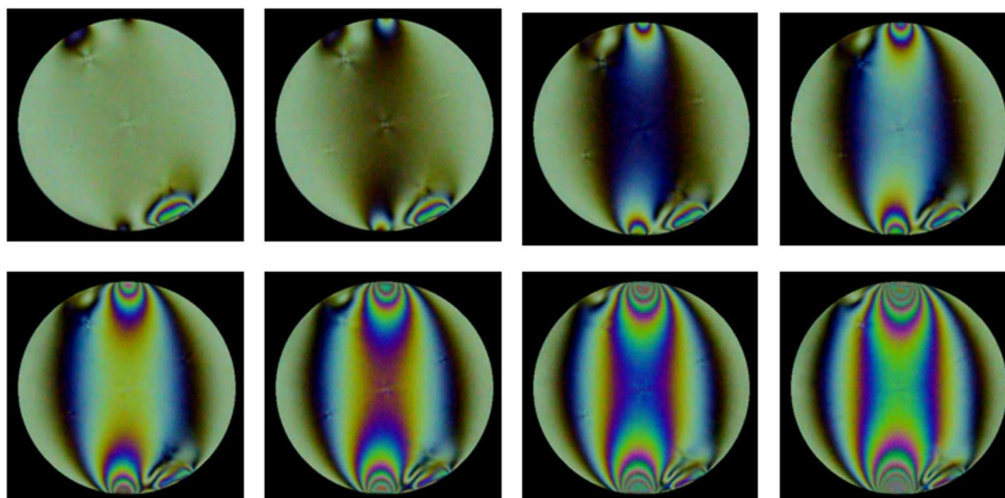
### 4.3.1 Evaluación del comportamiento de los ER bajo estimulación mecánica y térmica

La relación entre los esfuerzos residuales de una muestra y un nuevo campo de esfuerzos depende de factores que pueden influir de forma positiva o negativa en la integridad del elemento. De manera análoga sucede con la respuesta de los residuales a la estimulación térmica. En este capítulo se muestra una compilación de resultados que muestran los diferentes cambios en los campos de esfuerzos de distintas muestras con esfuerzos residuales de borde y de indentaciones, en respuesta a estimulaciones mecánicas y térmicas, evaluadas por técnicas asociadas a la fotoelasticidad.

#### ▪ Residuales de borde

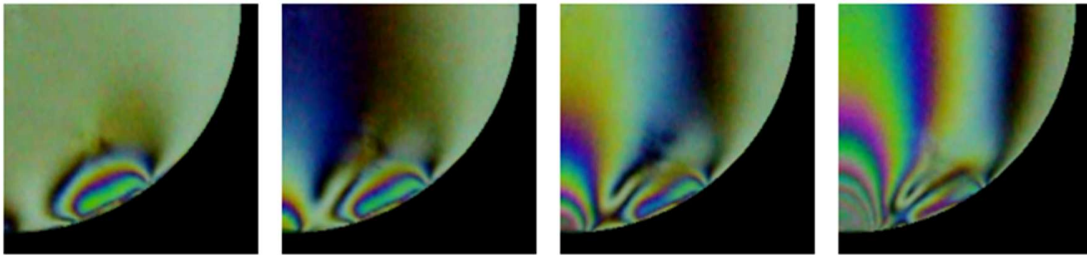
Los residuales de borde son producto de una carga mecánica por compresión sobre el perímetro de la muestra y un posterior calentamiento. La Figura 4-21 muestra un experimento de corrimiento de fase de seis pasos bajo la configuración óptica 1 de la Tabla 2: Ecuaciones de intensidad propuestas por Briñez para la reconstrucción del campo de esfuerzos por el método CHLST. Adaptado de [39]. En la que se muestra la evolución de dos ER de borde a medida que incrementa el patrón de franjas generado por una carga de compresión. Dichos esfuerzos se encuentran en la parte superior izquierda y en la parte inferior derecha de la muestra.

**Figura 4-21:** Comportamiento de esfuerzos residuales de borde bajo el efecto de un nuevo campo de esfuerzos producto de una compresión diametral.



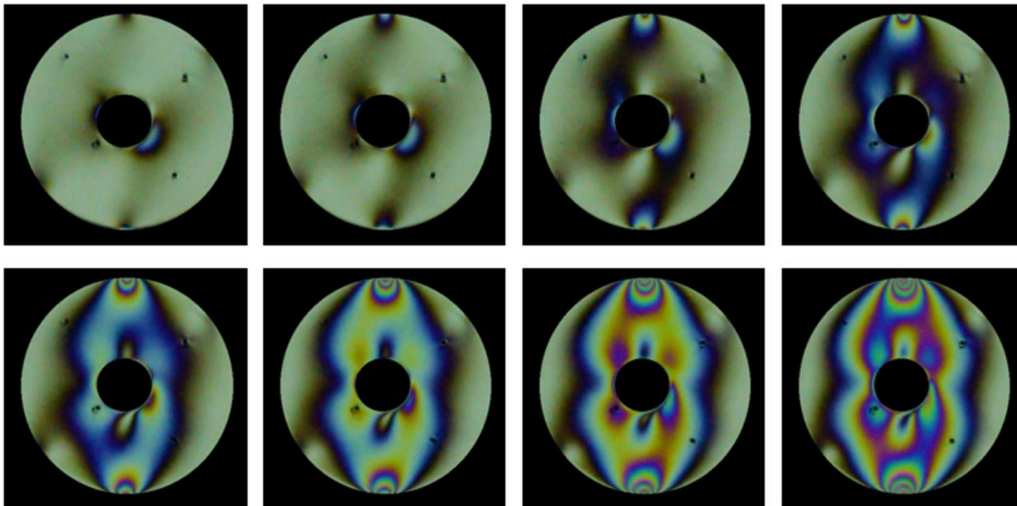
El ER de la parte inferior de la Figura 4-21 es presentado de forma aumentada en la Figura 4-22. Este esfuerzo es reducido de forma parcial por el nuevo esfuerzo compresivo y su efecto sobre el nuevo patrón de franjas es más definido, ya que logra deformarlo en mayor medida. Es de notar que en la zona donde se encuentran el residual con el nuevo patrón de franjas se forma una región transparente, la cual se mueve a medida que el residual reduce su tamaño.

**Figura 4-22:** Ampliación de la zona del esfuerzo residual de borde ubicado en la parte inferior.



La Figura 4-23 presenta la evolución del patrón de franjas asociado a una carga de compresión sobre una muestra tipo anillo con ER de borde y de indentación. La presencia de estos residuales genera una perturbación en la distribución de franjas alrededor de toda la muestra, y como respuesta se observa un patrón no homogéneo.

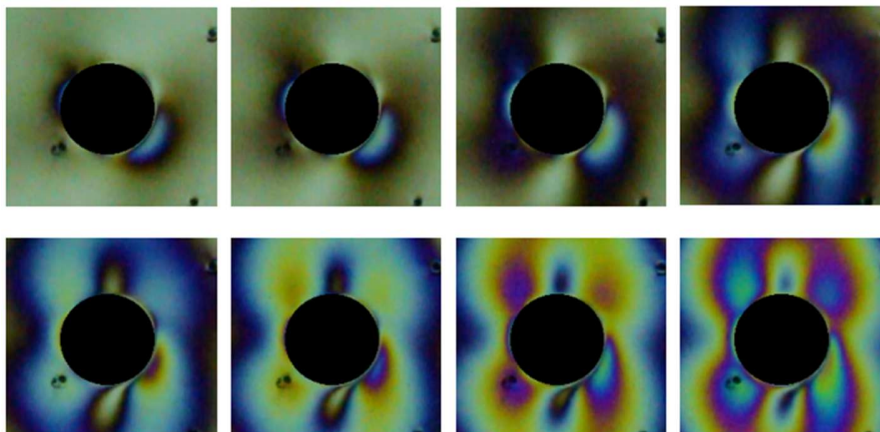
**Figura 4-23:** Aumento de esfuerzo en un ER de borde ubicado en la circunferencia interna de un anillo bajo compresión.



La Figura 4-24 muestra la región del diámetro interno de la Figura 4-23, donde se encuentran los esfuerzos residuales. En dicha zona se aprecia el crecimiento anticipado, en términos de patrones de franja, comparado con el resto de la muestra, especialmente para el residual ubicado en la parte

derecha, ya que siempre tiene un orden de franja superior que su vecindario. Es decir, la presencia del residual en este caso aumenta el esfuerzo en la zona donde está ubicado.

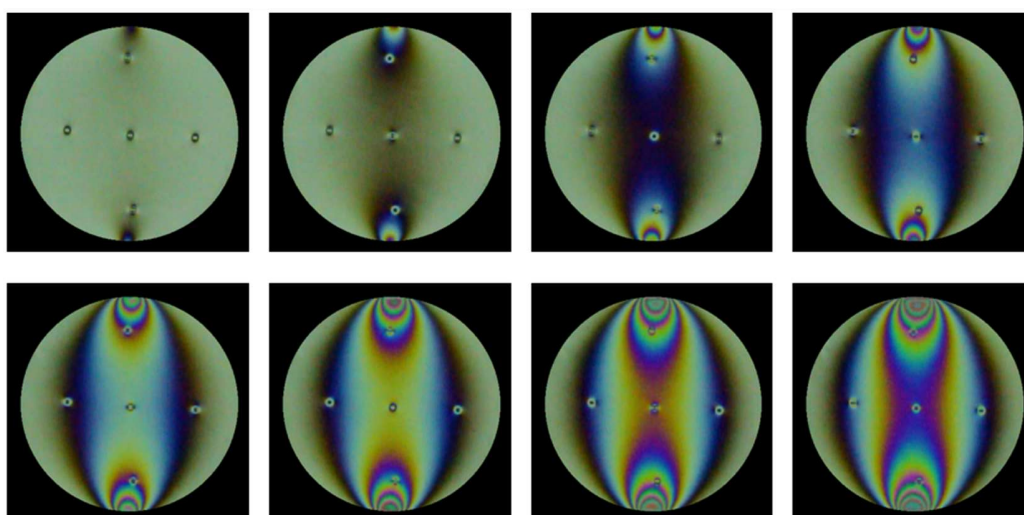
**Figura 4-24:** Ampliación de la zona de aumento de esfuerzos debido a la presencia de un esfuerzo residual al momento de aplicar una carga mecánica.



#### ▪ Residuales por indentación

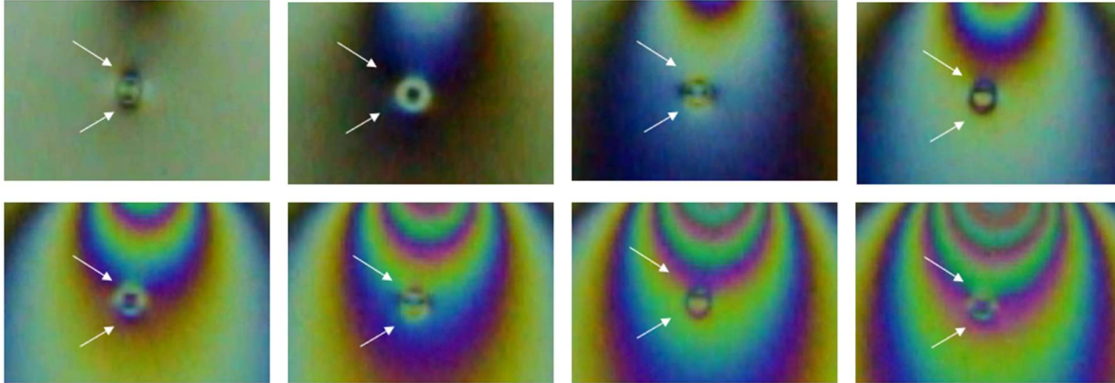
El proceso de indentación de las muestras consistió en la deformación de la superficie con un indentador de dureza, aplicando una carga de compresión en frío. La Figura 4-25, a continuación, presenta un disco bajo compresión diametral visto por fotoelasticidad, con cinco ER generados por indentaciones ubicadas en diferentes zonas de esfuerzos (Altos, medio y bajos).

**Figura 4-25:** Efecto de la presencia de esfuerzos residuales de tipo indentación en el campo de esfuerzos generado por una carga mecánica.



La Figura 4-26 presenta de forma ampliada el efecto del residual ubicado en la zona de altos esfuerzos sobre el nuevo patrón de. Las regiones señaladas por flechas blancas indican los puntos alrededor del residual que mantienen una tonalidad superior que su vecindario, es decir, el esfuerzo es mayor en esas ubicaciones debido a la presencia del residual.

**Figura 4-26:** Ampliación de la zona de altos esfuerzos afectada por la presencia de esfuerzos residuales de tipo indentación.

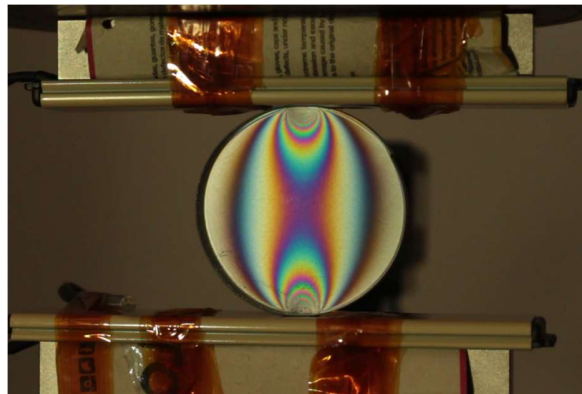


### 4.3.2 Efecto de los cambios de temperatura sobre los residuales

#### ▪ Adquisiciones termográficas

Los termogramas adquiridos en diferentes experimentos permitieron conocer la distribución de temperatura en la superficie de las muestras mientras estaban sometidas a una estimulación térmica en aumento y una carga mecánica constante. Como se ve en la Figura 4-27. La estimulación térmica se realizó de forma independiente a la adquisición termográfica, ya que esta última no se utilizó en todos los casos de aplicación de carga térmica.

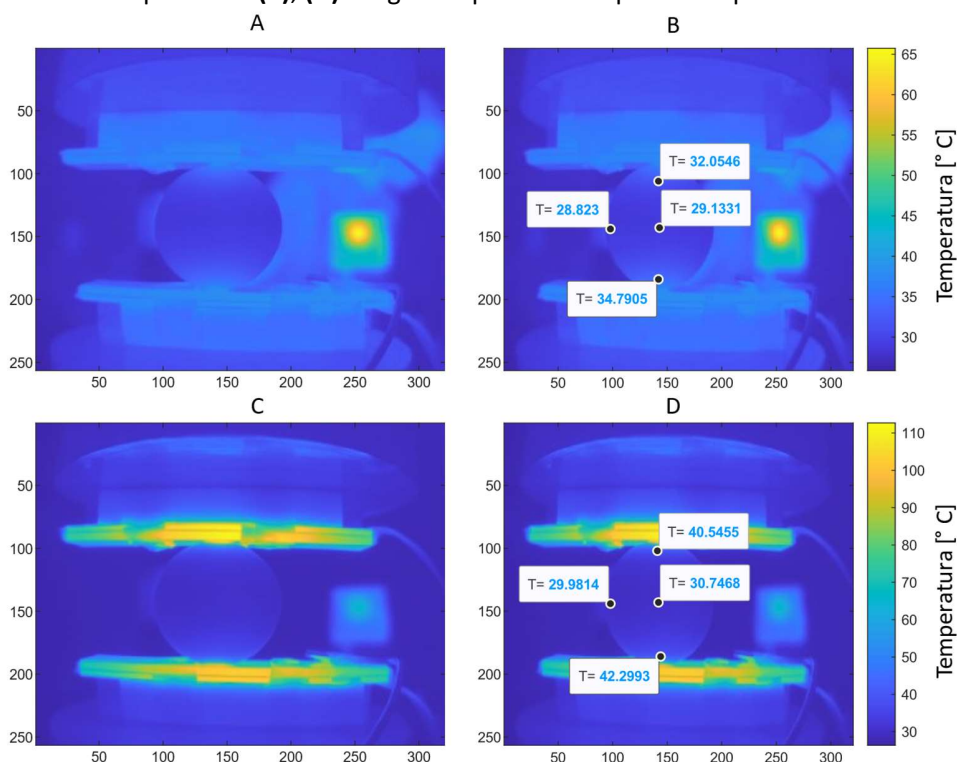
**Figura 4-27:** Disco sometido a cargas mecánicas y térmicas visto en fotoelasticidad.





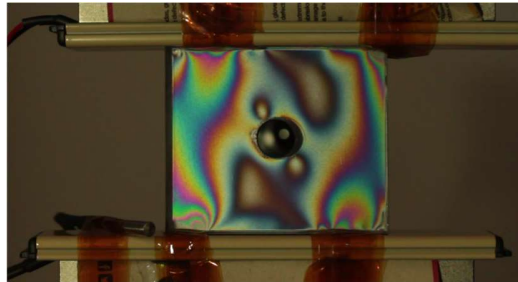
La Figura 4-28 presenta cuatro termogramas. Las imágenes **A** y **B** fueron capturadas antes de aplicar la rampa térmica sobre la muestra, la primera presenta el mapa de la temperatura, mientras en la segunda se especifica la temperatura de cuatro puntos específicos. Dos puntos en la parte central de la muestra con  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y dos puntos en las zonas de aplicación de carga y temperatura con valores de  $32$  y  $34,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Por otro lado, las imágenes **C** y **D** presentan el mapa de temperaturas de la muestra luego de la aplicación térmica y la comparación de los puntos medidos en la imagen **B**. En la cual se evidenció un aumento de temperatura en las zonas de aplicación de carga y temperatura de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, mientras la zona central de la muestra aumentó entre  $1$  y  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 4-28:** Termogramas para disco bajo compresión. **(A), (B)** Antes de aplicación de rampa de temperatura. **(C), (D)** Luego de aplicar la rampa de temperatura.



