



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

CONFIGURACIÓN Y CALIBRADO DE SISTEMAS FOTOELÁSTICOS PARA MEDIDA EXPERIMENTAL DE TENSIONES Y/O DEFORMACIONES

Alumno: Alejandro Palacios Rodríguez

Tutor: Prof. D. Daniel Carazo Álvarez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería mecánica y minera

Don DANIEL CARAZO ÁLVAREZ, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado: CONFIGURACIÓN Y CALIBRADO DE SISTEMAS FOTOELÁSTICOS PARA MEDIDA EXPERIMENTAL DE TENSIONES Y/O DEFORMACIONES, que presenta ALEJANDRO PALACIOS RODRÍGUEZ, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2019

El alumno:

ALEJANDRO PALACIOS RODRÍGUEZ

El tutor:

DANIEL CARAZO ÁLVAREZ

i.	INDICE DE FIGURAS	3
ii.	INDICE DE TABLAS	4
1	INTRODUCCIÓN	5
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	Fotoelasticidad.....	6
2.1.1	Principios de la fotoelasticidad.....	7
2.1.2	Naturaleza de la luz:	7
2.1.3	Refracción:.....	8
2.1.4	Polarización:	9
2.1.5	Ecuación Fundamental de la Elasticidad: Ley Tenso-Óptica	11
2.1.6	Fotoelasticidad en Reflexión	19
2.1.7	Métodos de Incremento de Fase o Phase-Stepping	21
2.1.8	Correcciones del método:	23
2.2	Correlación Digital de Imágenes (DIC)	24
2.2.1	Fundamentos del DIC 2D.....	25
2.2.2	Procesamiento de las imágenes.	28
2.3	Resolución teórica a problemas clásicos.....	28
2.3.1	Solución teórica de un disco sometido a compresión	29
2.3.2	Solución teórica de un anillo sometido a compresión diametral.....	29
2.3.3	Solución teórica de una placa con concentrador de tensiones	31
3	OBJETIVOS DEL TRABAJO	32
3.1	Objetivos de investigación.....	32
3.2	Objetivos docentes.....	33
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	33
4.1	Piezas ensayadas	35
4.1.1	Discos de 80 y 60 mm de diámetro	35
4.1.2	Anillo de 80 mm de diámetro.....	35
4.1.3	Placa con agujero de 20 y 30 mm de diámetro.....	36
4.2	Equipos utilizados.	36
4.2.1	Máquina de tracción-compresión:	37
4.2.2	Banco de carga para ensayos de tracción:.....	37
4.2.3	Equipos del polariscopio a transmisión:	38

4.2.4	Equipos del polariscopio a reflexión:	41
4.2.5	Software COPA:	46
4.2.6	Equipos del montaje para DIC 2D:	48
4.3	Resultados obtenidos	49
4.3.1	Disco de 60 mm sometido a compresión diametral:	49
4.3.2	Disco de 80 mm sometido a compresión diametral:	54
4.3.3	Anillo de 80/40 mm sometido a compresión diametral:	56
4.3.4	Placa con agujero de 30 mm sometida a tracción:	58
4.3.5	Placa con agujero de 20 mm sometida a tracción:	61
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
5.1	Discos a compresión:	65
5.1.1	Disco de 40 mm de diámetro:	65
5.1.2	Disco de 60 mm de diámetro:	66
5.1.3	Disco de 80 mm de diámetro:	69
5.2	Anillo de 80/40 mm de diámetro:	71
5.3	Placas con agujero central.	74
5.3.1	Placa con agujero central de 30 mm:	74
5.3.2	Placa con agujero central de 20 mm:	77
6	CONCLUSIONES	80
7	TRABAJOS FUTUROS	82
8	BIBLIOGRAFÍA	84

i. INDICE DE FIGURAS

Figura 1-Birrefringencia.....	7
Figura 2-Refracción de la luz.....	8
Figura 3-Retardo Relativo	9
Figura 4-Luz polarizada plana.....	10
Figura 5-Luz polarizada circular	10
Figura 6-Luz polarizada elíptica	11
Figura 7-Efecto del polarizador sobre un haz de luz [1].....	13
Figura 8-Efecto de una lámina cuarto de onda sobre una luz polarizada [1].....	14
Figura 9-Efecto del estado tensional en un material birrefringente sobre la luz polarizada [1].	14
Figura 10-Montaje del polariscopio plano [1].	15
Figura 11- Configuración de un polariscopio circular de campo oscuro [1].	16
Figura 12-Eschema del montaje fotoelástico en reflexión.	19
Figura 13- Secuencia de imágenes para el método de salto de fases en transmisión.	21
Figura 14- Secuencia de imágenes para el método de salto de fases en reflexión.	22
Figura 15- Efecto del unwrapping. [8]	22
Figura 16- Eschema del funcionamiento de rastreo de la técnica de DIC 2D [1].	25
Figura 17-Criterios de correlación DIC.....	27
Figura 18-Interface del software VIC 2D.	28
Figura 19- Anillo comprimido por dos fuerzas opuestas diametrales.	29
Figura 20- Descomposición de las fuerzas en el anillo.	30
Figura 21- Placa con agujero central sometida a tracción.	31
Figura 22- Método de superposición.....	31
Figura 23- Diferentes imágenes tomadas en taller durante la producción de las piezas.	34
Figura 24- Máquina de tracción INSTRON y accesorio para obtener compresión diametral.	37
Figura 25- Banco de carga manual y elementos de medición de la célula de carga.	38
Figura 26- Montaje del polariscopio a transmisión.....	39
Figura 27- Cámara fotográfica utilizada para la toma de imágenes.	40
Figura 28- Montaje del polariscopio a reflexión.	42
Figura 29- Montaje de la fuente monocromática en el polariscopio a reflexión.	43
Figura 30- Preparación de las piezas para los ensayos a reflexión.....	44
Figura 31- Posiciones de los diferentes elementos en el método de incremento de fase en reflexión [1].....	45
Figura 32- Portada del software COPA.....	46
Figura 33- 6 imágenes del método de incremento de fase ordenadas de izquierda a derecha y de arriba abajo.....	46
Figura 34- Inicio de COPA desde MatLab.....	47
Figura 35- Cámara usada en el DIC 2D.....	49
Figura 36- Imágenes correspondientes al método de incremento de fase para el ensayo del disco a compresión bajo 204 N.....	50
Figura 37- Imágenes correspondientes al método de incremento de fase para el ensayo del disco a compresión bajo 204 N (reflexión).	50
Figura 38- Imagen del ensayo de DIC para un disco a compresión.	51
Figura 39- a) Mapa de isoclinas b) Mapa de isocromáticas c) Unwrapping.	52
Figura 40- Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.	52
Figura 41- Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en reflexión.	53
Figura 42- Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.....	54
Figura 43- Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.	55
Figura 44- Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en reflexión.	55
Figura 45- Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.....	56