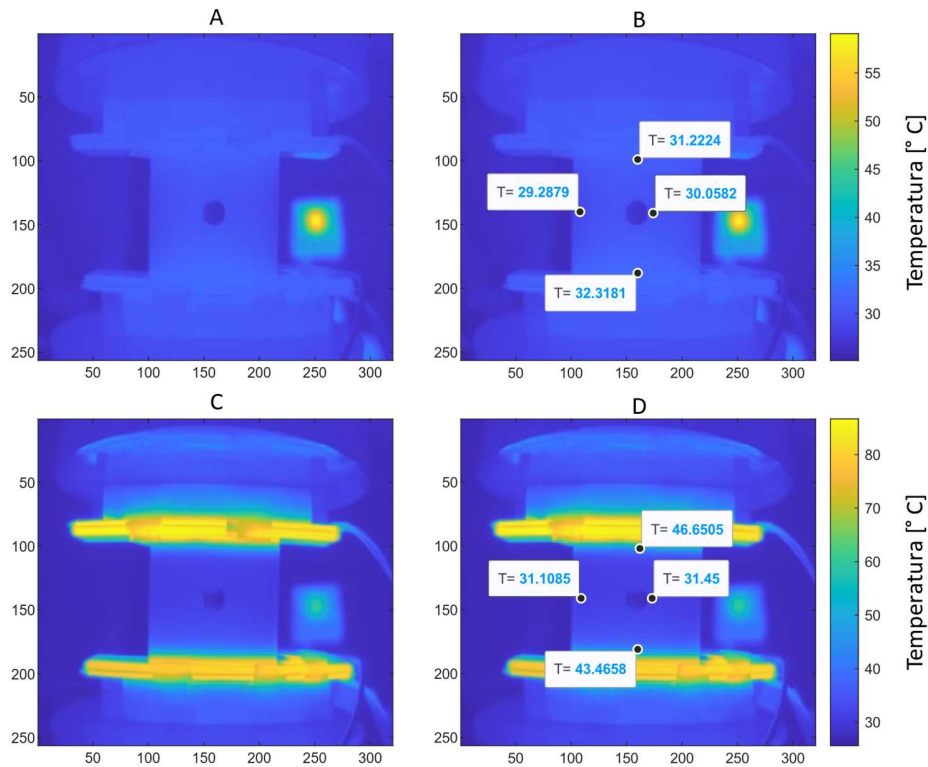
La Figura 4-29 presenta el patrón de franjas de fotoelasticidad generado en una placa de PMMA sometida a una carga de compresión no uniforme. A la cual posteriormente se le aplicó una estimulación térmica. De acuerdo con la distribución de franjas mostrada en la Figura 4-29 las esquinas de la placa son los puntos de distribución de carga.

**Figura 4-29:** Placa de PMMA con orificio bajo una carga de compresión no uniforme.



En la Figura 4-30 se registran cuatro termogramas correspondientes a la Figura 4-29. **A** y **B** fueron capturadas antes de aplicar la rampa térmica sobre la muestra. El termograma **C** muestra una distribución uniforme de temperatura a lo largo de la zona de contacto entre la placa y los actuadores térmicos cuando estos se encuentran a una temperatura superior a  $80^{\circ}\text{C}$ . La imagen **D** permite comparar cuatro puntos específicos luego de la aplicación térmica, en el caso de la parte superior la temperatura aumentó alrededor de  $15^{\circ}\text{C}$  mientras en la parte inferior  $10^{\circ}\text{C}$ . La zona central de la placa solo presentó un aumento entre  $1$  y  $2^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 4-30:** Termogramas para placa con concentrador bajo compresión no uniforme. **(A), (B)** Antes de aplicación de rampa de temperatura. **(C), (D)** Luego de aplicar la rampa de temperatura.

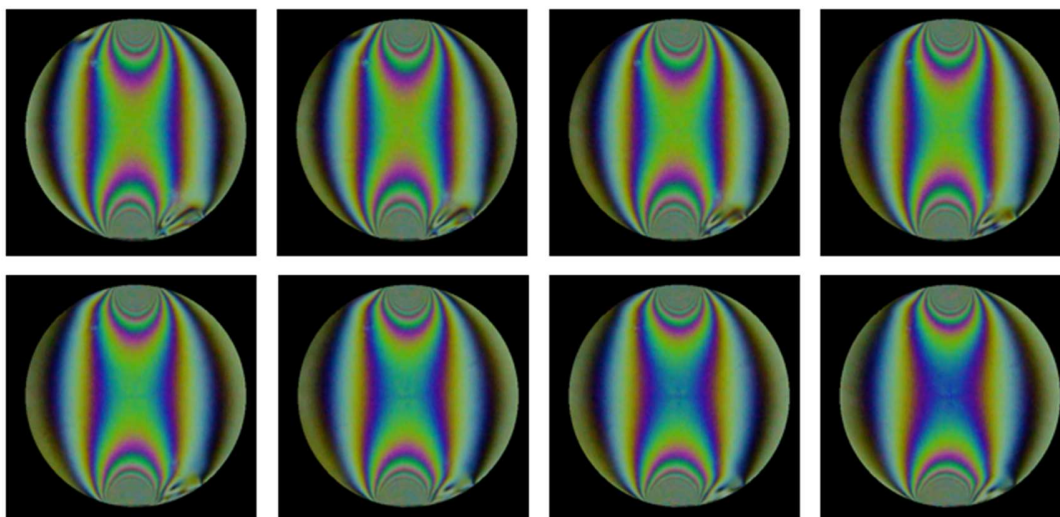


### ▪ Recuperación mecánica por calentamiento en ER

La relajación de esfuerzos mecánicos se refiere a la reducción de carga en función del tiempo. Existen diferentes mecanismos capaces de generar el estado de relajación de esfuerzos en un material. El primero obedece a una respuesta del material al estado de tensiones buscando un reajuste interno, para el cual utiliza la energía remanente del proceso de carga. Adicionalmente, el aumento en la temperatura favorece la difusión del esfuerzo dentro del material [90], [128], [140].

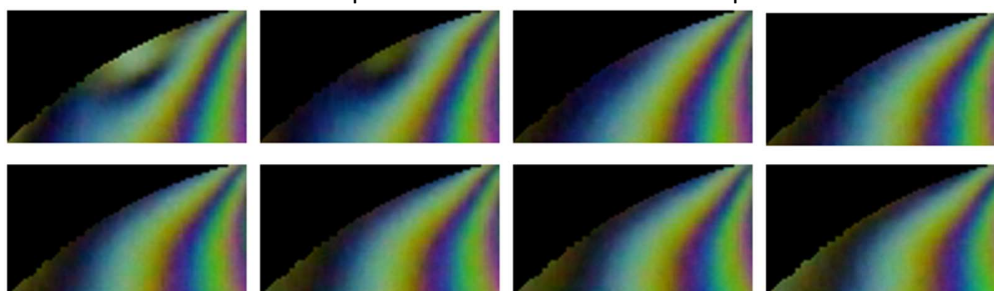
La Figura 4-31 muestra el comportamiento de esfuerzos residuales de borde y de indentación, a medida que se aplica una estimulación térmica sobre la muestra. Como respuesta al aumento de la temperatura los patrones de franja se contraen y los ER de borde se recuperan.

**Figura 4-31:** Secuencia de corrimiento térmico en un disco en compresión y recuperación de zonas con esfuerzos residuales.



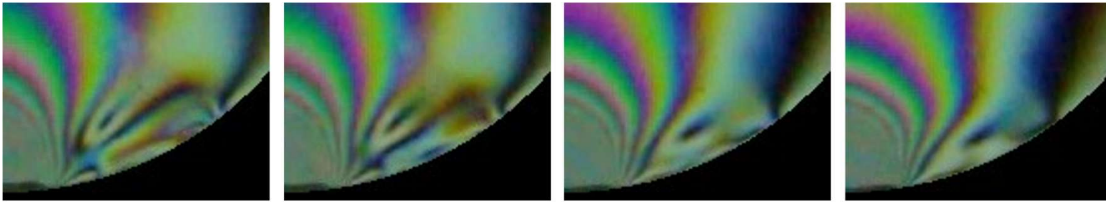
La Figura 4-32 presenta la recuperación del remanente del esfuerzo residual ubicado en la parte superior. Este se recupera primero que el ER ubicado en la parte inferior, por ende, con una estimulación térmica menor. Al desaparecer, el patrón de franjas recupera su homogeneidad.

**Figura 4-32:** Aumento de la recuperación del esfuerzo residual superior.



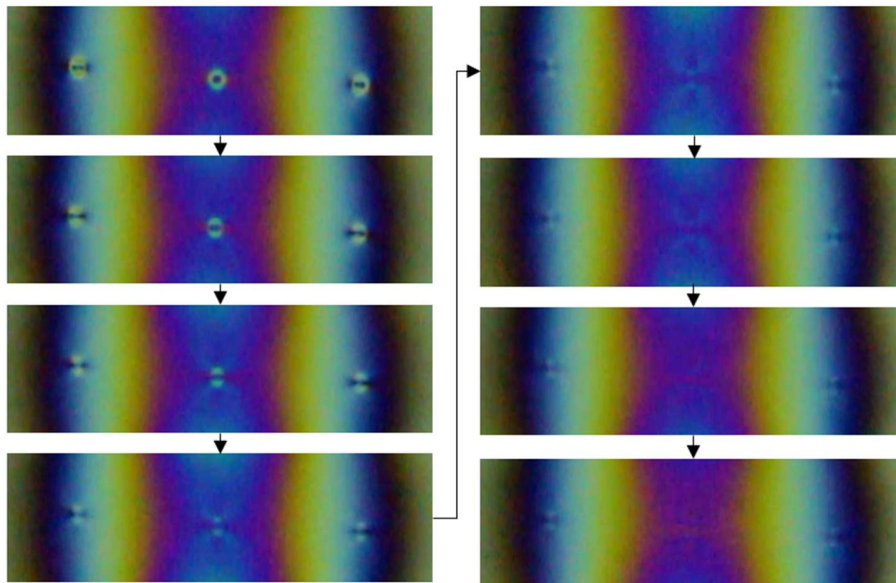
La Figura 4-33 presenta el comportamiento del residual en la zona inferior, su recuperación comienza desde el centro del residual, la secuencia de aumento muestra con mayor claridad como los patrones internos del residual van desapareciendo, haciendo que su tamaño también disminuya. La exposición y estimulación térmica no logra recuperar este residual de forma completa. El índice de similitud estructural entre la primera y la última imagen de la Figura 4-33 es de 0.40, este valor podría asociarse a la disminución del tamaño del ER y el cambio en la curvatura de los patrones de franja. Por otro lado, las zonas recuperadas de la muestra retoman el patrón de franjas típico del campo de esfuerzos.

**Figura 4-33:** Aumento de la zona donde se estimuló el esfuerzo residual inferior.



La Figura 4-34 presenta el efecto de la carga térmica sobre los esfuerzos residuales de tipo indentación y sus zonas aledañas. En este caso se generó una recuperación en el material, disminuyendo la profundidad y el ancho de las indentaciones. También se homogenizó la zona en términos de patrones de franja, es decir, disminuyeron los esfuerzos presentes.

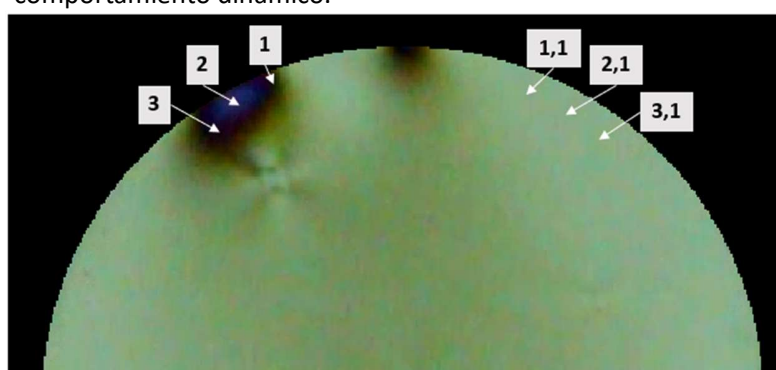
**Figura 4-34:** Aumento en la zona medios y bajos donde se recuperan los esfuerzos residuales presentes debido a la aplicación de una carga térmica.



### 4.3.3 Cambio en la dinámica de color en pixeles de interés

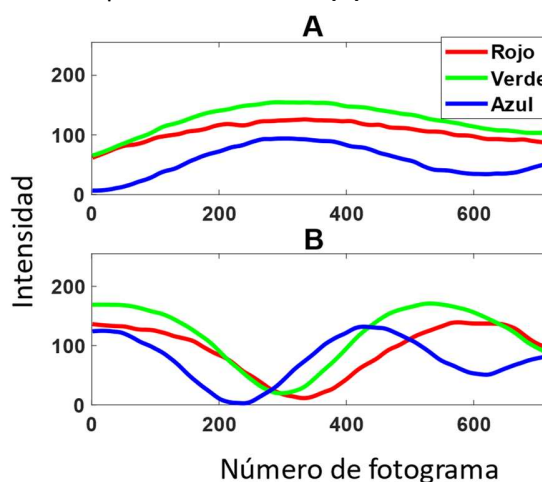
En la Figura 4-35 corresponde a un fotograma de una secuencia donde se aplicaron 2500 Newtons de carga. En ella se presentan los pixeles **1**, **2**, **3** ubicados en un ER de borde. Los pixeles **1.1**, **2.1**, **3.1** son posicionados simétricamente en una zona sin ER, los cuales se utilizan a modo de referencia. El pixel **1** seleccionado se encuentra más cerca del punto de aplicación de la carga, mientras el **2** es un punto intermedio y el **3** se encuentra más alejado.

**Figura 4-35:** Pixeles con y sin esfuerzos residuales seleccionados para evaluar su comportamiento dinámico.



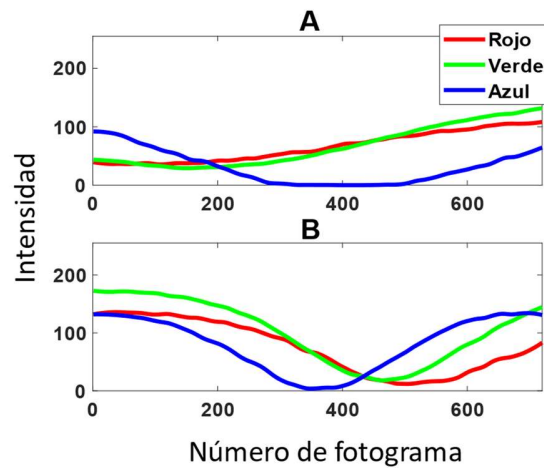
La actuación por canal de color del pixel **1** y su referencia se muestran en la Figura 4-36. La presencia del esfuerzo residual genera un desfase en el punto de partida para las señales, la señal **1** arranca en un valle y con un comportamiento negativo mientras la señal **1.1** parte de un pico y es constante hasta el fotograma 150. Al estar más cerca del punto de aplicación de la carga el pixel **1** es el primero en interactuar con el nuevo patrón de franjas, la presencia del residual hace que el cambio en la intensidad de color sea primero en este pixel, comparado con el **1.1**.

**Figura 4-36:** Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 1 con ER. (B) Pixel 1.1 sin ER.



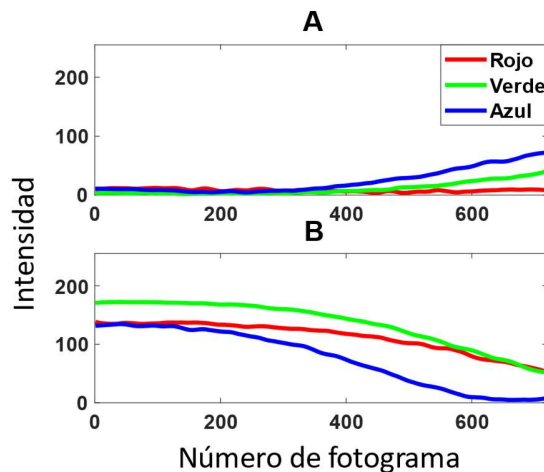
Análogamente se representa el comportamiento de los pixeles **2** y **2.1** en la Figura 4-37. Donde se aprecia un desfase entre las dos señales, siendo este mayor que el presentado en la Figura 4-36, asociada a las señales **1** y **1.1**. Los valores de intensidad para los puntos de referencia **1.1** y **2.1** son similares a lo largo de la secuencia, caso contrario para los puntos donde se ubica el esfuerzo residual **1** y **2**, teniendo este último un periodo mayor.

**Figura 4-37:** Comportamiento por canal de color. **(A)** Pixel **2** con ER. **(B)** Pixel **2.1** sin ER.



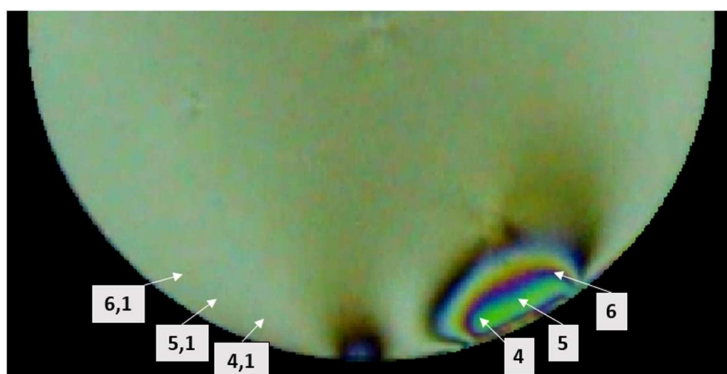
La Figura 4-38 presenta el comportamiento de las señales asociadas a los puntos **3** y **3.1**. Las cuales siguen la tendencia de las señales anteriores donde el pixel de referencia **3.1** corresponde a una señal similar a las encontradas en **2.1** y **1.1**. Mientras la frecuencia de **3** es menor que la mostrada para **2** y uno **1**. Por lo presentado en la Figura 4-9, el comportamiento de los puntos con ER se encuentra en un nivel de orden inferior que sus referencias.

**Figura 4-38:** Comportamiento por canal de color. **(A)** Pixel **3** con ER. **(B)** Pixel **3.1** sin ER.



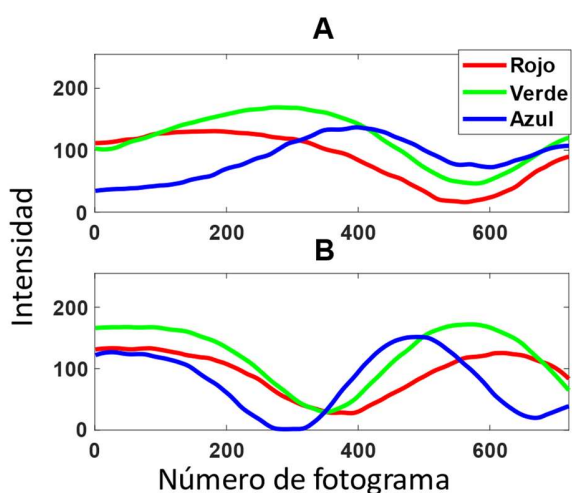
Por otro lado, el esfuerzo residual ubicado en la parte inferior de la muestra presentada en la Figura 4-22 se evalúa a continuación. Se seleccionaron los píxeles **4**, **5** y **6** del esfuerzo residual y los puntos **4.1**, **5.1** y **6.1** como referencia.

**Figura 4-39:** Píxeles con y sin esfuerzos residuales seleccionados para evaluar su comportamiento por medio de los cambios de intensidad de color.



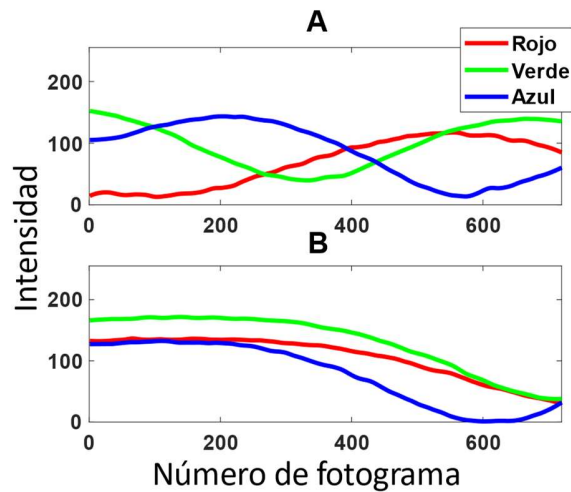
En la Figura 4-40 se presenta el comportamiento de los puntos **4** y **4.1**, ambos ubicados en una zona de bajos esfuerzos, sin embargo el punto de referencia muestra un comportamiento constante hasta la mitad de la secuencia donde toma un comportamiento negativo asociado a un valle, por otro lado, los valores asociados al esfuerzo residual varían dependiendo del canal de color, el canal azul al ser el de menor longitud de onda es el de mayor variación, mientras el canal rojo es casi constante.

**Figura 4-40:** Comportamiento por canal de color. **(A)** Pixel **4** con ER. **(B)** Pixel **4.1** sin ER.



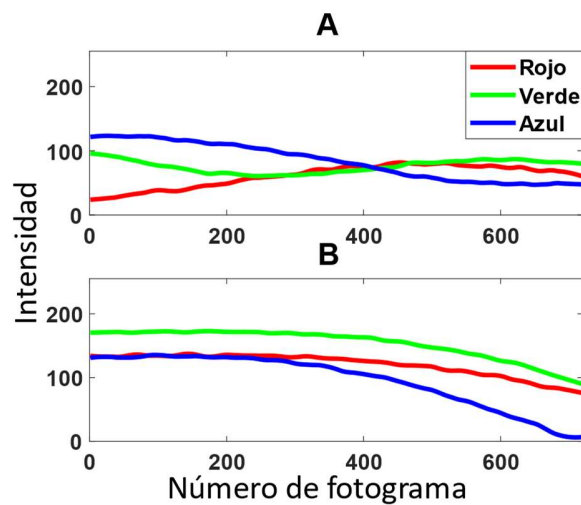
Los cambios asociados al punto 5 de la Figura 4-39 se presentan en la Figura 4-41. En este caso el comportamiento del esfuerzo residual se asemeja a una zona de esfuerzos medios aun estando ubicada en una zona de bajos esfuerzos.

**Figura 4-41:** Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 5 con ER. (B) Pixel 5.1 sin ER.



Para el caso de del punto 6, se encontró que la señal generada por los cambios de intensidad en los canales de color a lo largo de la secuencia de estimulación mecánica tiene una frecuencia menor que su referencia la señal 6.1 y el punto del residual 5, como se presenta en la Figura 4-42. Dado que el patrón de franjas asociado el esfuerzo residual disminuye, como se presentó en la Figura 4-22, el comportamiento de la señal 6 corresponde a una reducción de ordenes de franja.

**Figura 4-42:** Comportamiento por canal de color. (A) Pixel 6 con ER. (B) Pixel 6.1 sin ER.

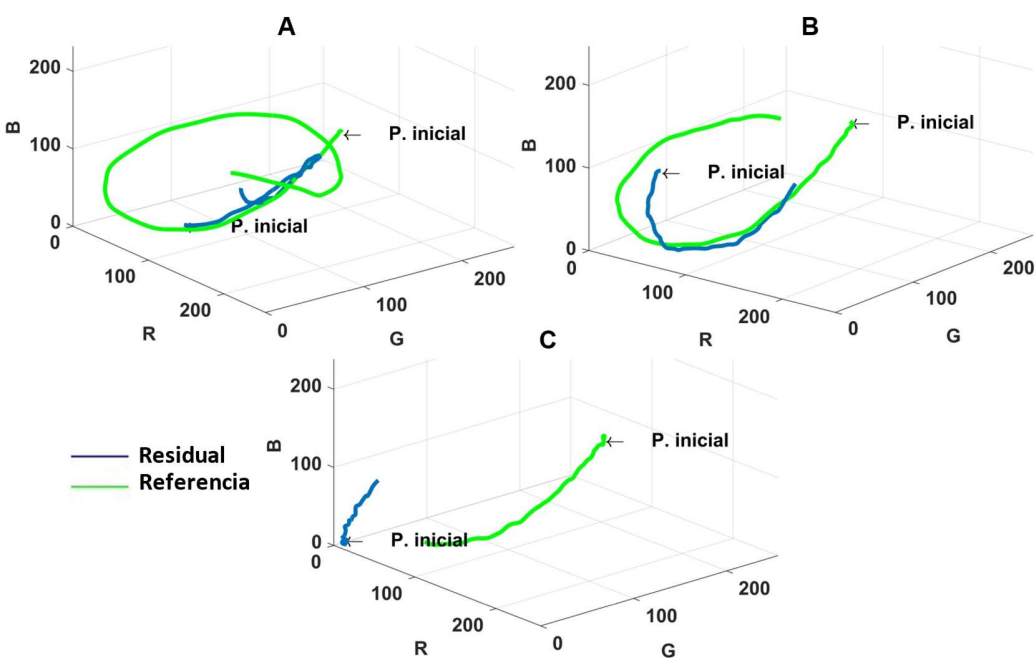




### 4.3.4 Trayectorias de puntos de interés

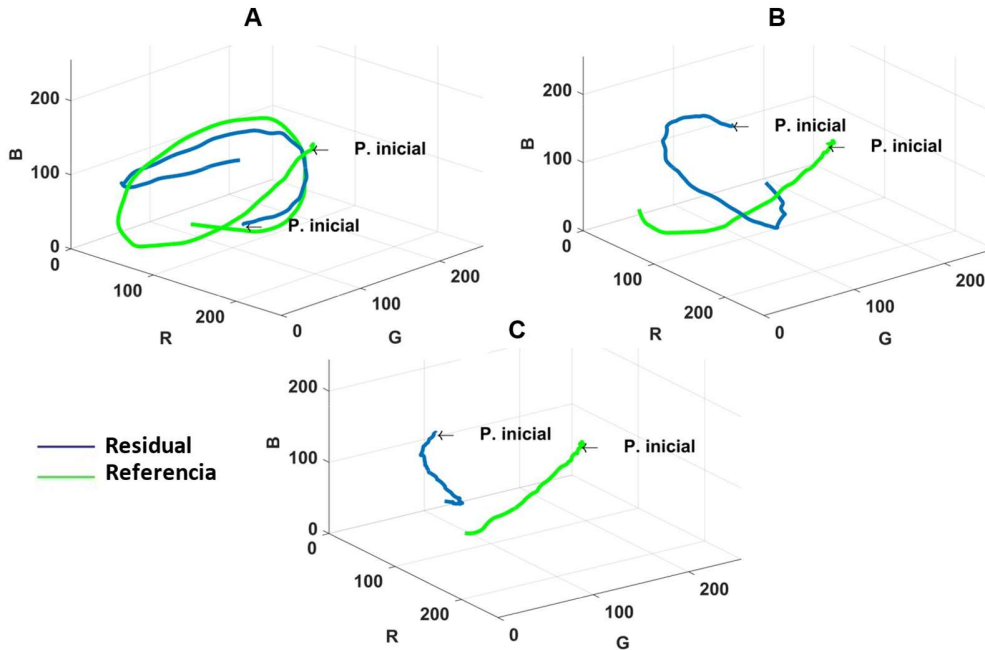
La Figura 4-43 presenta la comparación de las trayectorias de los tres puntos del residual superior elegidos anteriormente respecto a los puntos homólogos. Allí se aprecian trayectorias diferentes en cuanto a distancia y dirección donde la línea de color azul corresponde con el esfuerzo residual mientras la verde es la referencia. Las trayectorias encontradas corresponden con esfuerzos ubicados en una zona de bajos esfuerzos.

**Figura 4-43:** Trayectorias de color para los puntos seleccionados en la Figura 4-35. **(A)** Pixel con ER 1 pixel sin ER 1.1. **(B)** Pixel con ER 2 pixel sin ER 2.1. **(C)** Pixel con ER 3 pixel sin ER 3.1.



Las trayectorias de los puntos **4**, **5**, **6** y sus respectivas referencias se presentan en la Figura 4-44. En este caso el comportamiento de algunos puntos dentro del residual tiene trayectorias con distancias y características similares a zonas de esfuerzo mayores, ya que tienen trayectorias más largas y para los casos de las señales **5** y **6** tienen envolvimiento.

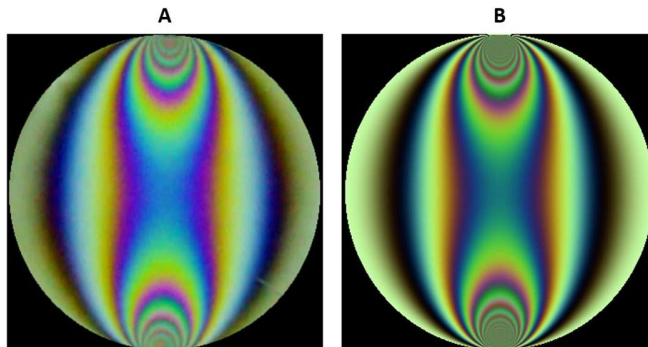
**Figura 4-44:** Trayectorias de color para los puntos seleccionados en la Figura 4-39. **(A)** Pixel con ER 4 pixel sin ER 4.1. **(B)** Pixel con ER 5 pixel sin ER 5.1. **(C)** Pixel con ER 6 pixel sin ER 6.1.



### 4.3.5 Similitud entre imágenes experimentales y sintéticas de fotoelasticidad

En esta sección se presenta una comparación entre las imágenes de fotoelasticidad adquiridas de forma experimental y las desarrolladas de forma sintética por algoritmos computacionales. La Figura 4-45, presenta un caso de un disco bajo compresión diametral visto en fotoelasticidad por una imagen experimental **(A)** y una imagen simulada **(B)**. La similitud entre las dos imágenes fue medida por cuatro métricas: Correlación lineal (**73,4%**), SSIM (**62,2**), MSE (**0,042**) y PSNR (**13,8**). Como se presenta en la Tabla 14.

**Figura 4-45:** Comparación de imágenes de fotoelasticidad. **(A)** Experimental. **(B)** Sintética.

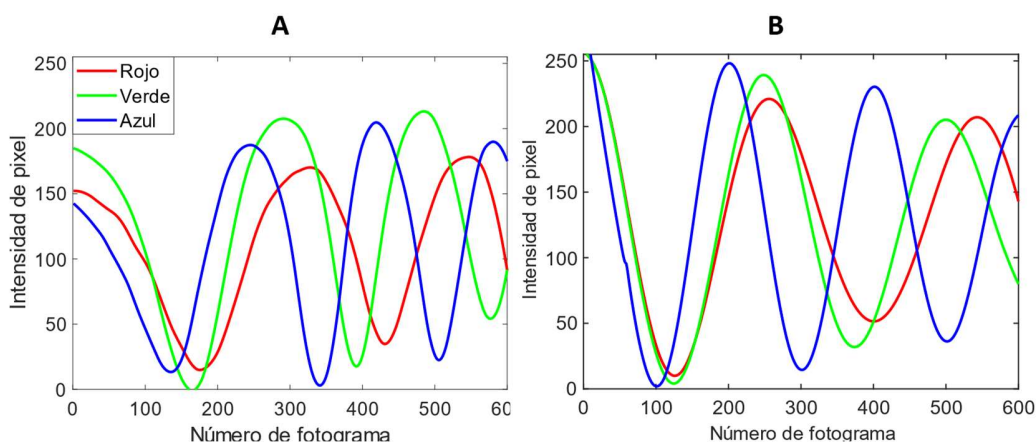


**Tabla 14:** Resultado de las métricas de comparación de las imágenes de la Figura 4-45.

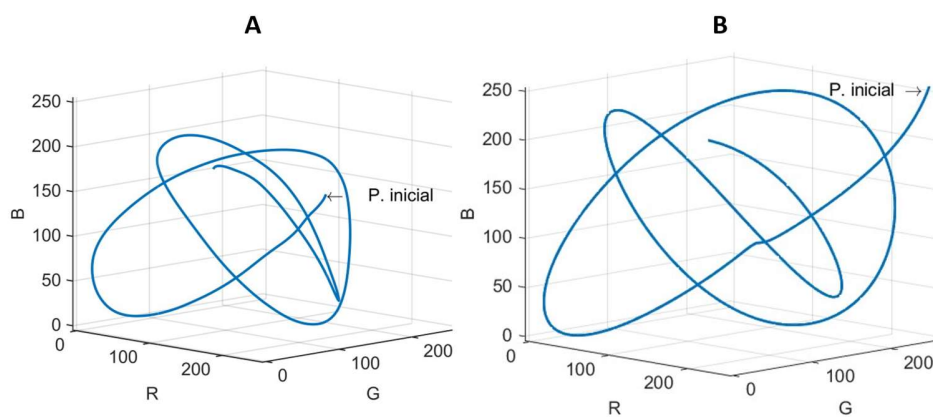
Correlación lineal	SSIM	MSE	PSNR
73,45 %	62,77%	0,04	13,78

Luego de seleccionar un pixel ubicado en la zona de altos esfuerzos para las imágenes experimental y sintética de la Figura 4-45. Se presenta la comparación del comportamiento por canal de color en la en la Figura 4-46. En este caso la imagen experimental no alcanza a tener intensidades superiores a 210, dado que la configuración óptica experimental. De igual forma, este efecto se logra apreciar en la Figura 4-47, donde se presenta la dinámica de ambas imágenes en el espacio RGB.

**Figura 4-46:** Comparación del comportamiento por canal de color. **(A)** Experimental. **(B)** Sintética.



**Figura 4-47:** Comparación de la dinámica de color. **(A)** Experimental. **(B)** Sintética.



### 4.3.6 Comportamiento general en base a distancias de trayectorias de color.

Por medio de la estimación de las distancias asociadas a las trayectorias generada por la variación de intensidad de color de todos los pixeles de la muestra, se reconstruyó un mapa de color capaz de identificar las zonas donde los esfuerzos residuales se encuentran ubicados.

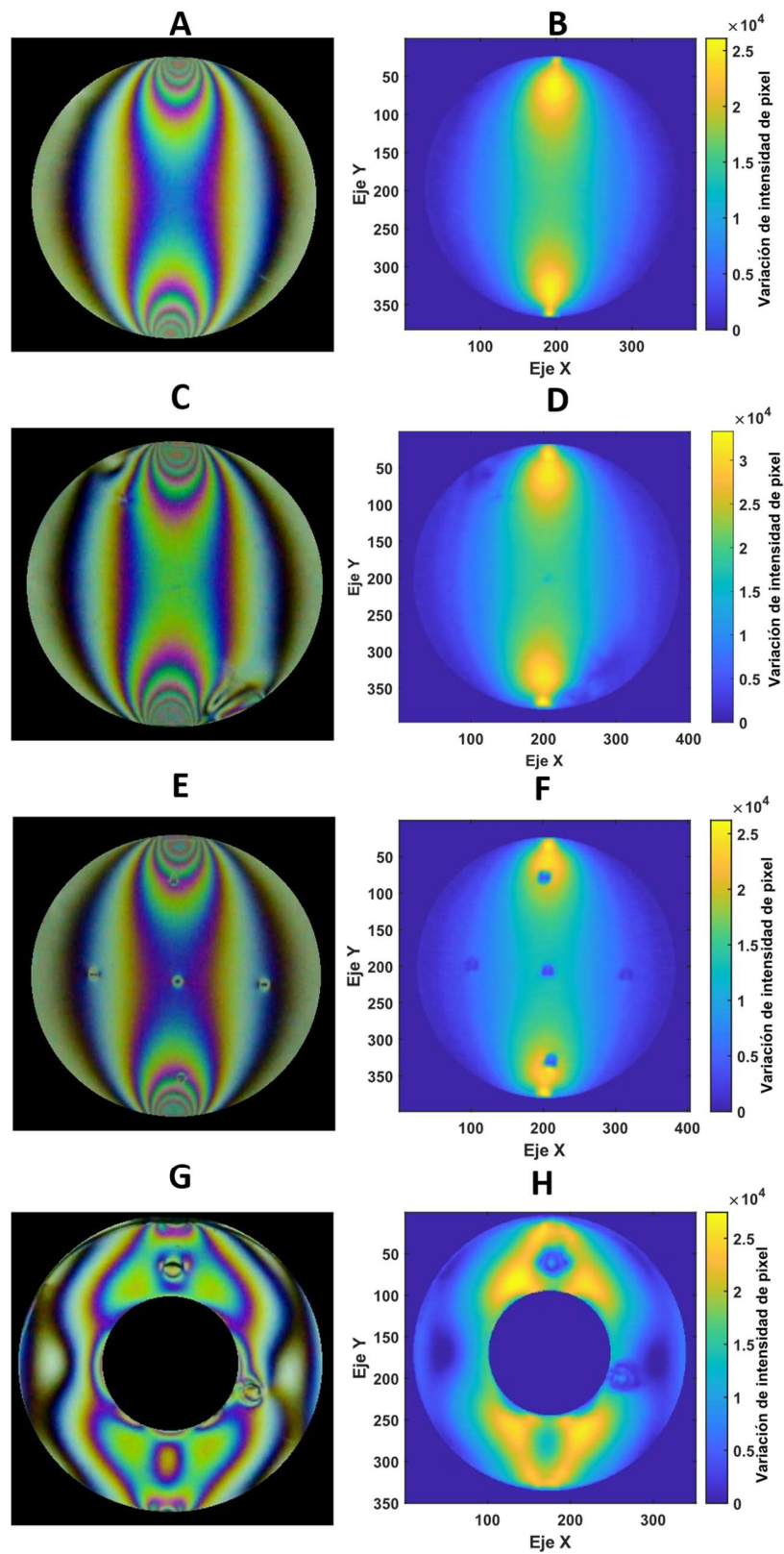
La Figura 4-48 presenta la comparación de fotogramas de fotoelasticidad y mapas de variación de intensidad de pixeles. En **(A -B)** se presenta el caso de un disco sometido a una carga 2500 Newton sin ER, el cual toma como referencia. En **(C-D)** se muestra el caso de un disco bajo una carga compresiva de 3000 Newtons con dos esfuerzos residuales de borde. En **(E-F y G-H)** se presentan un disco y un anillo bajo una carga de 2500 Newton, ambos con ER de tipo indentación en diferentes zonas de esfuerzos.

La Tabla 15 presentan los valores medios de variación de intensidad de pixel para las zonas con ER y se comparan respecto a sus referencias, las cuales fueron tomadas de posiciones aledañas a los ER. Las distancias para los ER fueron menores en todos los casos, con una variación superior al 47 %. Este resultado se asocia a un menor desplazamiento de franjas en esas ubicaciones, lo cual permite identificar la ubicación y extensión de los ER.