<i>Figura 46– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 47– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en reflexión.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 48– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 49– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 50– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 51– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 52– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 53– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en reflexión.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 54– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 55- Imagen del ensayo del disco de 40 mm a compresión diametral.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 56– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en el disco de 60 mm (eje y).</i>	<i>66</i>
<i>Figura 57– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en el disco de 60 mm (eje x).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 58- Comparación del orden de franja en transmisión, reflexión y teórico para el disco de 60 mm de diámetro corrigiendo manualmente el unwrapping.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 59– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en el disco de 80 mm (eje y, eje x).</i>	<i>70</i>
<i>Figura 60– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en el anillo de 80 mm (eje y, eje x).</i>	<i>72</i>
<i>Figura 61- Comparación del orden de franja en transmisión, reflexión y teórico para el anillo corrigiendo manualmente el unwrapping.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 62– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en la placa con agujero de 30 mm (eje y, eje x).</i>	<i>75</i>
<i>Figura 63– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión y a reflexión en la placa con agujero de 30 mm (eje y, eje x).</i>	<i>76</i>
<i>Figura 64– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en la placa con agujero de 20 mm (eje y, eje x).</i>	<i>78</i>
<i>Figura 65- Comparación del orden de franja en transmisión, reflexión y teórico para el anillo corrigiendo manualmente el unwrapping.</i>	<i>79</i>

ii. INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1- Corrección del orden de las imágenes en transmisión.</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2-Corrección del orden de las imágenes en reflexión.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3 – Características de la fuente de luz usada en los ensayos de transmisión.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4– Características de la cámara fotográfica.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5– Características de la cámara de DIC 2D.</i>	<i>48</i>

1 INTRODUCCIÓN

La fotoelasticidad es un método experimental para el análisis de tensiones o campos de tensiones de piezas sometidas a esfuerzos. Está basada en la birrefringencia de algunos materiales, propiedad que permite obtener mapas de franjas relacionadas con el estado tensional de piezas iluminadas con luz polarizada. Para poder obtener la información de estas imágenes será necesario un procesamiento de las mismas a través de programas automáticos desarrollados en los últimos años gracias al avance informático.

En el presente trabajo de fin de grado se pretende emplear dos sistemas fotoelásticos, uno en reflexión y otro en transmisión, para el análisis automático de tensiones y deformaciones en problemas de solución teórica conocida. También se empleará otra técnica experimental óptica no intrusiva de análisis de deformaciones, denominada Correlación Digital de Imágenes (en adelante DIC, por sus siglas en inglés), para contrastar los resultados.

Se ensayarán diferentes tipos de especímenes tales como un disco y un anillo a compresión diametral, y una placa con agujero a tracción (problema también conocido como concentrador de tensiones). De todos ellos existen expresiones teóricas contrastadas para determinar el estado tensional o de deformaciones por lo que será posible comparar los resultados experimentales y teóricos.

Los especímenes para los ensayos serán creados exclusivamente para su estudio por lo que su fabricación es un punto muy importante de investigación en el presente trabajo pues en función del proceso de fabricación se podrán generar ciertas tensiones residuales que estropeen los resultados. Para decidir finalmente la técnica de mecanizado idónea se estudiarán los procesos disponibles en los talleres de la universidad y si fuera necesario se buscarían otras soluciones externas para conseguir piezas con las menores tensiones residuales.

Por otro lado, y con la intención de verificar los resultados anteriores, se empleará también el método DIC, el cual nos permitirá obtener mapas completos de deformación de la superficie mediante el procesado de las imágenes. Con estos

resultados podremos corroborar que los ensayos de fotoelasticidad arrojan los resultados adecuados.

Los principios de la técnica de DIC son muy diferentes de los de la fotoelasticidad, pero para este método también se utilizan una serie de imágenes obtenidas durante los ensayos para después procesarlas con programas avanzados y obtener de ellos los correspondientes mapas.

El procesamiento automático de imágenes fotoelásticas en transmisión y reflexión ya ha sido acometido previamente en trabajos previos de este Departamento, sin que se obtuviesen resultados adecuados. Las conclusiones de dichos estudios previos serán consideradas en este.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fotoelasticidad.

La fotoelasticidad es una técnica óptica de campo completo que proporciona la diferencia de tensiones principales o tensión tangencial máxima en el plano estudiado, y que ha sido empleada en el estudio de múltiples problemas de ingeniería. La posibilidad de estudiar tensiones y deformaciones de componentes reales por medio de la utilización de recubrimientos fotoelásticos adheridos a su superficie, permite su empleo en el diseño, optimización y validación de modelos de cualquier índole [1].

Con la fotoelasticidad se pueden realizar los siguientes procesos [2]:

- Identificación instantánea de áreas críticas (regiones de sobre-esfuerzo).
- Medidas de picos de tensiones y distribución de tensiones alrededor de agujeros, muescas y sitios potenciales de posibles fallos.
- Identificar y medir tensiones residuales.

- Detectar el rendimiento y observar la redistribución de tensiones en el material que está siendo formado.

La fotoelasticidad se puede implementar de dos modos distintos en función de las necesidades del problema a estudio: fotoelasticidad en transmisión y en reflexión.

2.1.1 Principios de la fotoelasticidad.

Ciertos materiales transparentes no cristalinos, en particular algunos plásticos polímeros, son ópticamente isotrópicos bajo condiciones normales, pero se comportan como birrefringentes cuando son sometidos a esfuerzos. Este efecto persiste mientras las cargas se mantienen, pero desaparece casi instantáneamente o después de un intervalo de tiempo en función del material y condiciones de carga, cuando las cargas son eliminadas. [1]

Las observaciones sobre la birrefringencia de Brewster en 1816 [3] y la ley Tenso-óptica de Maxwell en 1853 suponen los principios elementales sobre los que se basa la fotoelasticidad.