**Tabla 15:** Variación media de intensidad de pixel entre los ER de la Figura 4-48 y sus referencias.

Imagen	Ubicación	Variación media de intensidad de pixel	% Variación
<b>Figura 4-48 D</b>	Referencia borde superior	6560	73%
	ER borde superior	1750	
	Referencia borde inferior	7605	69%
	ER borde inferior	2389	
<b>Figura 4-48 F</b>	Referencia Altos Esfuerzos	21718	78%
	ER Altos Esfuerzo	4718	
	Referencia Medios Esfuerzos	12702	69%
	ER Medios Esfuerzos	3945	
	Referencia Bajos Esfuerzos	4702	47%
	ER Bajos Esfuerzos	2477	
<b>Figura 4-48 H</b>	Referencia Residual Superior	17541	72%
	ER Superior	4955	
	Referencia Residual Lateral	13917	78%
	ER Lateral	3113	

Figura 4-48: Fotogramas de fotoelasticidad y mapas de variación de intensidad de pixel.

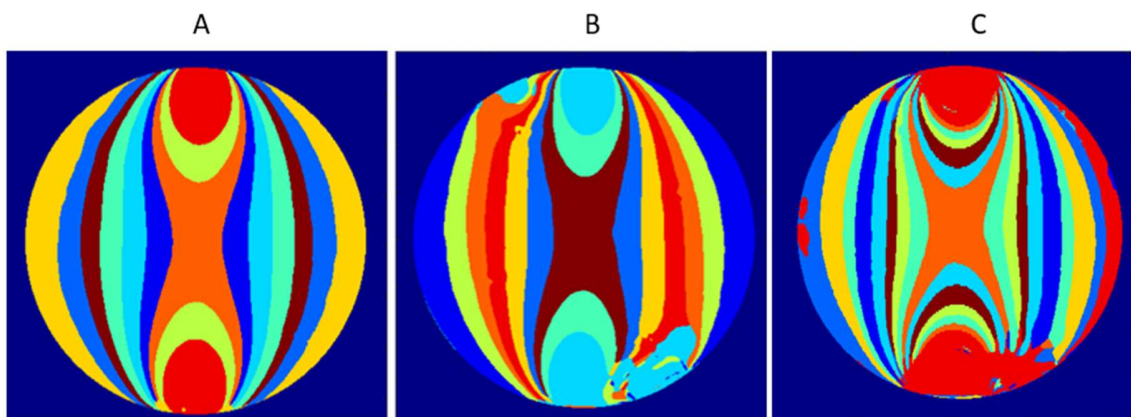


### 4.3.7 Agrupamiento no supervisado

En este apartado se analizan los resultados obtenidos por medio del agrupamiento del algoritmo de K-means en tres tipos de secuencias, aplicación de carga en una muestra sin esfuerzos residuales **(A)**, aplicación de carga en una muestra con esfuerzos residuales **(B)** y aplicación de temperatura en muestras con esfuerzos residuales **(C)**. En este agrupamiento se utilizaron nueve categorías para cada análisis, cabe resaltar que el algoritmo asigna colores aleatorios a los grupos por lo cual no son comparables entre ellos.

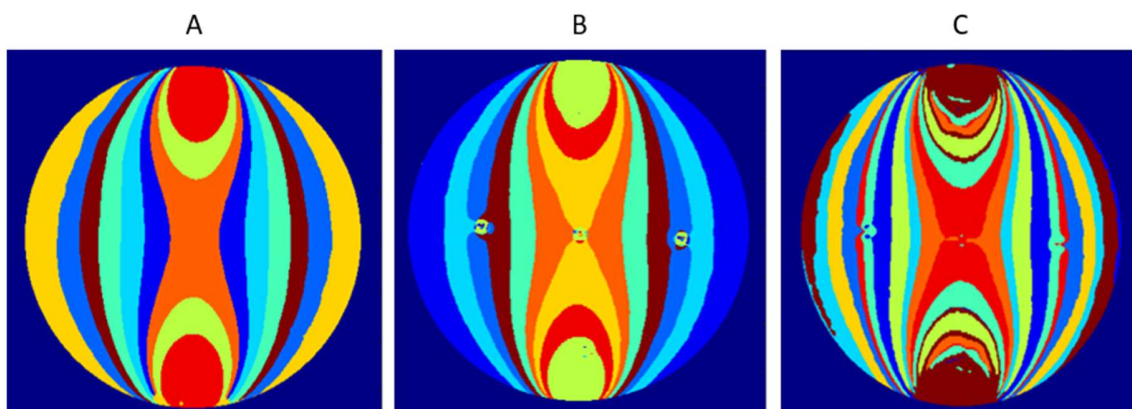
La imagen **(A)** de la Figura 4-49 muestra el agrupamiento de 9 categorías para la secuencia de una muestra bajo una carga de compresión de 3000 Newtons, en este caso se aprecia un comportamiento homogéneo y simétrico sobre la muestra, indicando una dinámica diferente entre los píxeles a medida que su ubicación se aleja de los puntos de aplicación de la fuerza. Por otro lado, la imagen **(B)** presenta discontinuidades y anomalías en las agrupaciones donde se encuentran los esfuerzos residuales. Asignando a estos al conjunto donde se encuentra la zona de contacto, es decir, donde hay un mayor cambio en la densidad de franjas. Por último, la imagen **(C)** contiene la distribución de conjuntos para una secuencia térmica. En esta se aprecia una diferente categoría para el residual de la parte superior y una reducción en el inferior. Más allá de esto, el algoritmo presenta ambigüedades en la asignación de las categorías, dando a entender que las características generadas por la aplicación térmica no son suficientes para caracterizar de forma adecuada todas las zonas de la muestra.

**Figura 4-49:** Agrupamiento por medio de K-means para un disco bajo compresión diametral. **(A)** sin esfuerzos residuales. **(B)** Con esfuerzos residuales. **(C)** Bajo estimulación térmica.



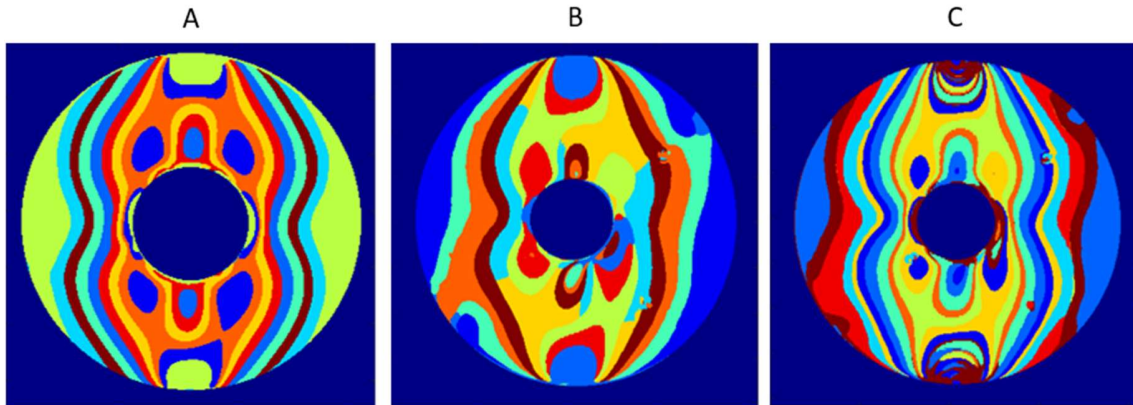
En la Figura 4-50 también se presentan 3 imágenes, siendo la imagen **(A)** la referencia del caso de aplicación de carga sin esfuerzos residuales. Mientras en la imagen **(B)** se enseña la agrupación obtenida por el algoritmo de K-means para una muestra bajo compresión y con esfuerzos residuales de tipo indentación. Los tres residuales ubicados a la altura media de la muestra tienen color verde limón, el cual fue asignado para los puntos de aplicación de carga, adicionalmente se contempla una perturbación a su alrededor modificando las categorías de toda la muestra en comparación con la imagen **(A)**. La presencia de los residuales de la zona de altos esfuerzos no es apreciable a primera vista dado que la categoría asignada corresponde con la de su vecindario. Finalmente, el corrimiento generado por la estimulación térmica no aporta suficiente información para el algoritmo de agrupamiento por lo cual aparecen ambigüedades en las categorías asignadas, como se ve en la imagen **(C)**.

**Figura 4-50:** Agrupamiento por medio de K-means para un disco bajo compresión diametral. **(A)** sin esfuerzos residuales. **(B)** Con esfuerzos residuales de indentaciones. **(C)** Bajo estimulación térmica.



En la Figura 4-51 se presenta el mismo análisis, en este caso para el modelo de un anillo bajo compresión diametral. En la imagen **(A)**, los puntos de aplicación de carga y los extremos horizontales comparten la misma categoría, lo cual pudo ser ocasionado por la modulación del color en los puntos de contacto o la falta de resolución en la zona para que el algoritmo lograra categorizar los píxeles de forma correcta. Comparando las imágenes **(A)** y **(B)** de la Figura 4-51 se hace más evidente las perturbaciones generadas en las dinámicas por los esfuerzos residuales presentes en la muestra, lo cual se traduce en perturbaciones en el campo de esfuerzos. La imagen **(C)** presenta problemas en la diferenciación de agrupamientos, sin embargo, evidencia un comportamiento más parecido con la imagen **(A)**, demostrando una recuperación en la distribución del campo de esfuerzos por medio del efecto térmico.

**Figura 4-51:** Agrupamiento por medio de K-means para un anillo bajo compresión diametral. **(A)** Sin esfuerzos residuales. **(B)** Con esfuerzos residuales de en diámetro interno. **(C)** Bajo estimulación térmica.

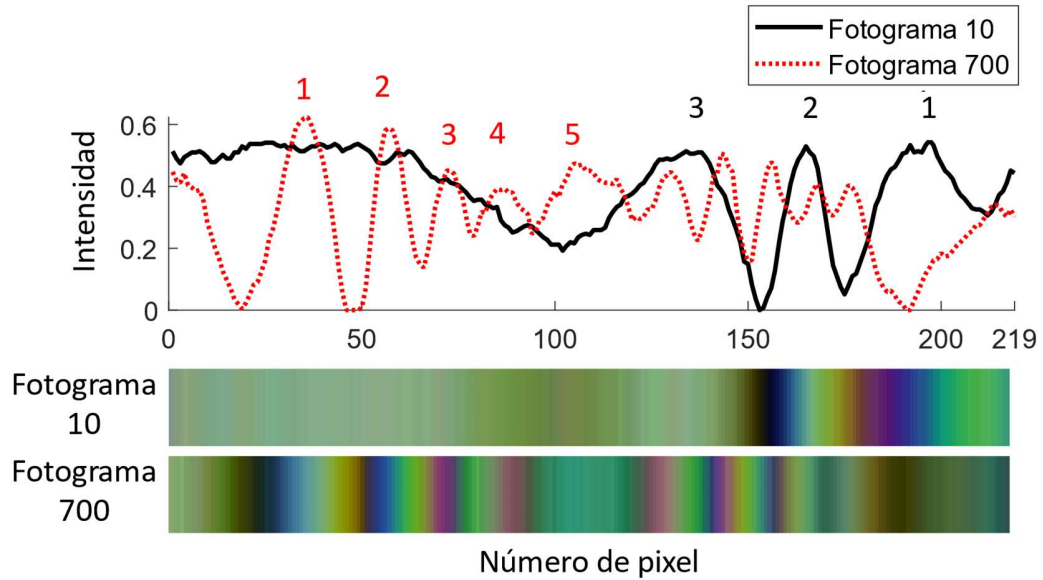


#### 4.3.8 Apilamiento temporal

En la Figura 4-52 se presenta la señal de intensidad de color para los apilamientos temporales de los fotogramas 10 y 700 asociados a la Figura 4-13 **(B)**. En las señales de intensidad para cada fotograma se resaltan los órdenes de franja en términos de las oscilaciones presentes a lo largo de la señal. El fotograma 10, representado por una línea de color negro, se asocia al inicio de la secuencia. Cuando el esfuerzo residual no ha interactuado con el nuevo campo de esfuerzos. Por esta razón, la única zona donde se observan órdenes de franja es en la ubicación del ER. Por otro lado, la línea intermitente de color rojo representa el fotograma 700 de la secuencia de aplicación de carga. En la parte superior, mostrada en zona izquierda de la Figura 4-52, se presentan 5 órdenes de franja hasta el pixel 110. Estos corresponden al esfuerzo generado por la aplicación de carga. La zona derecha corresponde a la interacción entre el ER y el nuevo campo de esfuerzos, donde las oscilaciones correspondientes a los órdenes de franja generados se encuentran en un espacio más reducido, entre el pixel 110 y el 180. Adicionalmente, presentan una disminución en su amplitud. Entre los pixeles 180 y 219 se encuentra media oscilación, resultado de la reducción de la presencia del esfuerzo residual.

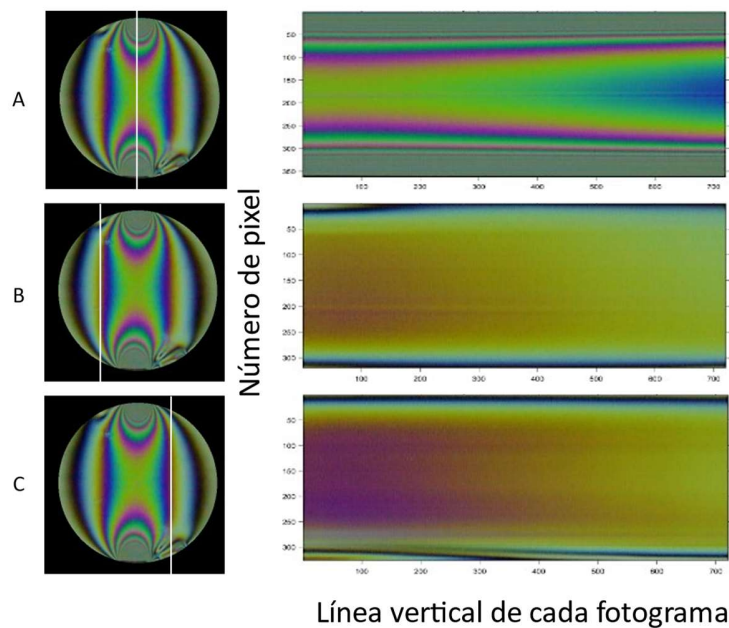


**Figura 4-52:** Visualización de número de órdenes por medio de una señal de intensidad de color. Para la **Figura 4-13 (B)** en fotografías 10 y 700 de la secuencia de aplicación de carga.



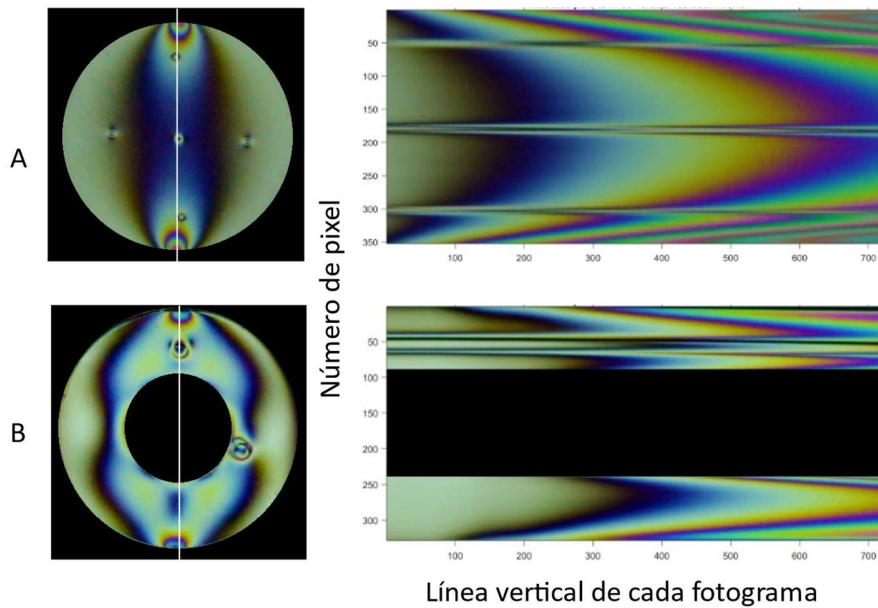
El comportamiento de los esfuerzos residuales evaluado desde el apilamiento temporal en una muestra bajo aplicación de temperatura se muestra en la Figura 4-53, donde se encontró que las zonas con presencia de esfuerzos residuales son más sensibles a los cambios de temperatura, dado que son las primeras en mostrar corrimiento de franjas debido a la estimulación térmica, adicionalmente el material busca recuperar una distribución de esfuerzos homogéneos.

**Figura 4-53:** Apilamiento temporal de líneas verticales bajo la aplicación de carga mecánica. **(A)** Línea central. **(B)** ER superior. **(C)** ER inferior.



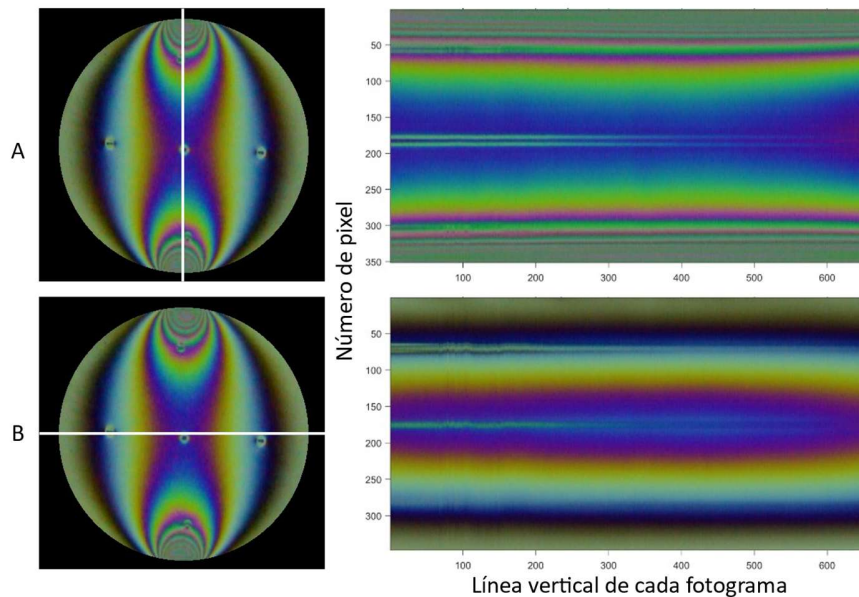
Comportamiento temporal de los esfuerzos residuales generados por indentaciones en muestras de discos y anillos como respuestas a campos de esfuerzos generados por cargas mecánicas, se presenta en la Figura 4-54. Se genera un desfase en los patrones de franjas alrededor de las indentaciones dado que estas se encuentran en un estado de esfuerzo mayor que su vecindario.

**Figura 4-54:** Comportamiento temporal de los esfuerzos residuales generados por indentaciones en muestras. **(A)** Disco. **(B)** Anillo.



El comportamiento temporal de los ER producto de indentaciones cuando son sometidas a estimulación térmica se presenta en la Figura 4-55. Allí se aprecia la recuperación del material por medio del retorno de un patrón de franjas homogéneo y sin perturbaciones. Adicionalmente, la reducción de la densidad de franjas comienza en la zona donde se encuentra el esfuerzo residual, mientras en otras zonas el cambio es casi imperceptible hasta el fotograma 600. Lo que podría indicar una mayor sensibilidad térmica en las zonas donde se encuentran los ER.

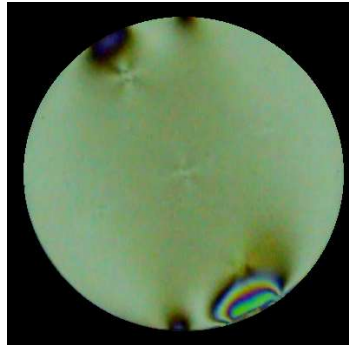
**Figura 4-55:** Comportamiento temporal de las indentaciones cuando son sometidas a cargas térmicas. **(A)** Línea vertical. **(B)** Línea horizontal.



#### 4.3.9 Recuperación del campo de esfuerzos en muestras con esfuerzos residuales

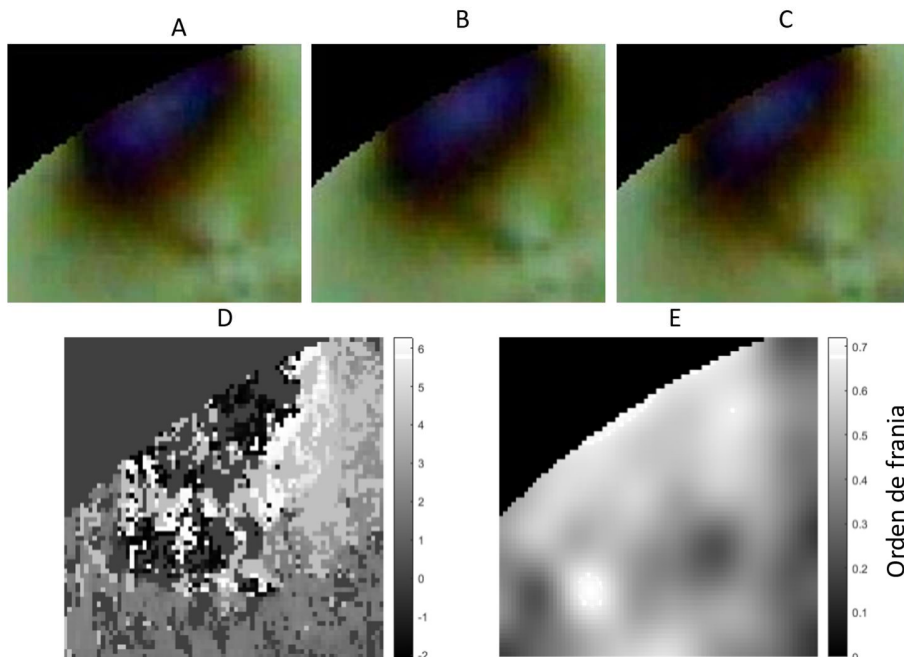
En esta sección se evaluaron los esfuerzos residuales de borde presentados anteriormente en la secuencia de la Figura 4-56. En el caso del residual ubicado en la parte superior, este no posee un patrón de franjas suficientemente definido para ser reconocido por el algoritmo por lo cual no es posible reconstruirlo de forma precisa. Como se mostró anteriormente el tamaño de los residuales disminuye a medida que la estimulación mecánica aumenta. Por lo cual, los patrones de franjas pertenecientes a los esfuerzos residuales disminuyen a medida que avanza la secuencia. Este comportamiento es similar al que ocurre con densidad de franjas cuando se aplica una estimulación térmica, por esta razón se implementó la técnica de saltos transitorios de temperatura para recuperar el campo de esfuerzos pertenecientes a estos esfuerzos residuales.

**Figura 4-56:** Esfuerzos residuales de borde en una muestra de PMMA sometida a compresión diametral.

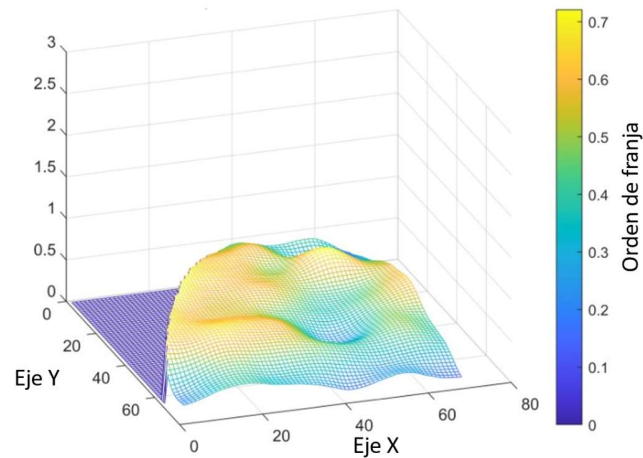


En la Figura 4-57 se presentan las imágenes utilizadas para la recuperación del campo de esfuerzos pertenecientes al esfuerzo residual ubicado en la parte superior de la muestra. Al ser este de menor tamaño y sin un patrón de franjas definido, no es posible recuperar un valor de fase, como se aprecia en la imagen **(D)**. En la Figura 4-58 se presenta la reconstrucción del campo de esfuerzos obtenida.

**Figura 4-57:** **(A)**, **(B)** y **(C)** corresponden a las imágenes **I1**, **I3** e **I5** utilizadas para el desenvolvimiento. **(D)** Mapa de fase envuelto. **(E)** Mapa de fase desenvuelto.

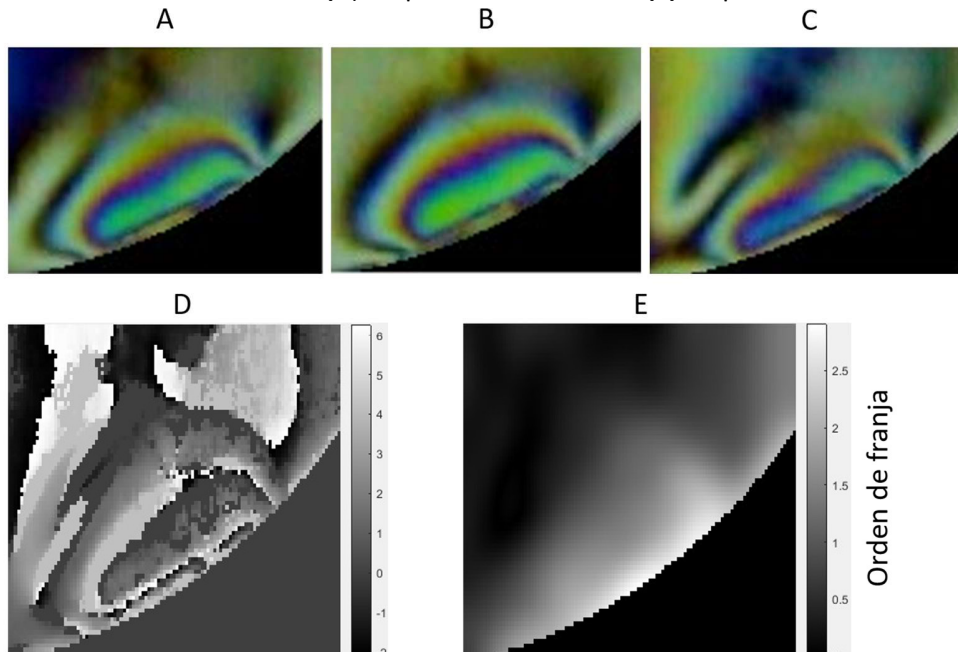


**Figura 4-58:** Reconstrucción del campo de esfuerzos generado por el esfuerzo residual superior en órdenes de franja.

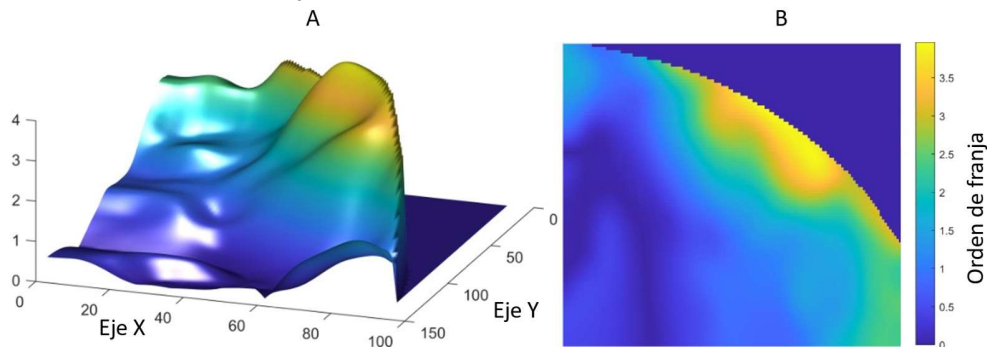


Por otro lado, el residual inferior es de mayor tamaño y cuenta con un patrón de franjas definido, el cual disminuye a medida que la carga de compresión es aplicada sobre la muestra. En la Figura 4-59 se presentan las imágenes **I1**, **I3** e **I5** utilizadas en el algoritmo de saltos transitorios de temperatura para obtener el mapa de fase envuelto **(D)** y su desenvolvimiento **(E)**. A continuación, en la Figura 4-60 se presenta la superficie de esfuerzos en ordenes de franja **(A)** y su vista superior **(B)**. La primera fue rotada para darle una mayor visualización a la distribución de esfuerzos hacia el interior de la muestra.

**Figura 4-59:** **(A)**, **(B)** y **(C)** corresponden a las imágenes **I1**, **I3** e **I5** utilizadas para el desenvolvimiento. **(D)** Mapa de fase envuelto. **(E)** Mapa de fase desenvuelto.

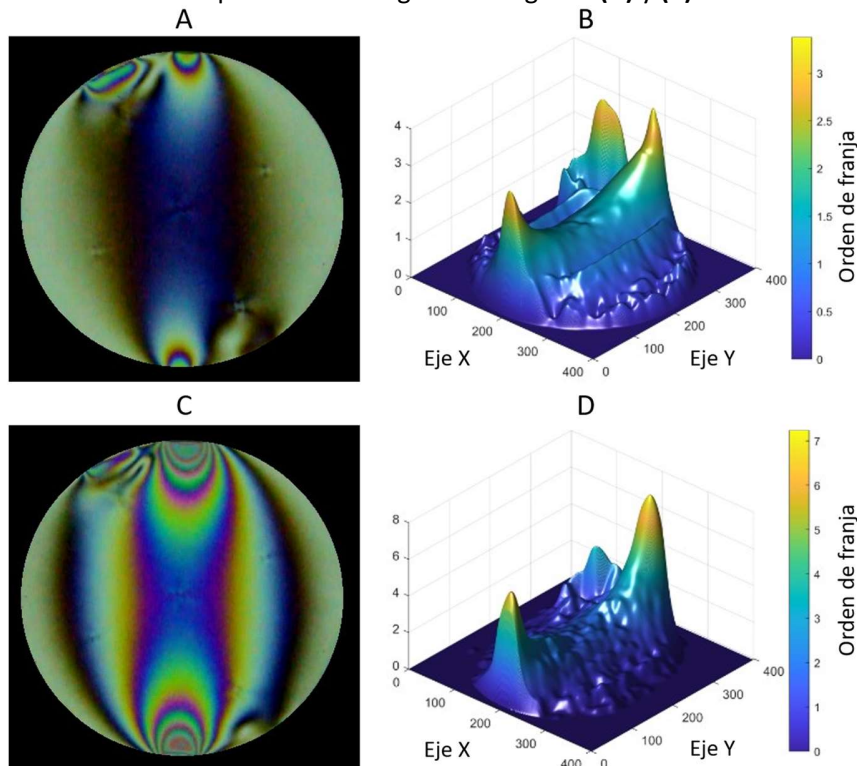


**Figura 4-60:** Campo de esfuerzos generado por el esfuerzo residual de la zona inferior en órdenes de franja.



Dado que el patrón de franja de los esfuerzos residuales de la secuencia disminuye a medida que aumenta la carga aplicada, en la Figura 4-61 se presentan dos estados de esfuerzos y sus respectivas reconstrucciones. La imagen (A) corresponde a un estado inicial en la secuencia de aplicación de carga. Por otro lado, la imagen (C) pertenece al final de la secuencia. En este caso el mayor esfuerzo se da en las zonas de contacto y tiene un orden de franja cercano a 7, mientras el orden del residual disminuye a 2. Las imágenes (A) y (C) fueron rotadas 180 ° para dar mayor claridad respecto al estado de esfuerzos encontrado.

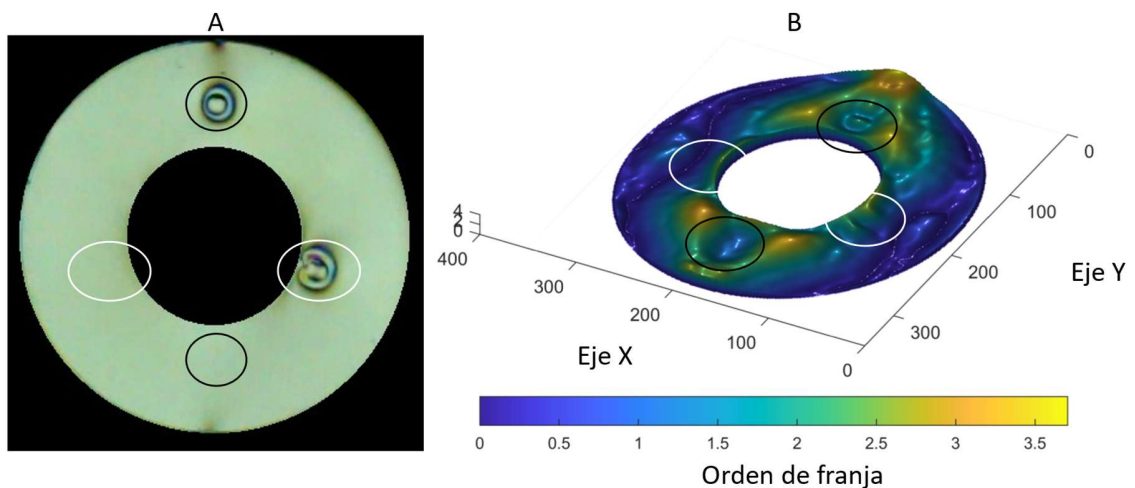
**Figura 4-61:** Reconstrucción del estado de esfuerzos del esfuerzo residual en dos etapas de la secuencia de aplicación de carga. Las imágenes (A) y (C) fueron rotadas 180 °.



### ▪ Recuperación del campo de esfuerzos generado por esfuerzos residuales por indentación

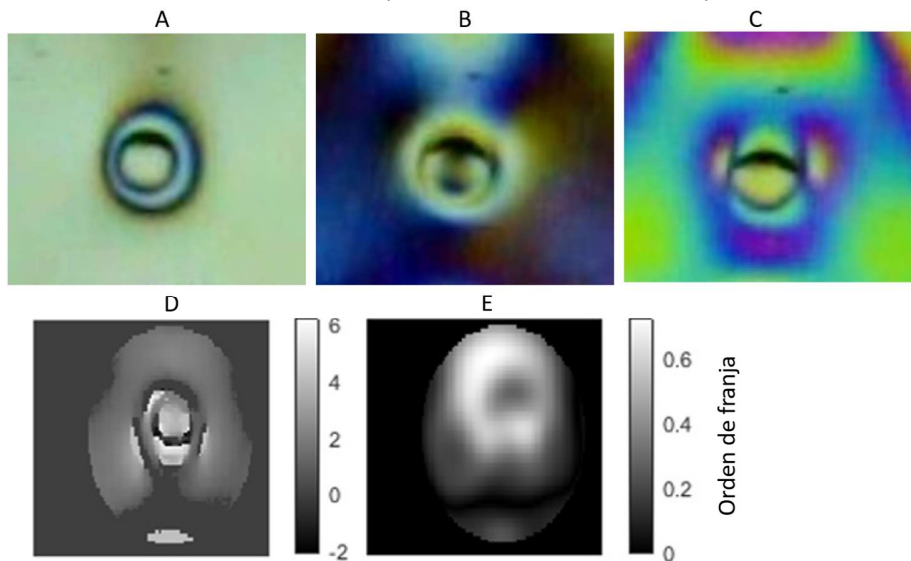
Para un caso de indentaciones, como se ve a continuación, se presenta un anillo con dos indentaciones, una en la parte superior sobre la línea de acción de la fuerza y otra en un costado en una zona de bajos esfuerzos. En Figura 4-62, imagen **(A)**, se resaltan en círculos negros las zonas donde se ubican las indentaciones, mientras que, en círculos blancos, zonas de referencia utilizadas para comparar los efectos de los esfuerzos residuales en la imagen **(B)**. Esta presenta la reconstrucción de los esfuerzos presentes en la muestra. En la parte superior donde se ubica una de las indentaciones se observa una perturbación en forma de pico, mientras en la referencia esa área es un valle, indicando un esfuerzo superior en la zona donde se encuentra el residual.

**Figura 4-62:** **(A)** Anillo bajo compresión diametral con indentaciones. **(B)** Reconstrucción del campo de esfuerzos obtenido en ordenes de franja.

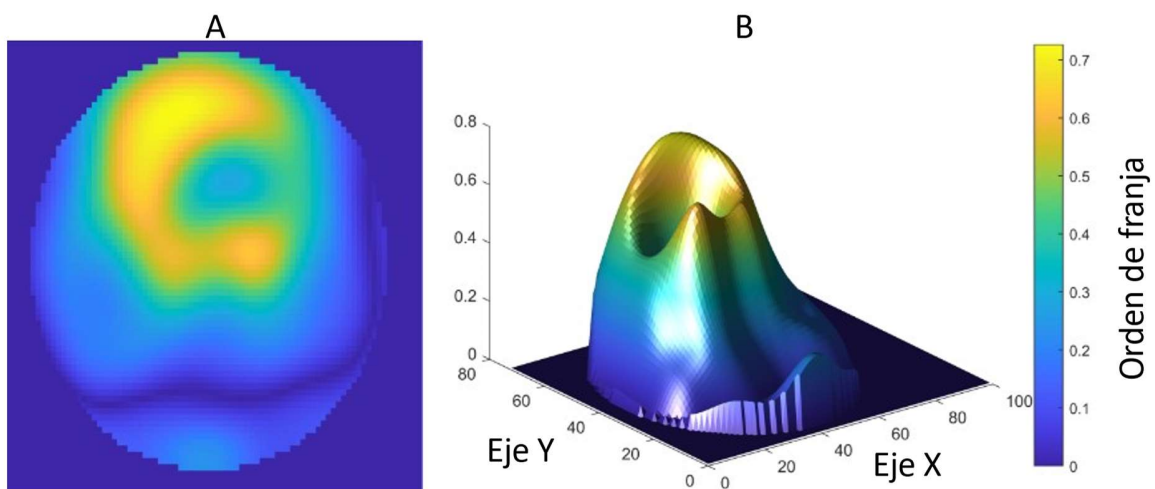


En la Figura 4-63, se realizó una extracción de la zona de interés donde se encuentra ubicado el residual de la indentación superior y se obtiene el siguiente resultado, el cual corresponde al momento antes de que el residual fuera deformado por la aparición del nuevo campo de esfuerzos, es decir, el correspondiente al círculo color cian visto en la imagen **(A)**.