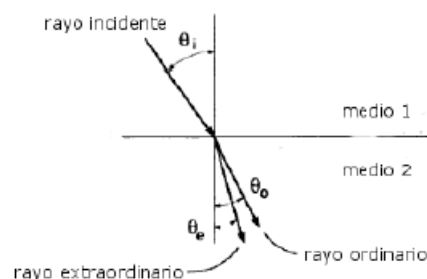


Figura 1-Birrefringencia

2.1.2 Naturaleza de la luz:

La teoría electromagnética de Maxwell predijo la presencia de dos campos de vectores en las ondas de la luz, un campo eléctrico (E) y uno magnético (H). Estos vectores están en fase, y son perpendiculares entre sí respecto a la dirección de propagación. Cualquiera de los dos vectores se puede tomar como el vector fundamental de la luz. De esta forma, la magnitud del vector eléctrico puede ser representada como [4]:

$$E = a * \cos \frac{2\pi}{\lambda} ct = a * \cos 2\pi ft = a * \cos \omega t \quad (1)$$

Donde a es la amplitud de la onda de la luz, λ es la longitud de onda de la luz, c es la velocidad de la luz en el vacío, t es el tiempo, f es la frecuencia de la onda de la luz y ω es la frecuencia angular de la onda de la luz.

2.1.3 Refracción:

Los principios físicos que explican la refracción de la luz son ampliamente conocidos, y se explican en multitud de libros y manuales [2]. Cuando la luz atraviesa un determinado medio, su velocidad disminuye a un valor:

$$c_1 = \frac{c}{n_1} \quad (2)$$

Donde n_1 denota el índice de refracción del medio. Sin embargo, como la frecuencia permanece inalterada, la longitud de onda también disminuye (Figura 2):

$$\lambda_1 = \frac{c_1}{f} = \frac{c}{n_1 * f} = \frac{\lambda}{n_1} \quad (3)$$

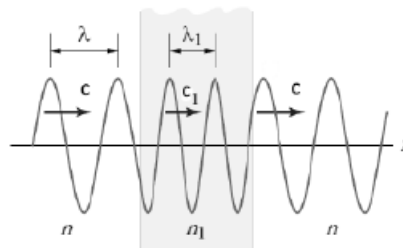


Figura 2-Refracción de la luz

Es preciso indicar que el tiempo t_1 requerido por la luz para que se propague a través de un medio de espesor h e índice de refracción n_1 es:

$$t_1 = \frac{h}{c_1} = n_1 \frac{h}{c} \quad (4)$$

Si ondas de luz similares atraviesan dos medios con un mismo espesor e índices de refracción n_1 y n_2 (Figura 2), y $n_1 > n_2$, la diferencia entre los tiempos empleados para atravesar cada medio será:

$$t_1 - t_2 = n_1 \frac{h}{c} - n_2 \frac{h}{c} = \frac{h}{c} (n_1 - n_2) \quad (5)$$

Por tanto, la diferencia de fases o el retardo relativo entre las dos ondas después de que emerjan de los medios será:

$$\delta = 2\pi f(t_1 - t_2) = 2\pi f \left(\frac{h}{c_1} - \frac{h}{c_2} \right) = 2\pi h \frac{h}{\lambda} \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right) = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n_2) \quad (6)$$

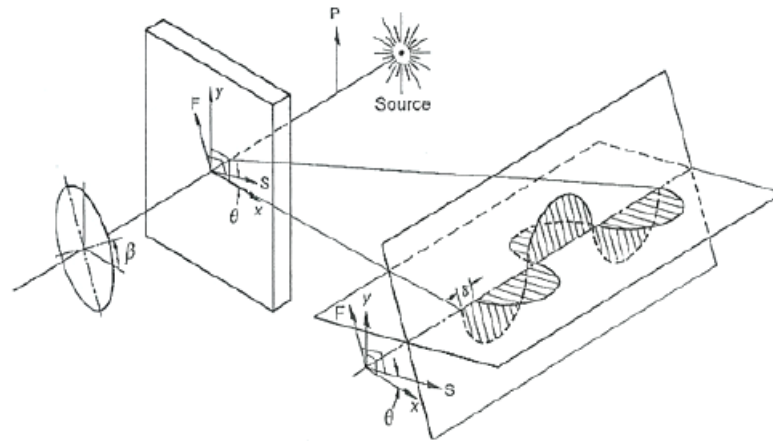


Figura 3-Retardo Relativo

2.1.4 Polarización:

La mayoría de las fuentes de luz consisten en un gran número de emisores atómicos o moleculares orientados al azar. Los rayos de luz emitidos desde la fuente no tendrán una orientación concreta y la punta del vector de luz describirá un movimiento vibratorio aleatorio en un plano transversal a la dirección de propagación [4].

Si la punta del vector de luz se ve obligada a seguir una orientación predeterminada, se dice que la luz está polarizada.

Hay tres tipos de luz polarizada: luz polarizada elíptica, circular y plana.

Luz polarizada plana [6]:

Se dice que la luz está linealmente polarizada cuando la componente “x” y la componente “y” del vector del campo eléctrico se encuentran *en fase*, conservando constante su dirección y cambiando únicamente (de forma senoidal con el tiempo y el espacio) su magnitud y sentido.

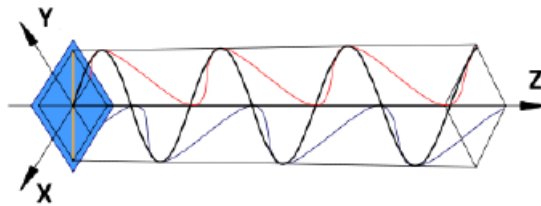


Figura 4-Luz polarizada plana

Luz polarizada circular [6]:

Ocurre cuando las ondas en el eje “x” y el eje “y” del campo eléctrico se encuentran desfasadas 90° y la amplitud de ambas es exactamente la misma. Para este caso si se pudieran observar las oscilaciones del campo eléctrico en un haz de luz linealmente polarizada, viniendo de frente, entonces el movimiento descrito sería circular.

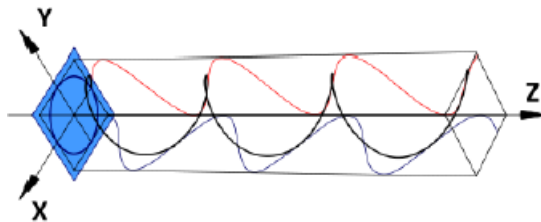


Figura 5-Luz polarizada circular

Luz polarizada elíptica [6]:

La polarización elíptica se presenta cuando las componentes E_x y E_y se encuentran desfasadas un valor ϵ arbitrario y tienen una amplitud también arbitraria.