**Figura 4-63:** (A), (B) y (C) corresponden a las imágenes I1, I3 e I5 utilizadas para el desenvolvimiento. (D) Mapa de fase envuelto. (E) Mapa de fase desenvuelto.



**Figura 4-64:** Superficie de esfuerzos para el ER de tipo indentación ubicado en la parte superior del anillo. (A) Vista superior. (B) Superficie de esfuerzos.





## 4.4 Discusión

Al inicio del capítulo se presentan los termogramas correspondientes a dos modelos bajo compresión, un disco y una placa con agujero en el centro. Como resultado se encontró un aumento de temperatura superior a  $10^{\circ}\text{C}$  para la zona cercana a los puntos de aplicación de carga y temperatura, mientras que la zona central de las muestras el incremento fue inferior a  $2^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, se detectó una diferencia de temperatura entre las placas de calentamiento, lo cual generó un flujo mayor de calor para una sección de la muestra. Adicionalmente, no se observó que una distribución no uniforme de esfuerzos, como es el caso de los ER, afectara la distribución de temperatura sobre la superficie de la muestra.

La aplicación de temperatura sobre muestras con presencia de ER sometidas a una carga mecánica permitió detallar desde la fotoelasticidad el fenómeno de relajación mecánica. El cual consistió en la reducción del efecto del ER sobre el campo de esfuerzos a medida que se aplicaba una carga térmica, lo cual conllevó a una redistribución de los patrones de franjas llegando a un nuevo estado de equilibrio.

La evaluación realizada por medio del apilamiento temporal bajo la aplicación de estimulación térmica, la cual se presentó en la Figura 4-56. Demostró que las zonas con ER son más sensibles al estímulo térmico, debido a la relajación presente en el material. Por esta razón se propuso una segunda evaluación de este fenómeno por medio de la técnica de termografía. En la cual se planteó la siguiente hipótesis: Una muestra con ER o una carga no uniforme sometida a una estimulación térmica presentará un calentamiento inicial en las zonas donde esté presente el ER o el mayor esfuerzo. En el experimento realizado por medio de termografía no se logró evidenciar este comportamiento. La recuperación del material podría ser una razón. Ya que esta recuperación no permite acumular energía térmica en estas zonas. En el capítulo 5.1 se presentan algunos trabajos futuros que podrían ahondar en este tema.

El cambio en la intensidad de color R, G y B durante las secuencias con aplicación de carga o temperatura obedece a señales senoidales con amplitud y periodo dentro del rango de 0 a 255. Los píxeles asociados con ER presentaron un comportamiento diferente respecto a píxeles vecinos. En los casos donde el esfuerzo residual se redujo durante la secuencia, para las señales de intensidad de color disminuyó su amplitud mientras el periodo aumentó. Para los casos donde el ER aumentó en magnitud la respuesta en amplitud tuvo el mismo comportamiento, mientras el periodo

disminuyó. Por otro lado, la presencia de los ER implicó un desfase en las señales respecto a valores de referencia tomados de su vecindario o de puntos simétricos sin esfuerzos residuales.

El algoritmo de agrupamiento no supervisado K-means se ejecutó con los valores de intensidad por canal de color para todos los píxeles de las secuencias de fotogramas. Luego de realizar una evaluación de índices de agrupamiento se encontró el número óptimo de categorías para este tipo de datos, el cual es nueve. Para secuencias de aplicación de carga el agrupamiento dado por el algoritmo correspondía con la distribución de esfuerzos y patrones de franjas. De igual forma el algoritmo encontró que el comportamiento de los píxeles con ER no corresponde con el presentado por su vecindario. Adicionalmente, identifica la zona de la muestra con la cual se agrupan los píxeles con ER.

Las evaluaciones de K-means en secuencias estimuladas térmicamente no presentaron resultados congruentes en términos de, debido a la distribución irregular de las categorías, la cual no correspondió con la distribución de esfuerzos. Esto pudo deberse al insuficiente desplazamiento en las franjas de fotoelasticidad.

Para obtener el campo de esfuerzos correspondiente a los ER primero se determinó si durante la secuencia de fotogramas la densidad de franjas en el ER aumentaba o disminuía. En el primer caso se empleó el algoritmo de CHPST, para el segundo caso se utilizó el algoritmo de TTST. Por medio de estos algoritmos fue posible reconstruir el campo de esfuerzos de las secuencias experimentales determinando la interacción entre los ER y el campo de esfuerzos. Adicionalmente, se aislaron las zonas de la muestra con presencia de ER para reconstruir su campo de esfuerzos de manera independiente.

## 5. CONCLUSIONES

En el desarrollo de esta tesis se construyó una metodología enfocada en la caracterización de los esfuerzos residuales en muestras de PMMA en casos dinámicos con cambio de cargas mecánicas y térmicas. Se detalló el proceso de fabricación de las muestras, la generación de varios tipos de esfuerzos residuales y la adquisición y posterior procesamiento de las imágenes de fotoelasticidad. La caracterización se logró por medio de varios tipos de algoritmos como, K-means, trayectorias de color y apilamiento temporal. Los cuales se basan en el cambio de los índices R, G y B de los píxeles de una secuencia de fotogramas, debido a la aplicación de cargas mecánicas o térmicas. Por medio de este tipo de algoritmos se logró identificar comportamientos característicos de regiones en la muestra, como lo son las zonas de altos, medianos y bajos esfuerzos. Por otro lado, también se identificaron regiones cuyo comportamiento era diferente al registrado en píxeles vecinos, las cuales correspondían a las zonas con presencia de esfuerzos residuales, en las cuales se observó una conducta asociada a otro nivel mayor o menor de esfuerzos, dependiendo de la ubicación y orientación de los esfuerzos residuales respecto al campo de esfuerzos asociado a una nueva carga mecánica.

Como se explicó en el capítulo 4, la densidad de franjas de fotoelasticidad en los puntos de contacto aumenta cuando se aplica una carga mecánica, debido al incremento en el esfuerzo presente en el material. Y disminuye si se aplica una carga térmica por el efecto de relajación mecánica. De forma análoga se presenta el comportamiento de los esfuerzos residuales, ya que estos pueden ser sumados o restados respecto a un nuevo campo de esfuerzos. Ambos casos fueron analizados y se presentó una propuesta de desenvolvimiento basada en el algoritmo de híbrido de saltos de carga para los casos donde el residual tenga un incremento en la densidad de franjas, es decir, tenga un comportamiento aditivo. Y el algoritmo de saltos térmicos transitorios cuando la densidad de franjas del residual disminuya, es decir, se reduzca su magnitud conforme avance la estimulación mecánica o térmica. Bajo esta propuesta se logró recuperar el campo de esfuerzos de esfuerzos

residuales de diferente origen y en varias muestras de varias geometrías. Adicionalmente, se identificaron factores que afectan el desarrollo de la propuesta y conllevan a resultados inconclusos, como lo es la insuficiente cantidad de órdenes en un esfuerzo residual, lo cual se podría deber a la magnitud del esfuerzo residual. Y la dificultad en la identificación del salto necesario entre las imágenes  $I_1$ ,  $I_3$  e  $I_5$  de los algoritmos de desenvolvimiento de fase.

La propuesta para determinar el campo de esfuerzos en muestras con esfuerzos residuales también fue empleada en la simulación del modelo analítico correspondiente a un disco bajo compresión diametral con dos esfuerzos residuales de borde. Para el cual se evaluaron dos situaciones dependiendo del comportamiento de los esfuerzos residuales, aditivo o sustractivo. Ambos resultados fueron comparados con el resultado obtenido para este modelo de forma experimental, encontrando una similitud con el caso donde los esfuerzos residuales se comportan de forma sustractiva. Este comportamiento podría deberse a la diferencia en la dirección entre el campo de esfuerzos nuevo respecto al esfuerzo residual.

El uso de la fotoelasticidad como herramienta óptica en el estudio de los esfuerzos residuales permitió observar y analizar la perturbación que estos generan sobre un campo de esfuerzos, pudiéndose considerar concentradores o reductores de esfuerzos. Por otro lado, también se evidenció como la aplicación de temperatura sobre las muestras disminuye el efecto de dicha perturbación, e incluso, en algunos casos logra remover el esfuerzo residual. Desplazando las franjas de fotoelasticidad y llevando al campo de esfuerzos a un nuevo estado de equilibrio.

## 5.1 Limitaciones y trabajos futuros

Durante este trabajo se consideraron ER de dos tipos, de borde y de indentación, en el material PMMA. Por lo que no se consideró el comportamiento de los esfuerzos residuales en otros materiales. Adicionalmente, se consideraron ER superficiales de tamaño macro, los cuales ocurren en el orden de milímetros. No se evalúan esfuerzos residuales de nivel microestructural ni atómico.

El método utilizado para desenvolver los ER presentes en diferentes zonas de la muestra demostró ser efectivo siempre y cuando el esfuerzo residual tenga un patrón de franjas definido. Para el caso del residual superior de borde, el algoritmo de desenvolvimiento no logró resolver el esfuerzo residual por la falta de definición en el patrón de franja generado. La limitación del método empleado se centra en la capacidad del algoritmo para desenvolver las zonas con esfuerzos

residuales. Una forma que podría aumentar la capacidad de evaluación de esfuerzos residuales con poca magnitud sería el desarrollo e implementación de algoritmos de desenvolvimiento con poca resolución de ordenes de franja.

A lo largo de este trabajo se estudió la evolución de los patrones de franjas generados por esfuerzos residuales en muestras de PMMA, sometidas a estimulaciones mecánicas y térmicas. Se plantea como un trabajo futuro el estudio de los esfuerzos residuales sin estimulaciones externas, es decir, la evaluación de los ER en casos estáticos. Este planteamiento permitiría estimar el valor del esfuerzo residual presente en la muestra sin modificarlo. En este caso no habría un corrimiento de franjas por estimulación externa, por lo que sería necesario utilizar otros métodos diferentes de CHLS y TTST para generar y evaluar el corrimiento de fase.

El proceso para estimular térmicamente las muestras de PMMA se dio por medio de dos placas de calentamiento, las cuales se ubicaron en los puntos de contacto entre la máquina universal y la muestra. Este tipo de calentamiento estimuló inicialmente las zonas de alta concentración de esfuerzos y posteriormente el resto de la muestra hasta llegar a un equilibrio térmico. Por esta razón, en las zonas más alejadas de los puntos de calentamiento la temperatura aumento solo un par de grados Celsius, como se evidenció en las imágenes termográficas de la sección 4.3.2. Adicionalmente, se generó un menor impacto térmico en los esfuerzos residuales ubicados en las zonas de medianos y bajos esfuerzos.

Para trabajos futuros se plantea utilizar otros métodos de calentamiento para evaluar el comportamiento de los residuales. Una estimulación térmica zonificada podría permitir estimar el valor del esfuerzo residual y establecer una relación entre la temperatura y la recuperación del material. Así mismo, identificar en qué casos es posible recuperar el material de los esfuerzos residuales y su efecto en las propiedades mecánicas finales de la muestra.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. F. Kudryavtsev, "Residual Stress," 2008, pp. 371–388. doi: 10.1007/978-0-387-30877-7\_15.
- [2] Neumann F.E., "Gesetze der Doppelbrechung des Lichts in comprimierten oder ungleichförmig erwärmten unkrystallinischen Körpern .," Berlin, Nov. 1841. [Online]. Available: <http://books.google.com>
- [3] E. Macherauch, *Introduction To Residual Stress.*, vol. 4. Pergamon Books Ltd, 1987. doi: 10.1016/b978-0-08-034062-3.50011-2.
- [4] A Niku-Lari, *Advances in surfaces treatments Vol 4. Residual Stresses*. Pergamon Books, 1987.
- [5] J. W. Seo, S. J. Kwon, C. W. Lee, D. H. Lee, and B. C. Goo, "Fatigue strength and residual stress evaluation of repair welding of bogie frame for railway vehicles," *Eng Fail Anal*, vol. 119, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104980.
- [6] S. G. Chen, Y. du Zhang, Q. Wu, H. J. Gao, and D. Y. Yan, "Residual stress relief for 2219 aluminum alloy weldments: A comparative study on three stress relief methods," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 4, Apr. 2019, doi: 10.3390/met9040419.
- [7] F. S. Ong *et al.*, "Residual stress induced failure of Ti-6Al-4V/Si3N4 joints brazed with Ag-Cu-Ti filler: The effects of brazing zone's elasto-plasticity and ceramics' intrinsic properties," *J Eur Ceram Soc*, vol. 41, no. 13, pp. 6319–6329, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.06.038.
- [8] P. Srinivasa Rao, K. Ramji, and B. Satyanarayana, "Effect of wire EDM conditions on generation of residual stresses in machining of aluminum 2014 T6 alloy," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 2, pp. 1077–1084, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.aej.2016.03.014.
- [9] D. Fabris *et al.*, "Thermal residual stresses in bilayered, trilayered and graded dental ceramics," *Ceram Int*, vol. 43, no. 4, pp. 3670–3678, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.11.209.
- [10] G. S. Schajer, *Practical residual stress measurement methods*, 1st ed. Vancouver: John Wiley & Sons, 2013. doi: 10.1002/9781118402832.

- 
- [11] B. Bhandari and R. Pant, "Thermo-Mechanical based residual stress and distortion visualization using analytical, graphical, and FEM based numerical methods," Stavanger, 2021.
- [12] W. Cheng and I. Finiie, *Residual stress measurement and the slitting method*, vol. 1. Berckley, 2013.
- [13] A. N. Kassel, "A Contribution to enlarge the application limits of residual stress analyses by the Hole-Drilling and the Ring-Core method," 2015.
- [14] G. S. Schajer, *PRACTICAL RESIDUAL STRESS MEASUREMENT METHODS Edited by*. 2013. [Online]. Available: [www.wiley.com](http://www.wiley.com).
- [15] B. A. J. M. de Mol, P. J. Overkamp, G. L. van Gaalen, and A. E. Becker, "Non-destructive assessment of 62 Dutch Björk-Shiley convexo-concave heart valves 1," 1997. [Online]. Available: <https://academic.oup.com/ejcts/article/11/4/703/350196>
- [16] "Collapse stirs memories of Ohio River tragedy," *The Blade*, 2007.
- [17] M. Jafari and M. Jafari, "Thermal stress analysis of orthotropic plate containing a rectangular hole using complex variable method," *European Journal of Mechanics, A/Solids*, vol. 73, no. August 2018, pp. 212–223, 2019, doi: 10.1016/j.euromechsol.2018.08.001.
- [18] P. Garbacz, P. Czajka, and W. Mizak, "Automation of residual stress measurement in tableware glass production," *Problemy Eksploatacji*, vol. no. 1, pp. 29–40, 2016.
- [19] H. Aben, L. Ainola, and J. Anton, "Integrated photoelasticity for nondestructive residual stress measurement in glass," *Opt Lasers Eng*, vol. 33, no. 1, pp. 49–64, 2000, doi: 10.1016/S0143-8166(00)00018-X.
- [20] A. R. Ghasemi, F. Taheri-Behrooz, and M. M. Shokrieh, *Measuring residual stresses in composite materials using the simulated hole-drilling method*. Woodhead Publishing Limited, 2014. doi: 10.1533/9780857098597.1.76.
- [21] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi, "Methods of measuring residual stresses in components," *Mater Des*, vol. 35, pp. 572–588, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.08.022.
- [22] R. G. Reid and R. Paskaramoorthy, "A novel method to measure residual stresses in unidirectional GFRP," *Compos Struct*, vol. 88, no. 3, pp. 388–393, 2009, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.04.015.
- [23] T. Kihara, "Measurement of Applied Stresses and Residual Stresses on a Residual Stress Model by Applying Two Different Loads," *Exp Mech*, vol. 51, no. 8, pp. 1275–1283, 2011, doi: 10.1007/s11340-010-9440-5.
- [24] P. A. Limon Leyva, E. Aguilera Gómez, H. Plascencia Mora, E. R. Ledesma Orozco, A. de J. Balvantín García, and J. A. Diosdado De la Peña, "Análisis de esfuerzos residuales en el proceso de engargolado utilizando el Ruido Magnético de Barkhausen," *Acta Univ*, vol. 28, no. 1, pp. 57–63, 2018, doi: 10.15174/au.2018.1627.

- [25] M. E. Turan, F. Aydin, Y. Sun, and M. Cetin, "Residual stress measurement by strain gauge and X-ray diffraction method in different shaped rails," *Eng Fail Anal*, vol. 96, no. October 2018, pp. 525–529, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.016.
- [26] K. Ramesh and S. Sasikumar, "Digital photoelasticity: Recent developments and diverse applications," *Opt Lasers Eng*, vol. 135, no. February, p. 106186, 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106186.
- [27] B. R. Mose, D. K. Shin, and J. H. Nam, "Development of an Experimental System to Measure Stresses in a Bearing Using Photo-elasticity," *Exp Mech*, vol. 58, no. 3, pp. 437–447, Mar. 2018, doi: 10.1007/s11340-017-0361-4.
- [28] H. Aben and A. Errapart, *Integrated photoelasticity for residual stress measurement in glass articles of complicated shape*, vol. 33. 2002.
- [29] H. Aben, J. Anton, and A. Errapart, "Modern photoelasticity for residual stress measurement in glass," *Strain*, vol. 44, no. 1, pp. 40–48, 2008, doi: 10.1111/j.1475-1305.2008.00422.x.
- [30] K. Ramesh and V. Ramakrishnan, "Digital photoelasticity of glass: A comprehensive review," *Opt Lasers Eng*, vol. 87, pp. 59–74, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.03.017.
- [31] M. T. Acevedo-Morantes, M. Brieva-Sarmiento, and A. Realpe-Jiménez, "Efecto de la temperatura de moldeo y tiempo de enfriamiento sobre los esfuerzos residuales del poliestireno cristal," *DYNA (Colombia)*, vol. 81, no. 187, pp. 73–80, 2014, doi: 10.15446/dyna.v81n187.40142.
- [32] H. Fandiño Toro, J. Briñez De León, A. Restrepo Martinez, and J. W. Branch Bedoya, "Fringe patterns recognition in digital photoelasticity images using texture features and multispectral wavelength analysis," *Optical Engineering*, vol. 57, no. 09, p. 1, 2018, doi: 10.1117/1.oe.57.9.093105.
- [33] J. C. Briñez de León, H. A. Fandiño Toro, A. Restrepo-Martínez, and J. W. Branch Bedoya, "Computational analysis of stress map variations by industrial light sources and load additions in digital photoelasticity," no. September 2018, p. 16, 2018, doi: 10.1117/12.2319875.
- [34] H. Fandiño Toro, J. C. Briñez de León, A. Restrepo Martínez, and J. W. Branch Bedoya, "Texture analysis integrated to infrared light sources for identifying high fringe concentrations in digital photoelasticity," no. September 2017, p. 85, 2017, doi: 10.1117/12.2273258.
- [35] J. Briñez, A. R. Mart, and W. John, "Análisis de resolución en imágenes de fotoelasticidad: caso carga dinámica," *Visión electrónica*, vol. 11, no. 1, pp. 69–75, 2017.
- [36] J. Briñez, A. R. Mart, and W. John, "Análisis del campo de esfuerzos utilizando fotoelasticidad visible e infrarroja activa," *Visión electrónica*, vol. 11, no. 1, pp. 89–98, 2017.