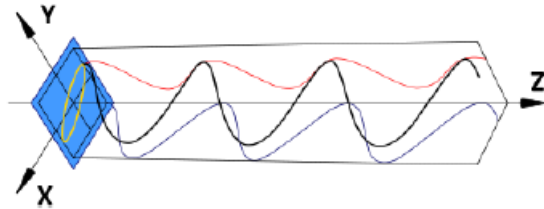


Figura 6-Luz polarizada elíptica

Si podemos considerar “arbitrario” como cualquier valor, entonces se pueden presentar los casos donde $\epsilon=0$, $\epsilon=\pi/2$ (o múltiplos enteros de éste), así como cuando la amplitud de las componentes sea la misma, que es cuando se manifiesta la polarización lineal y circular.

Por ello la polarización lineal y la polarización circular son consideradas casos especiales de polarización elíptica, a pesar de no ser estrictamente un movimiento elíptico.

2.1.5 Ecuación Fundamental de la Elasticidad: Ley Tenso-Óptica

Partimos de un modelo birrefringente sujeto a un estado de tensión plana. Podemos caracterizar el estado de tensión en un punto del modelo a través de las tensiones principales σ_1 , σ_2 . Cuando el modelo se carga, experimentalmente se muestra cómo se vuelve doble refractivo y las direcciones de los ejes de polarización en el plano del modelo en cualquier punto coinciden con las direcciones de las tensiones principales en ese punto. Maxwell formuló en 1852 el retardo relativo entre las tensiones y los índices de refracción como:

$$\begin{aligned} n_1 - n &= c_1 * \sigma_1 - c_2 * \sigma_2 \\ n_2 - n &= c_1 * \sigma_2 - c_2 * \sigma_1 \end{aligned} \quad (7)$$

Donde:

- n_1 y n_2 son los índices de refracción asociados con las direcciones principales.
- n es el índice de refracción en el estado descargado.
- C_1 y C_2 son coeficientes tenso-ópticos.
- σ_1 y σ_2 son las tensiones principales.

Si sobre el modelo incide luz polarizada plana, se puede obtener el retardo relativo como función de los índices de refracción:

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n_2) = \frac{2\pi h}{\lambda} (c_1 + c_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (8)$$

Donde:

h Espesor del material birrefringente.

λ Longitud de onda.

Esta ecuación indica que en un modelo fotoelástico, el retardo relativo cambia de un punto a otro dependiendo del nivel de tensión. Si $(c_1 + c_2)$ es sustituido por C , el retardo relativo quedará como:

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (9)$$

La definición del orden de franja N como el retardo relativo en términos de ciclos de retardo, y del factor de franja f_σ como una constante del material para una determinada longitud de onda, permite reescribir la ecuación anterior como la ecuación fundamental de la fotoelasticidad [4]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N * f_\sigma}{h}; \quad (10)$$

$$\text{Siendo } N = \frac{\delta}{2\pi} \text{ y } f_\sigma = \frac{\lambda}{C} \text{ unidades } N/(mm * \text{franja})$$

Para la determinación del orden de franja, N , se requiere del empleo de aparatos fotoelásticos, los denominados polariscopios. Un polariscopio es una sucesión de elementos ópticos tales como el polarizador o la lámina de cuarto de onda. El polarizador es un elemento óptico que solamente transmite la componente luminosa en una dirección (según el eje de polarización) y, absorbe la componente ortogonal (Fig. 7). La lámina cuarto de onda descompone la luz en dos componentes, de forma que transmite una de ellas (según su eje rápido) adelantada respecto a la segunda (eje lento) con un desfase igual a un cuarto de la longitud de onda (Fig. 8) [1] [7].

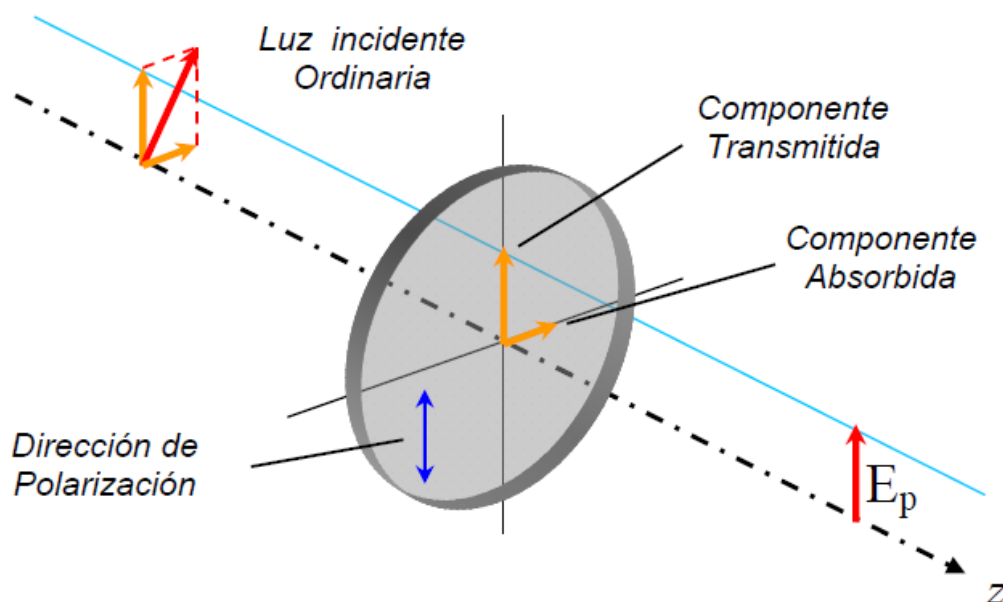


Figura 7-Efecto del polarizador sobre un haz de luz [1]

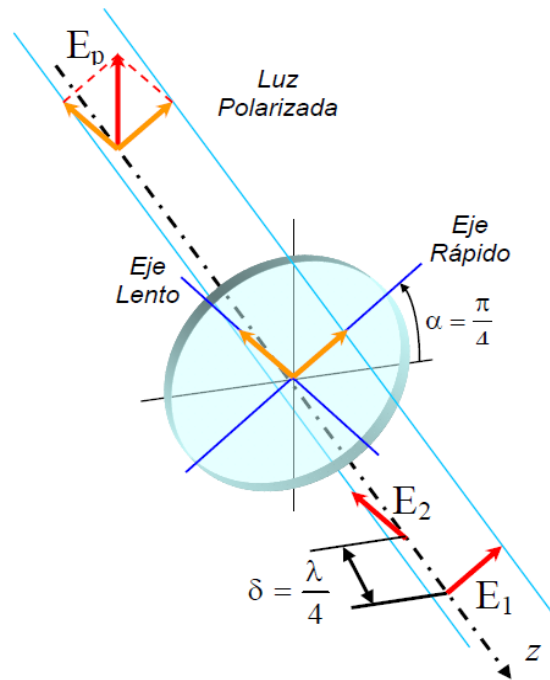


Figura 8-Efecto de una lámina cuarto de onda sobre una luz polarizada [1]

Un material birrefringente actúa como una lámina de onda temporal, cuyos ejes coinciden con las direcciones principales de tensión (Fig. 9), de forma que el retardo relativo δ entre las componentes de la luz que emerge del mismo son proporcionales a la diferencia de tensiones principales, según 10.

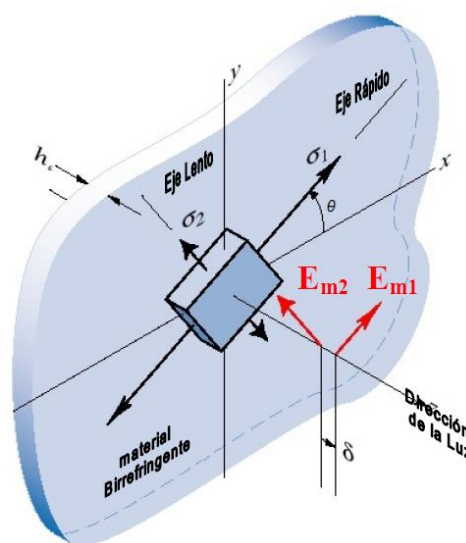


Figura 9-Efecto del estado tensional en un material birrefringente sobre la luz polarizada [1].

Las diferentes combinaciones de estos elementos ópticos para realizar un análisis fotoelástico se denominan polariscopios. El más simple de ellos es el polariscopio plano, formado por dos polarizadores, aunque el más cercano al observador se denomina analizador ya que sirve para analizar la luz que emerge del espécimen.

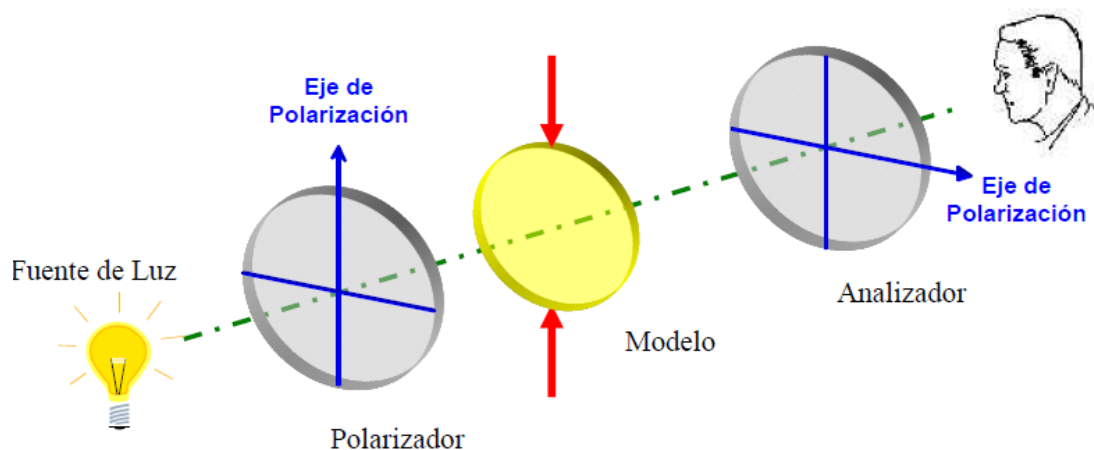


Figura 10-Montaje del polariscopio plano [1].

La onda que emerge del polarizador se describe mediante:

$$E_p = k * \cos \omega t \quad (11)$$

Donde:

k amplitud de la onda.

ω frecuencia angular.

t variable tiempo.

Al atravesar el espécimen en tensión, la onda de luz se desdoble en dos componentes según las direcciones principales cuyas ecuaciones de onda serán:

$$E_{m1} = k * \cos \theta * \cos(\omega t - \delta_1) \quad (12)$$

$$E_{m2} = k * \cos \theta * \cos(\omega t - \delta_2)$$

Siendo δ_1 y δ_2 los retardos relativos de las ondas respecto a la onda en el aire, de manera que $\delta = \delta_2 - \delta_1$.

En el polarizador plano, el analizador, con el eje de polarización en 0° , transmite sólo las componentes horizontales, que se combinan para producir una onda de luz que se define mediante:

$$E_x = E_{m2} * \cos \theta - E_{m1} * \sin \theta \quad (13)$$

Dado que la intensidad lumínica es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda, la intensidad de la luz que emerge del analizador viene dada por:

$$I \cong K * \sin^2 2\theta * \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (14)$$

El polariscopio circular incluye, además del polarizador y el analizador, dos láminas de cuarto de onda. La orientación de los elementos produce diferentes imágenes fotoelásticas. La configuración que se muestra en la siguiente figura, donde las láminas de cuarto de onda están cruzadas 90° , al igual que el polarizador y el analizador, produce una configuración conocida como campo oscuro, denominada así porque las zonas fuera del material fotoelástico permanecen oscuras. Si se sitúan o bien polarizador y analizador o bien las dos láminas de cuarto de onda de forma paralela, pasa a una configuración de campo claro.

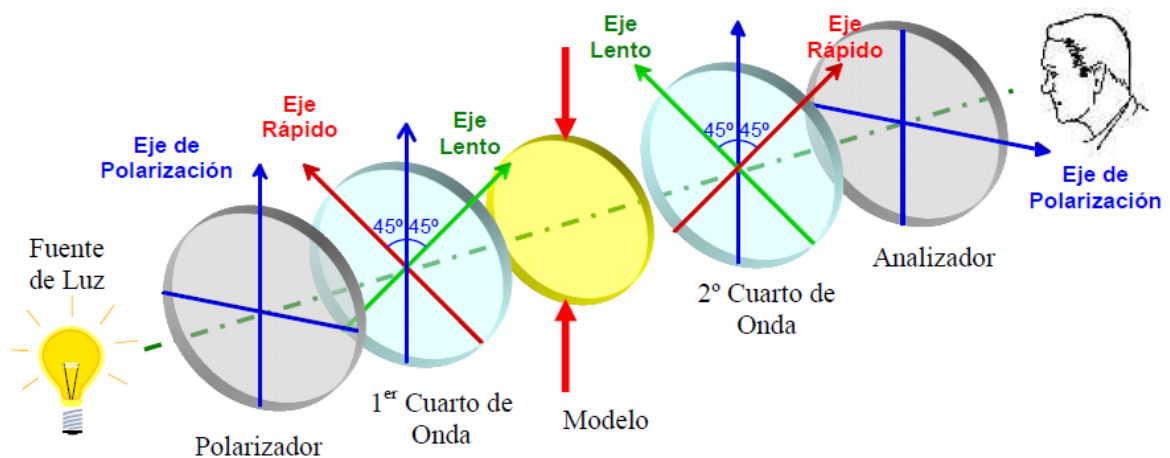


Figura 11- Configuración de un polariscopio circular de campo oscuro [1].