- 
- [37] J. W. Branch, J. C. Briñez, A. Hermes, and A. Restrepo, "Evaluación de La Pérdida de Resolución en Imágenes de Fotoelasticidad Debido al Incremento de la Carga," *VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica y IV de Materiales, Energía y Medioambiente, At Medellín, Colombia*, no. May, 2017.
- [38] Hermes. Fandiño Toro, J. Rendón Arango, J. C. Briñez de Leon, and A. Restrepo Martinez, "Thermal transient stepping : a powerful thermal-based approach for evaluating the stress field by using digital photoelasticity," in *SPIE*, 2020, vol. 14, no. 4, p. 11.
- [39] J. C. Briñez, A. Restrepo Martínez, and J. W. Branch, "Computational hybrid phase shifting technique applied to digital photoelasticity," *Optik (Stuttg)*, vol. 157, pp. 287–297, 2018, doi: 10.1016/j.ijleo.2017.11.060.
- [40] J. Rendón Arango, H. A. Fandiño Toro, J. Briñez de León, and A. Restrepo Martínez, "A dynamic characterization of thermal stimulation for residual stresses using digital photoelasticity," vol. 1184105, no. August, p. 4, 2021, doi: 10.1117/12.2594518.
- [41] R. C. Hibbeler, *Mecánica de Materiales*, 8th ed. México: Prentice Hal, 2011.
- [42] Byeon, "Measurement of Stress and Displacement Fields in Particle Assembly subjected to Shallow Foundation Loading via Photoelasticity Technique," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 33, no. 5, p. 1947, 2013, doi: 10.12652/ksce.2013.33.5.1947.
- [43] J. Rezaeepazhand and M. Jafari, "Stress concentration in metallic plates with special shaped cutout," *Int J Mech Sci*, vol. 52, no. 1, pp. 96–102, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.10.013.
- [44] M. Pástor, P. Frankovský, M. Hagara, and P. Lengvarský, "The use of optical methods in the analysis of the areas with stress concentration," *Strojnický Casopis*, vol. 68, no. 2, pp. 61–76, 2018, doi: 10.2478/scjme-2018-0018.
- [45] S. Shahzad and J. Niiranen, "Analytical Solutions and Stress Concentration Factors for Annuli With Inhomogeneous Boundary Conditions," *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, vol. 85, no. 7, pp. 1–14, 2018, doi: 10.1115/1.4040079.
- [46] E. A. Patterson, "Digital photoelasticity: Principles, practice and potential," *Strain*, vol. 38, no. 1, pp. 27–39, 2002, doi: 10.1046/j.0039-2103.2002.00004.x.
- [47] M. Subramanyam Reddy and K. Ramesh, "Study of Photoplastic Behaviour of Polycarbonate using Digital Image Correlation," *Exp Mech*, vol. 58, no. 6, pp. 983–995, 2018, doi: 10.1007/s11340-018-0399-y.
- [48] K. Banerjee, "Theory of Photo-Elasticity." p. 48, 1927.
- [49] T. H. Baek, "Separation of Isochromatics and Isoclinics from Photoelastic," *KSME international journal*, vol. 16, no. 2, pp. 175–181, 2002.
- [50] K. Ramesh and V. Ganapathy, "Phase-shifting methodologies in photoelastic analysis - The application of Jones calculus," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 31, no. 6, pp. 423–432, 1996, doi: 10.1243/03093247V316423.
- [51] J. Carlos Briñez de León, A. Restrepo Martínez, and F. López Giraldo, "Estudios de fotoelasticidad: desarrollos y aplicaciones," vol. 9, pp. 27–36, 1900.

- [52] K. Ramesh, T. Kasimayan, and B. Neethi Simon, "Digital photoelasticity - A comprehensive review," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 46, no. 4, pp. 245–266, 2011, doi: 10.1177/0309324711401501.
- [53] F. W. Hecker and B. Morche, "Computer-aided measurement of relative retardations in plane photoelasticity," pp. 535–542, 1986.
- [54] S. Barone and E. A. Patterson, "Full-field separation of principal stresses by combined thermo- and photoelasticity," *Exp Mech*, vol. 36, no. 4, pp. 318–324, 1996, doi: 10.1007/BF02328573.
- [55] E. Guo, Y. Liu, Y. Han, D. Arola, and D. Zhang, "Full-field stress determination in photoelasticity with phase shifting technique," *Meas Sci Technol*, vol. 29, no. 4, 2018, doi: 10.1088/1361-6501/aaa7ae.
- [56] Juan. Carlos. Briñez de León, "Evaluación del campo de esfuerzos mediante el análisis, descripción y clasificación de la dinámica temporal de secuencias de imágenes de fotoelasticidad," Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [57] H. Alexander Fandiño Toro and A. W. Restrepo Martínez John Branch Bedoya, "Análisis orientado hacia la inspección visual basado en fotoelasticidad y termografía infrarroja," 2021.
- [58] A. Vivekanandan and K. Ramesh, "Study of Crack Interaction Effects Under Thermal Loading by Digital Photoelasticity and Finite Elements," *Exp Mech*, vol. 60, no. 3, pp. 295–316, Mar. 2020, doi: 10.1007/s11340-019-00561-9.
- [59] D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," 1994.
- [60] I. Kozera, V. Konopińska-Zmysłowska, and M. Kujawa, "Stress analysis of a strip under tension with a circular hole," *AIP Conf Proc*, vol. 2077, no. February, 2019, doi: 10.1063/1.5091889.
- [61] M. J. Ekman and A. D. Nurse, "Absolute determination of the isochromatic parameter by load-stepping photoelasticity," *Exp Mech*, vol. 38, no. 3, pp. 189–195, 1998, doi: 10.1007/BF02325742.
- [62] S. Fernández, "Data acquisition techniques in photoelasticity," *Exp Tech*, vol. 35, no. 6, pp. 71–79, 2011, doi: 10.1111/j.1747-1567.2010.00669.x.
- [63] K. Ramesh and K. Shins, "Stress field equations for a disk subjected to self-equilibrated arbitrary loads: revisited," *Granul Matter*, vol. 24, no. 2, May 2022, doi: 10.1007/s10035-021-01205-3.
- [64] A. T. Procopio, A. Zavaliangos, and J. C. Cunningham, "Analysis of the diametrical compression test and the applicability to plastically deforming materials," *J Mater Sci*, vol. 38, no. 17, pp. 3629–3639, Sep. 2003, doi: 10.1023/A:1025681432260.
- [65] I. Kozera, V. Konopińska-Zmysłowska, and M. Kujawa, "Stress analysis of a strip under tension with a circular hole," in *AIP Conference Proceedings*, Feb. 2019, vol. 2077. doi: 10.1063/1.5091889.

- 
- [66] S. A. Linge Johnsen, J. Bollmann, H. W. Lee, and Y. Zhou, "Accurate representation of interference colours (Michel-Lévy chart): from rendering to image colour correction," *J Microsc*, vol. 269, no. 3, pp. 321–337, Mar. 2018, doi: 10.1111/jmi.12641.
- [67] B. E. Sørensen, "A revised Michel-Lévy interference colour chart based on first-principles calculations," *European Journal of Mineralogy*, vol. 25, no. 1, pp. 5–10, Feb. 2013, doi: 10.1127/0935-1221/2013/0025-2252.
- [68] I. M. Kalogerias and H. E. Lobland, "The nature of the glassy state: Structure and glass transitions," *Article in Journal of Materials Education*, vol. 34, pp. 69–73, 2012, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/230766846>
- [69] U. Ali, K. J. B. A. Karim, and N. A. Buang, "A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA)," *Polymer Reviews*, vol. 55, no. 4, pp. 678–705, 2015, doi: 10.1080/15583724.2015.1031377.
- [70] Y. Yan, P. Zhou, H. Wang, and Y. Mao, "Thermal Effect on Poly(methyl methacrylate) (PMMA) Material Removal in the Micromilling Process," pp. 13–15, 2020.
- [71] D. J. Guerrero-Miguel, M. I. Álvarez-Fernández, C. C. García-Fernández, C. González-Nicieza, and C. Menéndez-Fernández, "Analytical and numerical stress field solutions in the Brazilian Test subjected to radial load distributions and their stress effects at the centre of the disk," *J Eng Math*, vol. 116, no. 1, pp. 29–48, 2019, doi: 10.1007/s10665-019-10001-1.
- [72] W. C. Zhu and C. A. Tang, "Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, no. 2, pp. 236–252, 2006, doi: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.008.
- [73] D. Li, L. Ngai, and Y. Wong, "The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications : Review and New Insights," *Springer-Verlag*, no. May 2014, 2012, doi: 10.1007/s00603-012-0257-7.
- [74] S. Barone and E. A. Patterson, "Development of simultaneous thermo- and photo-elasticity for principal stress analyses," *Strain*, vol. 35, no. 2, pp. 57–65, 1999, doi: 10.1111/j.1475-1305.1999.tb01127.x.
- [75] O. K. Mahabadi, G. Grasselli, and A. Munjiza, "Numerical modelling of a Brazilian Disc test of layered rocks using the combined finite-discrete element method," 2009. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/260478615>
- [76] Y. Yu, J. Zhang, and J. Zhang, "A modified Brazilian disk tension test," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 46, no. 2, pp. 421–425, 2009, doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.04.008.
- [77] Y. Li, Z. Chen, Y. Ye, and Y. Yang, "Combined finite-discrete element method for modeling the interaction between single PDC cutter and brittle rock," *J Pet Sci Eng*, vol. 207, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.petrol.2021.109133.
- [78] T. Lukas, G. G. Schiava D'Albano, and A. Munjiza, "Space decomposition based parallelization solutions for the combined finite-discrete element method in 2D," *Journal*

- of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 607–615, 2014, doi: 10.1016/j.jrmge.2014.10.001.
- [79] S. Dong, Y. Wang, and Y. Xia, “A finite element analysis for using Brazilian disk in split Hopkinson pressure bar to investigate dynamic fracture behavior of brittle polymer materials,” *Polym Test*, vol. 25, no. 7, pp. 943–952, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.polymertesting.2006.06.003.
- [80] J. C. Urango Pérez, G. Carmen Motta, J. C. Briñez de León, and A. Restrepo Martínez, “Validación del uso de fotoelasticidad como herramienta para los cursos de Mecánica de Sólidos,” *Revista EIA*, vol. 14, no. 28, p. 117, 2018, doi: 10.24050/reia.v14i28.1145.
- [81] V. N. Dubey and G. S. Grewal, “Noise removal in three-fringe photoelasticity by median filtering,” *Opt Lasers Eng*, vol. 47, no. 11, pp. 1226–1230, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.05.015.
- [82] S. Kale and K. Ramesh, “Advancing front scanning approach for three-fringe photoelasticity,” *Opt Lasers Eng*, vol. 51, no. 5, pp. 592–599, May 2013, doi: 10.1016/j.optlaseng.2012.12.013.
- [83] K. Ramesh and A. Pandey, “An improved normalization technique for white light photoelasticity,” *Opt Lasers Eng*, vol. 109, pp. 7–16, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.optlaseng.2018.05.004.
- [84] J. W. Hobbs, R. J. Greene, and E. A. Patterson, “A Novel Instrument for Transient Photoelasticity,” 2003.
- [85] Z. Ren, H. Xie, and Y. Ju, “Quantification of photoelastic fringe orders using polarized light camera and continuous loading,” *Opt Lasers Eng*, vol. 134, no. May, p. 106263, 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106263.
- [86] K. Ramesh, V. Ramakrishnan, and C. Ramya, “New initiatives in single-colour image-based fringe order estimation in digital photoelasticity,” *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 50, no. 7, pp. 488–504, 2015, doi: 10.1177/0309324715600044.
- [87] L. Wu, X. Zhang, H. Chen, D. Wang, and J. Deng, “VP-NIQE: An opinion-unaware visual perception natural image quality evaluator,” *Neurocomputing*, vol. 463, pp. 17–28, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.neucom.2021.08.048.
- [88] B. Indian Institute of Technology, IEEE Communications Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, “Blind image quality evaluation using perception based features,” 2015.
- [89] A. Mittal, R. Soundararajan, and A. C. Bovik, “Making a ‘Completely Blind’ Image Quality Analyzer,” 2012. [Online]. Available: <http://live.ece.utexas.edu/research/quality/niqe>
- [90] Sandra Cabello, “Relajación de esfuerzos: definición, mecanismos de actuación y modelos matemáticos aplicables,” *Revista ingeniería UC*, vol. 21, no. 1, pp. 16–22, 2014.
- [91] Y. Sanichiro and S. Tomohiro, “Opto-Acoustic Technique for Residual Stress Analysis,” *Intech*, vol. i, no. tourism, p. 13, 2019.

- 
- [92] "Process Induced Residual Stress in Thermoset Polymer with Metallic Insert," no. June, 2014.
- [93] P. Schmidt, M. Wessén, M. Lundberg, Z. Dioszegi, E. Persson, and A. Marberg, "Measurement and simulation of residual stresses in grey cast iron as a function of shake-out temperature," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 33, no. 2–3, pp. 112–119, 2020, doi: 10.1080/13640461.2020.1766279.
- [94] G. S. Schajer, *Practical Residual Stress Measurement Methods*. 2013. doi: 10.1002/9781118402832.
- [95] F. ShukhratNumanovich and K. Yunusali Yuldashalievich, "ENSURE THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER OF PARTS IN HIGH-SPEED END MILLING OF HARDENED STEELS," 2022.
- [96] S. Prabhakaran, A. Kulkarni, G. Vasanth, S. Kalainathan, P. Shukla, and V. K. Vasudevan, "Laser shock peening without coating induced residual stress distribution, wettability characteristics and enhanced pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel," *Appl Surf Sci*, vol. 428, pp. 17–30, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.09.138.
- [97] R. Stress and F. Strength, "Residual Stresses and Fracture Mechanics," *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*, pp. 153–164, 2007, doi: 10.1007/978-0-387-39030-7\_10.
- [98] B. Zhang, "Residual Stress Measurement of an Interference Fit Specimen Based on Moiré Interferometry and Hole-Drilling Method," *Optics*, vol. 4, no. 3, p. 1, 2015, doi: 10.11648/j.optics.s.2015040301.11.
- [99] M. M. Shokrieh, *Residual Stresses in composite materials*. 2014. doi: 10.1533/9780857098597.
- [100] W. Cheng and I. Finnie, *Residual stress measurement and the slitting method*. 2007.
- [101] H. Waki, K. Ogura, and I. Nishikawa, "Residual stress measurement of plasma-sprayed coating," *Japan society of mechanicals engineers*, vol. 46, pp. 590–597, 2003.
- [102] C. S. Vikram, M. J. Pechersky, C. Feng, and D. Engelhaupt, "Residual-stress analysis by local laser heating and speckle-correlation interferometry," *Exp Tech*, vol. 20, no. 6, pp. 27–30, 1996, doi: 10.1111/j.1747-1567.1996.tb00476.x.
- [103] M. B. Prime, "Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut," *J Eng Mater Technol*, vol. 123, no. 2, pp. 162–168, 2001, doi: 10.1115/1.1345526.
- [104] M. B. Prime, "The two-way relationship between residual stress and fatigue/fracture," in *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2018, vol. 7, pp. 19–23. doi: 10.1007/978-3-319-62831-8\_4.
- [105] W. Wong and M. R. Hill, "Superposition and Destructive Residual Stress Measurements," *Exp Mech*, vol. 53, no. 3, pp. 339–344, Mar. 2013, doi: 10.1007/s11340-012-9636-y.
- [106] F. Maaß, M. Hahn, and A. E. Tekkaya, "Adjusting residual stresses by flexible stress superposition in incremental sheet metal forming," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 91, no. 8, pp. 3489–3499, Aug. 2021, doi: 10.1007/s00419-021-01929-x.

- [107] P. Pagliaro *et al.*, "Measuring Inaccessible Residual Stresses Using Multiple Methods and Superposition," *Exp Mech*, vol. 51, no. 7, pp. 1123–1134, Sep. 2011, doi: 10.1007/s11340-010-9424-5.
- [108] J. F. Cardenas-Garcia, "Photoelastic inverse problem solution for a biaxially loaded infinite plate with a hole," *Strain*, vol. 171, no. 5, pp. 131–138, 1999.
- [109] J. G. Suh, "A Study of the Development of the Stress Optic Law of Photoelastic Experiment Considering Residual Stress," 2003.
- [110] D. D. Karov and A. E. Puro, "Integrated photoelasticity of residual stresses in axysymmetric grin optical structures," *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018*, pp. 194–198, 2018, doi: 10.1109/EExPolytech.2018.8564365.
- [111] M. Clarin, "High strength steel: local buckling and residual stresses," *Environmental Engineering*, 2004, [Online]. Available: <http://epubl.luth.se/1402-1757/2004/54/LTU-LIC-0454-SE.pdf>
- [112] M. Zhang, Z. Liu, J. Deng, M. Yang, Q. Dai, and T. Zhang, "Optimum design of compressive residual stress field caused by ultrasonic surface rolling with a mathematical model," *Appl Math Model*, vol. 76, no. 100, pp. 800–831, 2019, doi: 10.1016/j.apm.2019.07.009.
- [113] M. A. W. Quach, M. A. W. Quach, S. A. Faghidian, C. Jambrino-maldonado, A. Powl, and M. Skitmore, "Residual stresses in steel members: a review of available analytical expressions," *International Journal of Structural Integrity*, vol. 7, no. 1, pp. 70–40, 2016.
- [114] European Convention For Constructional Steelwork, "Manual on Stability of Steel Structures," 22, p. 328, 1976.
- [115] I. Transactions, I. Informatics, and E. Personal, "Application of Digital Holography for Nondestructive Testing and Metrology : A Review," vol. 3203, no. c, 2015, doi: 10.1109/TII.2015.2482900.
- [116] A. Beléndez, "Holografía: Ciencia, arte y tecnología," *Revista Brasileira de Ensino de Fisica*, vol. 31, no. 1, pp. 1–16, 2009, doi: 10.1590/S1806-11172009000100011.
- [117] I. Alekseenko *et al.*, "Residual Stress Evaluation in Ceramic Coating under Industrial Conditions by Digital Holography," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 16, no. 2, pp. 1102–1110, Feb. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2939972.
- [118] G. Pedrini *et al.*, "Residual Stress Analysis of Ceramic Coating by Laser Ablation and Digital Holography," *Exp Mech*, vol. 56, no. 5, pp. 683–701, Jun. 2016, doi: 10.1007/s11340-015-0120-3.
- [119] F. Wang, Y. ping Zhang, H. Wang, W. Xu, Y. an Zhang, and C. guang Li, "Nondestructive evaluation of residual stress via digital holographic photoelasticity," *Journal of Optics (India)*, vol. 47, no. 4, pp. 547–552, Dec. 2018, doi: 10.1007/s12596-018-0475-9.
- [120] T. Siebert, E. Hack, G. Lampeas, E. A. Patterson, and K. Splitthof, "Uncertainty Quantification for DIC Displacement Measurements in Industrial Environments".

- 
- [121] J. G. Zhu, H. M. Xie, Y. J. Li, Z. X. Hu, Q. Luo, and C. Z. Gu, "Interfacial Residual Stress Analysis of Thermal Spray Coatings by Miniature Ring-Core Cutting Combined with DIC Method," *Exp Mech*, vol. 54, no. 2, pp. 127–136, Feb. 2014, doi: 10.1007/s11340-012-9640-2.
- [122] G. S. Schajer, B. Winiarski, and P. J. Withers, "Hole-Drilling Residual Stress Measurement with Artifact Correction Using Full-Field DIC," *Exp Mech*, vol. 53, no. 2, pp. 255–265, Feb. 2013, doi: 10.1007/s11340-012-9626-0.
- [123] M. Babaeian and M. Mohammadimehr, "Investigation of the time elapsed effect on residual stress measurement in a composite plate by DIC method," *Opt Lasers Eng*, vol. 128, May 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106002.
- [124] C. Macías, O. Meza, and E. Pérez, "Relaxation of residual stresses in plastic cover lenses with applications in the injection molding process," *Eng Fail Anal*, vol. 57, pp. 490–498, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.026.
- [125] A. Adhikari, T. Bourgade, and A. Asundi, "Residual stress measurement for injection molded components," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 6, no. 4. Elsevier Ltd, pp. 152–156, Jul. 01, 2016. doi: 10.1016/j.taml.2016.04.004.
- [126] Hong J.S, Park R.S, and Lyu M.Y, "Measurement of residual stress using photoelasticity and computer simulation of optical characteristics in a transparent injection molded article," *Polymer (Korea)*, vol. 35, no. 1, pp. 1–6, 2010.
- [127] S. Wei, Y. X. Jing, M. Cui, and G. Long, "The study on residual stress testing of humidity effect and distribution law for PMMA," in *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 631–632, pp. 358–361. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.358.
- [128] R. K. Miti'al and V. Rashmi, "The Effect of Thermal History on the Distribution of Residual Stresses in PMMA Rods," *J Appl Polym Sci*, vol. 34, pp. 627–638, 1987.
- [129] Y. Manjit, A. Limpichaipanit, and A. Ngamjarrojana, "Mechanical analysis of square shaped PMMA using reflection photoelasticity," *Optik (Stuttg)*, vol. 240, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.166943.
- [130] L. Montalto, D. Rinaldi, L. Scalise, N. Paone, and F. Davì, "Photoelastic sphenoscopic analysis of crystals," *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.1063/1.4940196.
- [131] T. Kihara, "A study of stress analysis for a residual stress model by digital photoelasticity," in *Applied Mechanics and Materials*, 2008, vol. 13–14, pp. 59–64. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.13-14.59.
- [132] J. E. Thatcher, D. A. Crump, C. Devivier, P. B. S. Bailey, and J. M. Dulieu-Barton, "Low cost infrared thermography for automated crack monitoring in fatigue testing," *Opt Lasers Eng*, vol. 126, no. August 2019, p. 105914, 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.105914.
- [133] E. Robin, J. B. le Cam, X. Balandraud, E. Toussaint, and L. Brilland, "First steps towards the thermomechanical characterization of chalcogenide glass using quantitative infrared

- thermography," *J Non Cryst Solids*, vol. 391, pp. 101–105, 2014, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2014.03.015.
- [134] W. C. Wang and Y. H. Tsai, "Digital dynamic photoelastic and numerical stress analyses of a strip," *JVC/Journal of Vibration and Control*, vol. 12, no. 8, pp. 927–938, Aug. 2006, doi: 10.1177/1077546306067931.
- [135] J. W. McCauley, E. Strassburger, P. Patel, B. Paliwal, and K. T. Ramesh, "Experimental Observations on Dynamic Response of Selected Transparent Armor Materials," *Exp Mech*, vol. 53, no. 1, pp. 3–29, Jan. 2013, doi: 10.1007/s11340-012-9658-5.
- [136] J. A. Pino, J. B. de León, and H. F. Toro, "Computational analysis for evaluating the dynamic behavior of birefringent samples in digital photoelasticity," *Optica Pura y Aplicada*, vol. 55, no. 1, 2022, doi: 10.7149/OPA.55.1.51099.
- [137] A. Likas, N. Vlassis, and J. J. Verbeek, "The global k-means clustering algorithm," *Pattern Recognit*, vol. 36, no. 2, pp. 451–461, 2003, doi: 10.1016/S0031-3203(02)00060-2.
- [138] P. Makwana, T. M. Kodinariya, and P. R. Makwana, "Review on Determining of Cluster in K-means Clustering Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering," *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, vol. 1, no. 6, 2013, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/313554124>
- [139] J. Yadav and M. Sharma, "A Review of K-mean Algorithm," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 4, no. 7, 2013, [Online]. Available: <http://www.ijettjournal.org>
- [140] D. Mathiesen, D. Vogtmann, and R. B. Dupaix, "Characterization and constitutive modeling of stress-relaxation behavior of Poly(methyl methacrylate) (PMMA) across the glass transition temperature," *Mechanics of Materials*, vol. 71, pp. 74–84, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.mechmat.2014.01.003.



## 7. ANEXOS

### A. Diseño y construcción de banco de pruebas de fotoelasticidad

#### Definición de sistemas funcionales

Los sistemas funcionales están compuestos por una serie de elementos que en conjunto buscan resolver las necesidades de diseño en el prototipo. La Tabla 16: Criterios de selección para prototipo. muestra los seis conjuntos principales junto con sus elementos.

- Sistema de control: Encargado de controlar y medir las variables de fuerza y temperatura, manipulando la corriente eléctrica en las fuentes de carga y térmica. La primera variable es gobernada por un microprocesador de referencia Arduino Mega con una placa “CNC SHIELD” integrada y su valor es censado por un módulo HX711 conectado al mismo microprocesador en lazo cerrado.  
Por otro lado, la segunda variable es gobernada por un controlador de temperatura Rex-C100 y censada por una termocupla tipo J.
- Fuente térmica: Con el objetivo evaluar el comportamiento de la muestra al ser estimulada por dos mecanismos de transferencia de calor, convección y conducción. Por medio de una pistola de calor, la cual aplica la temperatura de forma homogénea sobre toda la superficie y la segunda, dos placas térmicas ubicadas en las zonas de contacto entre el banco de pruebas y la muestra.
- Fuente de iluminación: Compuesto por una lámpara led de luz blanca, referencia “Mercury-Led driver” con potencia de 6 Vatios. Encargada de suministrar la luz que pasa a través de

los componentes ópticos y la muestra para finalmente ser registrada por la cámara o el observador.

- Fuente de carga: Su misión es generar la fuerza mecánica que se aplica a la muestra haciendo que aparezcan los patrones de franja de fotoelasticidad. Dicha fuerza es suministrada por dos motores paso a paso de referencia Nema 17 con reductores de engranajes planetarios de relación 17:1 y capacidad de producir 3.8 Nm de torque cada uno. Ambos motores son gobernados por el microprocesador Arduino Mega encargado de clonar los comandos de ambos motores para garantizar un movimiento simultáneo.
- Estructura: Compuesta principalmente por perfiles de aluminio de referencia V-2020 y uniones pernadas. Se encarga de dar firmeza y soporte a todos los elementos del banco de pruebas una vez ensamblados. El uso de estos perfiles de aluminio permite la movilidad y fácil posicionamiento de los componentes ópticos y la fuente de iluminación en función de la geometría de la muestra.
- Componentes ópticos: Compuesto por tres elementos principales. Polarizadores, encargados de orientar en componentes ortogonales la luz suministrada por la fuente de iluminación. Retardadores de cuarto de onda para desfazar la componente vertical respecto a la horizontal de los haces de luz, evitando la aparición de franjas isoclínicas. Finalmente, la cámara digital u observador cuya función es registrar y almacenar los experimentos realizados.

### **7.1.1 Selección de materiales y elementos de control**

Para llegar a la selección de materiales y elementos primero se definieron las variables y parámetros que se debían cumplir como requisito de diseño. Esto en función de la mayor capacidad de carga del principal material utilizado en los ensayos, el polimetilmetacrilato conocido como PMMA o acrílico. La Tabla 3: Propiedades del polimetilmetacrilato. Adaptado de [69]. presenta la lista las principales propiedades del PMMA. Entre las que se encuentran las resistencias últimas a tensión y a compresión, siendo 72 MPa y 124 MPa respectivamente.

Con base en las propiedades listadas en la Tabla 3 y en un disco de PMMA como referencia, con 10 milímetros de espesor y 60 milímetros de diámetro, se realizaron los cálculos de los principales

elementos. Partiendo de la fuerza necesaria para comprimir el modelo, el torque necesario de los motores, el diámetro y la esbeltez de los tornillos de potencia. La Tabla 16 a continuación, lista el resumen de los principales criterios de selección.

**Tabla 16:** Criterios de selección para prototipo.

<b>Criterios de selección</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
<b>L</b>	Avance tornillo de potencia	0,002	m
<b><math>\mu</math></b>	Coefficiente de fricción tornillo - tuerca	< 0,2	
<b>T</b>	Torque necesario para la compresión	4,943	N*m
<b><math>T_t</math></b>	Esfuerzo en rosca	17.8	MPa
<b><math>T_s</math></b>	Esfuerzo cortante en tornillo	20.8	MPa
<b><math>E_r</math></b>	Esfuerzo flexión en la raíz	32.7	MPa
<b><math>E_{vm}</math></b>	Esfuerzo Von Mises	48.6	MPa
<b><math>\lambda</math></b>	Relación de esbeltez	78	
<b><math>F_c</math></b>	Carga crítica de pandeo	11.149	N

En base a los criterios de la Tabla 16 se realizaron las respectivas búsquedas en el mercado local e internacional de los elementos que cumplieran las especificaciones y ofrecieran la mejor relación calidad precio para la construcción del prototipo, adicionalmente de los componentes necesarios que componen el sistema de control. La Tabla 17 a continuación, resume los principales elementos que fueron seleccionados. No todos los elementos fueron adquiridos de forma comercial, debido a la especificidad de las funciones, en términos de dimensiones y carga. Por tal razón algunos elementos fueron fabricados exclusivamente para el banco de pruebas. Los cuales se encuentran dentro del sistema estructural, pues su función es soportar y posicionar los motores, rodamientos y tornillos de potencia a la estructura del prototipo.

**Tabla 17:** Lista de elementos principales del banco de pruebas numerados.

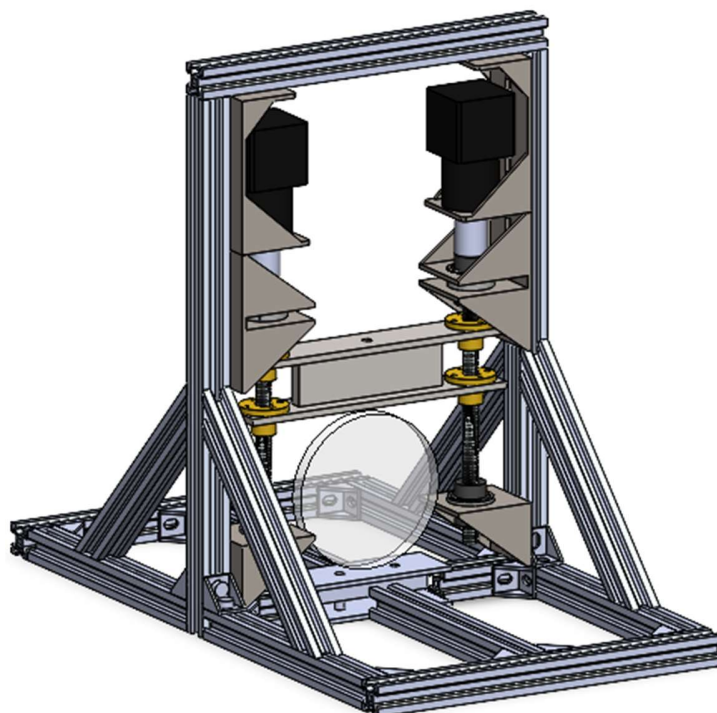
<b>Lista de elementos principales</b>			
<b>Sistema</b>	<b>Perfil</b>	<b>Descripción</b>	<b>#</b>
<b>Estructura</b>	Perfil de aluminio OB2020L	Material para fabricar la estructura	1
	Soporte motor	Posicionar motores paso a paso	2
	Soportes rodamientos	Posicionar rodamientos superiores e inferiores	3
	Tornillería	Posicionar y unir los elementos a la estructura	4
	Uniones en aluminio	Reforzar la estructura	5
	Soporte cámara	Posicionar la cámara digital	6
	Soporte fuente iluminación	Posicional la fuente de iluminación	7
<b>Fuente de carga</b>	Motor paso a paso con reductor 17:1	Generar la fuerza de compresión	8
	Tornillo de potencia	Transmitir la fuerza generada por los motores	9
	Tuerca de potencia		10
	Rodamiento de contacto angular 5200	Soportar cargas axiales y radiales	11
	Rodamiento rígido de bolas 6000	Soportar cargas radiales	12
	viga compresión	Ejercer la carga de compresión sobre muestra	13
<b>Fuente térmica</b>	Placas de calentamiento	Generar calentamiento por conducción	14
	Pistola de calor	Generar calentamiento por convección	15
<b>Sistema de control</b>	Controlador de temperatura SSR-25	Medir y controlar la temperatura sobre muestra	16
	Relé de estado sólido	Hacer puente entre dispositivos CD y CA	17
	Termocupla tipo J	Medir la temperatura de la muestra	18
	Fuente de energía 24 V	Suministrar energía a los motores CD	19
	Arduino 'CNC shield'	Microprocesador	20
	Arduino mega	Tarjeta de control	21
	Sensor de Carga	Medir la carga aplicada	22
	Módulo HX-711	Transductor de la celda de carga	23
<b>Fuente de iluminación</b>	Lámpara led de luz blanca	Proporcional la luz que atraviesa la muestra	24
<b>Componentes ópticos</b>	Cámara digital	Registrar los experimentos de fotoelasticidad	25
	Polarizadores	Orientar la luz que atraviesa la muestra y posteriormente es registrada por la cámara	26
	Retardadores de 1/4 de onda		27

## Modelo tridimensional

Para concretar el concepto del banco de pruebas se realizó un modelo computacional del diseño establecido inicialmente, conocido como CAD por sus siglas en inglés (computer-aided design). el CAD permitió visualizar posibles dificultades durante el proceso de construcción y ensamble, como la falta de soportes en las uniones, la necesidad de una base estable y el espacio para las conexiones del sistema de control. También se evaluaron diferentes configuraciones entre los sistemas del banco de pruebas para determinar dimensiones, ubicaciones y cantidad de elementos adicionales para la construcción.

La Figura 7-1 muestra el modelo CAD del banco de pruebas para ensayos de fotoelasticidad con los sistemas y elementos numerados según la Tabla 17. La estructura está compuesta por perfiles de aluminio conectados por uniones pernadas, especiales para este tipo de perfiles. Dos motores paso a paso con cajas reductoras planetarias se encargan de suministrar la fuerza necesaria para la compresión de la muestra. Dicha fuerza, al salir de los motores pasa por los acoples rígidos que a su vez la transmiten a los tornillos de potencia. A los cuales están conectadas las tuercas de potencia que sostienen la viga de compresión. Finalmente, está es la encargada de ejercer la fuerza sobre la muestra que se esté ensayando.

**Figura 7-1:** Modelo computacional para banco de pruebas.

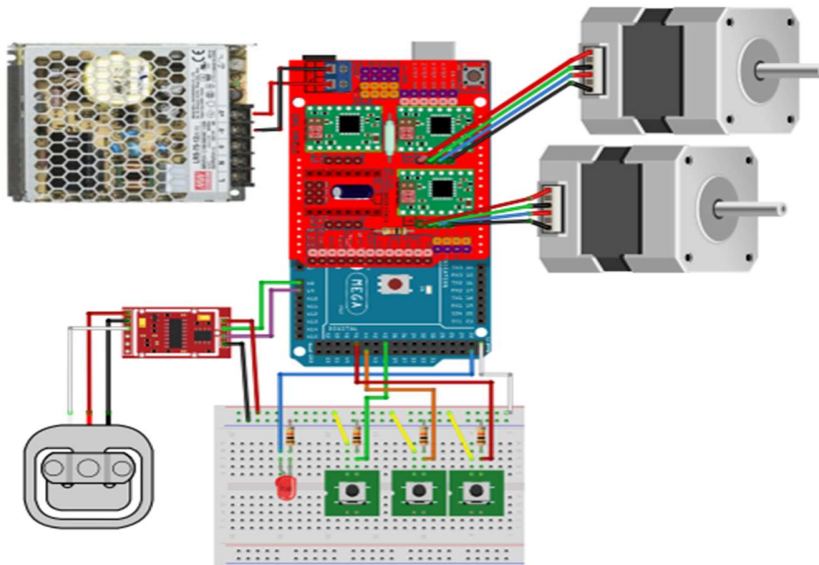


## Sistema de control

El sistema de control se dividió en dos subsistemas principales. El primero es el encargado de gobernar y censar la carga aplicada. La Figura 7-2 muestra la distribución de las conexiones entre los microprocesadores, los motores, la fuente de potencia y el sensor. Este último utiliza el módulo HX-711 como transductor, es decir, es el encargado de convertir los cambios en la medida registrados por la sonda en una salida eléctrica enviada al microprocesador.

Este subsistema es programado con una carga específica, haciendo que los motores actúen hasta que dicha carga sea aplicada en la muestra empleada. Adicionalmente, cuenta con una botonera para funcionamiento manual, por este medio se pueden controlar tanto los movimientos de subida como de bajada. Así mismo, cuenta con un tercer botón para detener el funcionamiento de los motores.

**Figura 7-2:** Esquema de conexiones para el sistema de control de carga.



El segundo subsistema se muestra en la Figura 7-3. Este se encarga de gobernar y censar el sistema de la fuente térmica. El controlador de temperatura Rex – 100, alimentado por una línea de corriente alterna, recibe la señal de la termocupla. Dependiendo del valor de la temperatura el controlador responde enviando un pulso al relé de estado sólido SSR – 25. El cual se encarga de activar los actuadores térmicos, sean placas o la pistola de calor.

**Figura 7-3:** Esquema de conexiones para el sistema de térmico.