Cuando la luz polarizada atraviesa la primera lamina de cuarto de onda de ella emergen dos componentes, E_1 y E_2 correspondientes a los ejes rápido y lento, respectivamente. Para un montaje de campo oscuro, se pueden escribir como:

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} * k * \cos \omega t \quad (15)$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} * k * \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} * k * \sin \omega t$$

Tras atravesar el modelo, las expresiones que describen las componentes de la onda de luz según las direcciones principales son:

$$E_{m1} = \frac{\sqrt{2}}{2} * k * \cos\left(\omega t + \theta - \frac{\pi}{4}\right) \quad (16)$$

$$E_{m2} = \frac{\sqrt{2}}{2} * k * \sin\left(\omega t + \theta - \frac{\pi}{4} - \delta\right)$$

La luz que emerge de la segunda lámina cuarto de onda puede escribirse como:

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} * k * \left[\cos\left(\omega t + \theta - \frac{\pi}{4}\right) * \sin\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) + \sin\left(\omega t + \theta - \frac{\pi}{4} - \delta\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) \right] \quad (17)$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} * k * \left[\sin\left(\omega t + \theta - \frac{\pi}{4}\right) * \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) + \cos\left(\omega t + \theta - \frac{\pi}{4} - \delta\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) \right]$$

Finalmente, la luz entra en el analizador. Las componentes verticales de E_1 y E_2 son absorbidas en el analizador mientras que las componentes horizontales son transmitidas, llegando al observador:

$$E_x = \frac{\sqrt{2}}{2} * (E_2 - E_1) = k * \sin \frac{\delta}{2} * \sin\left(\omega t + 2 * \theta - \frac{\delta}{2}\right) \quad (18)$$

Donde la intensidad de la luz es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda de luz, siendo esta:

$$I \cong K * \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (19)$$

Así la intensidad lumínica en un punto de la imagen fotoelástica observada a través de un polariscopio circular de campo oscuro se diferencia, respecto a la de otro punto, en el retardo relativo δ , que a su vez es función de la diferencia de tensiones principales para unas condiciones de ensayo dadas, según (10).

Se puede seguir una deducción similar para obtener la expresión de la intensidad lumínica en el polariscopio circular de campo claro:

$$I \cong K * \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (20)$$

Esta información junto con la de campo oscuro, permite determinar de forma exacta hasta $1/2$ del orden de franja N.

Las imágenes fotoelásticas obtenidas en un polariscopio circular son, por tanto, mapas de franjas que representan el lugar geométrico de puntos del plano donde la diferencia de tensiones principales es constante e igual a un número entero, $N=1, 2, 3, \dots$ de ordenes de franja, en una configuración de campo oscuro, o igual a un orden de franja de $N=0.5, 1.5, 2.5, \dots$ si la configuración es de campo claro.

Si se utiliza luz blanca en un polariscopio las franjas con el mismo orden tienen el mismo color y esta familia de franjas es conocida como isocromáticas. Si se utiliza un polariscopio plano, además de las isocromáticas, se observa otra familia de curvas, que son las isóclinas. Las isóclinas son el lugar geométrico de los puntos cuya orientación θ de las direcciones principales es la misma.

En un polariscopio plano se observan dos isóclinas, la paralela al eje del polarizador y la paralela al eje del analizador, según se puede deducir de la ecuación de la intensidad emergente de un polariscopio plano.

El análisis fotoelástico implica la determinación del valor de la isocromática N e isóclina θ en cada punto y del orden de franja N. Existen diferentes métodos automáticos para realizar este análisis que se dividen en tres grupos:

- Análisis de contenido de espectro.
- Análisis de Fourier.
- Análisis mediante incrementos de fase (pase-stepping).

Este último se desarrollará en futuros apartados puesto que es el método usado para el análisis en este trabajo.

2.1.6 Fotoelasticidad en Reflexión

La fotoelasticidad a transmisión tratada anteriormente nos permite estudiar el estado tensional de materiales birrefringentes, pero no es útil para materiales opacos que no poseen la propiedad de birrefringencia. Para estos materiales será necesario el uso de la fotoelasticidad en reflexión.

La fotoelasticidad en reflexión se basa en la aplicación de un recubrimiento (*coating*) de un material fotoelástico que se pega al modelo mediante el uso de adhesivos reflectantes. De este modo las isocromáticas que se observan se refieren al estado tensional del recubrimiento, por lo que debe estar fielmente adherido al componente para representarlo adecuadamente [1] [8].

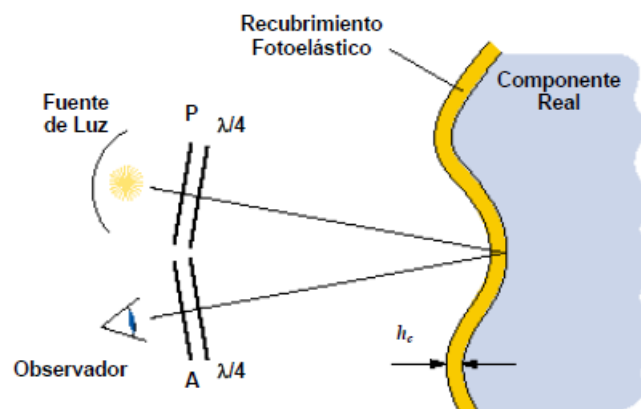


Figura 12-Esquema del montaje fotoelástico en reflexión.

El efecto de birrefringencia en el recubrimiento se debe a las deformaciones superficiales, por lo que la ecuación fundamental de la fotoelasticidad en reflexión suele escribirse como:

$$\varepsilon_{1,r} - \varepsilon_{2,r} = \frac{N * f_{\varepsilon}}{2 * h_c} \quad (21)$$

$$f_{\varepsilon} = \frac{1 + \vartheta}{E} f_{\sigma}$$

Donde:

$\varepsilon_{1,r}, \varepsilon_{2,r}$ Deformaciones principales en el recubrimiento.

h_c Espesor del recubrimiento.

f_{ε} Coeficiente óptico de deformación, talque $f_{\varepsilon} = \frac{\lambda}{k_{\varepsilon}}$

k_{ε} Coeficiente de deformación del recubrimiento.

ϑ Coeficiente de Poisson del material.

E Módulo de elasticidad del material.

En la *ecuación 21* el coeficiente óptico de deformación relacionado con las deformaciones, f_{ε} , se obtiene a partir del coeficiente óptico de deformación relacionado con las tensiones, f_{σ} .

La expresión que relaciona los estados tensionales del recubrimiento (subíndice r) y del espécimen (subíndice s) se obtiene bajo las siguientes premisas:

1. El espesor del recubrimiento es muy pequeño.
2. Ambos materiales tienen valores similares del coeficiente de Poisson.
3. Están ambos bajo tensión plana.

En la realización de los ensayos con el polariscopio a reflexión no se ha usado el recubrimiento fotoelástico comentado, debido principalmente a la complejidad de instalación del mismo, si no que para conseguir el principio de birrefringencia se ha pintado con un espray plateado metalizado la superficie inversa del material birrefringente [9].

2.1.7 Métodos de Incremento de Fase o Phase-Stepping

El método de variación de fase está basado en la variación de la disposición de los diferentes elementos que forman el polariscopio con el fin de obtener un conjunto de imágenes que se pueden procesar para determinar los parámetros fotoelásticos.

Patterson [9] desarrollo el método del Phase-Stepping que usaremos para el procesamiento de las imágenes en el presente trabajo. Consiste en obtener seis imágenes con diferentes posiciones del analizador y la segunda lámina de cuarto de onda.

En la figura 13 se expone una tabla recogiendo las diferentes posiciones de estos elementos a la hora de tomar las imágenes junto con la expresión que indica la intensidad de la luz, donde:

- β ángulo del analizador.
- ϕ ángulo de la segunda lámina de cuarto de onda.
- α ángulo de retardo, tal que $\alpha = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$

Image no.	ϕ	β	Light intensity
i_1	0	$\pi/4$	$i_1 = i_m + i_v \cos \alpha$
i_2	0	$-\pi/4$	$i_2 = i_m + i_v \cos \alpha$
i_3	0	0	$i_3 = i_m - i_v \sin \alpha \sin 2\theta$
i_4	$\pi/4$	$\pi/4$	$i_4 = i_m + i_v \cos \alpha \sin 2\theta$
i_5	$\pi/2$	$\pi/2$	$i_5 = i_m + i_v \sin \alpha \sin 2\theta$
i_6	$3\pi/4$	$3\pi/4$	$i_6 = i_m - i_v \cos \alpha \sin 2\theta$

Figura 13- Secuencia de imágenes para el método de salto de fases en transmisión.

Este es un método sobredeterminado, debido a que se toman 6 imágenes distintas para la resolución de 4 incógnitas en las ecuaciones. Tenemos i_m e i_v , que no son de nuestro interés, y por otro lado el parámetro de la isoclina θ y el retardo relativo α , que se obtienen aplicando la siguiente expresión en cada punto del dominio.

$$\theta = \frac{1}{2} * \arctan\left[\frac{j_1 - j_2}{j_5 - j_3}\right]; \alpha = \arctan\left[\frac{j_5 - j_3}{(j_6 - j_4) * \cos 2\theta}\right] \quad (22)$$

Para el polariscopio a reflexión las imágenes a tomar serán las representadas a continuación, utilizando el índice j para distinguirlas de las imágenes de transmisión.

Image no.	$\frac{1}{4}$ wave-plate angle ($\phi = \gamma$)	Analyser angle (β)	Light intensity description
1	0	$\pi/4$	$j_1 = j_m + j_v \sin 2\theta \sin \delta$
2	0	$-\pi/4$	$j_2 = j_m + j_v \sin 2\theta \sin \delta$
3	$\pi/4$	$-\pi/4$	$j_3 = j_m + j_v \cos 2\theta \sin \delta$
4	$\pi/4$	0	$j_4 = j_m + j_v \cos \delta$
5	$\pi/4$	$\pi/4$	$j_5 = j_m + j_v \cos 2\theta \sin \delta$
6	$\pi/4$	$\pi/2$	$j_6 = j_m + j_v \cos \delta$

Figura 14- Secuencia de imágenes para el método de salto de fases en reflexión.

El procesamiento de las imágenes se realizará mediante el software desarrollado por el laboratorio de análisis experimental de la Universidad de Sheffield (GB).

El programa principal de análisis fotoelástico es el CoPA (Computer aided Photoelastic Analysis) cuyos algoritmos se describen en [10]. La última versión no precisa de un pre-procesado mediante CatchSix, ya que es posible cargar las imágenes directamente en formato BMP. y numeradas en orden de 1-6.

CoPA permite determinar el mapa de isoclinas, al que se le puede aplicar un algoritmo de demodulación, y de isocromáticas, mediante un algoritmo de *unwrapping* que consiste en corregir el salto de fase provocado por el cambio de franja para dotar así al mapa de continuidad como se observa a continuación en la determinación del orden de franja en el eje horizontal de un disco a compresión.

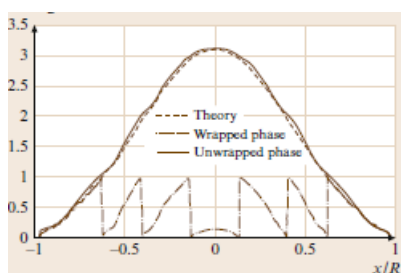


Figura 15- Efecto del unwrapping. [8]

2.1.8 Correcciones del método:

Durante la realización de los ensayos han surgido diferentes problemas para obtener los resultados más adecuados en cada uno de los especímenes estudiados, y principalmente los errores llegaron a la hora del procesamiento de las imágenes con el CoPA. Tras un estudio exhaustivo de las posibles causas se llegó a la conclusión de que los errores estaban en el orden de las imágenes en las tablas anteriormente expuestas. Esto ha sido también corroborado con otros trabajos de investigación donde han surgido los mismos contratiempos y que han sido solucionados de la misma forma.

A continuación, se exponen las tablas de las imágenes tanto para transmisión como para reflexión, pero con el orden corregido de las imágenes en referencia a las tablas anteriormente descritas:

<u>Orden incorrecto</u>	<u>Orden correcto</u>
Imagen 1	Imagen 2
Imagen 2	Imagen 1
Imagen 3	Imagen 3
Imagen 4	Imagen 4
Imagen 5	Imagen 5
Imagen 6	Imagen 6

Tabla 1- Corrección del orden de las imágenes en transmisión.

<u>Orden incorrecto</u>	<u>Orden correcto</u>
Imagen 1	Imagen 3
Imagen 2	Imagen 5
Imagen 3	Imagen 4
Imagen 4	Imagen 2
Imagen 5	Imagen 6
Imagen 6	Imagen 1

Tabla 2-Corrección del orden de las imágenes en reflexión.

2.2 Correlación Digital de Imágenes (DIC)

Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica de campo completo que permite la medición de desplazamientos y deformaciones. La técnica consiste en la toma de imágenes digitales durante el ensayo de una probeta desde su estado inicial (considerado como el de referencia) hasta su estado final (deformado). Previamente a la realización del ensayo, en general, las probetas son tratadas para poder aplicar la técnica DIC. Para ello se aplica una base de pintura blanca sobre la superficie, y posteriormente se genera un moteado aleatorio de color negro para generar el máximo contraste posible.

La técnica de correlación digital de imágenes comenzó a estudiarse a principios de los años ochenta [11], proponiéndose un método para la medida de deformaciones basado en el procesamiento automático de imágenes, relacionando las deformaciones medidas en la imagen con las deformaciones del objeto mediante el hecho de que los cambios en las imágenes pueden ser descritos

mediante los mismos principios de continuidad que gobiernan la deformación en pequeñas áreas de una superficie [1].

Posteriormente se han desarrollado algoritmos numéricos para extraer la deformación del objeto a partir de una secuencia de imágenes [12], siendo este procesamiento de imágenes de deformaciones planas, DIC 2D. A principios de los noventa, el desarrollo de nuevos algoritmos permitió el estudio de los problemas en tres dimensiones con el uso de varias cámaras y la correlación cruzada de imágenes de dichas cámaras [13].

2.2.1 Fundamentos del DIC 2D

Este método se basa en el rastreo de los diferentes puntos de una imagen (píxeles) entre dos estados diferentes de deformación [1]:

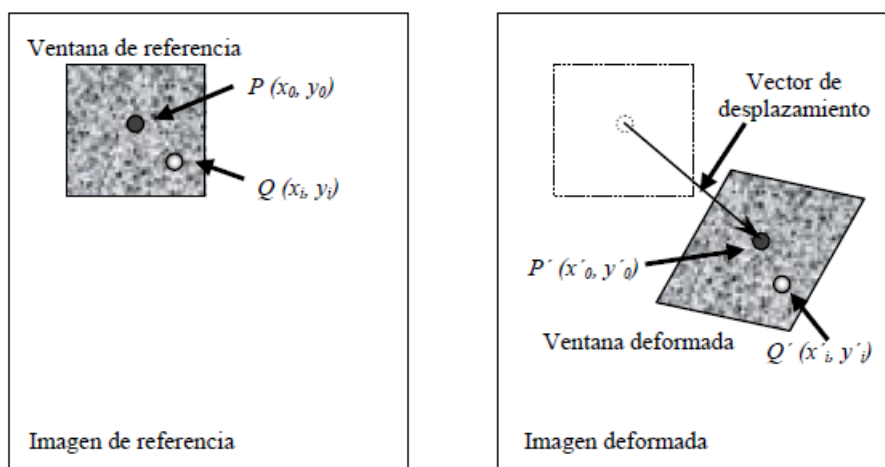


Figura 16- Esquema del funcionamiento de rastreo de la técnica de DIC 2D [1].

Las probetas se dividen en subconjuntos virtuales cuadrados de lado $2M+1$ píxeles, denominados facetas (*facet*), donde M es la distancia desde el punto de estudio hasta el borde de la ventana, y mediante la aplicación de algoritmos de correlación, se busca una región o faceta de la imagen de referencia en la imagen deformada, determinando el vector de desplazamientos en cada conjunto de facetas procesadas.

Es necesario establecer un criterio de correlación para evaluar la similitud entre la ventana de referencia y la deformada, siendo el más empleado la correlación cruzada y la suma de diferencias al cuadrado. El proceso de rastreo se completa mediante la identificación del valor máximo del coeficiente de correlación entre todos los puntos de la ventana, con lo que la posición del punto P' queda determinada.

Se asume la continuidad de los desplazamientos del sólido deformable y de esta manera existe un conjunto de puntos vecinos a P en la ventana de referencia que lo seguirán siendo en la deformada. Así, las coordenadas del punto Q pueden ser relacionadas con las del punto Q' en la ventana deformada mediante las funciones de forma o funciones de mapeado del desplazamiento.

$$\begin{cases} x'_i = x_i + \xi(x_i, y_j) \\ y'_i = y_i + \eta(x_i, y_j) \end{cases} \quad (i, j = -M:M) \quad (23)$$

Donde ξ y η son las componentes del vector desplazamiento en el plano.

Cuando solo se produzca una traslación como sólido rígido se puede emplear una función de forma de orden cero tal que, $\xi_0(x_i, y_j) = u$ y $\eta_0(x_i, y_j) = v$, con u y v constantes. Pero esta función no es suficiente para representar un cambio de forma de la ventana y la función de forma de primer orden más empleada es:

$$\begin{cases} \xi_1(x_i, y_j) = u + u_x * \Delta x + u_y * \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) = v + v_x * \Delta x + v_y * \Delta y \end{cases} \quad (24)$$

Siendo $\Delta x = x_i - x_0$ y $\Delta y = y_i - y_0$.

En casos más complejos de deformación podrán emplearse funciones de orden superior.

En cuanto a los criterios de correlación, ya mencionados previamente, los más empleados se resumen en la *Fig 16*. Para todos los criterios C es la correlación y un valor $C=0$ implica nula similitud mientras que $C=1$ significa una coincidencia perfecta.

<i>Criterio de Correlación</i>	<i>Ecuación</i>
A. Criterios de Correlación Cruzada:	
A.1. Correlación Cruzada (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j)]$
A.2. Correlación Cruzada Normalizada (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j)}{\bar{f} \cdot \bar{g}} \right]$
A.3. Correlación Cruzada Normalizada a cero (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \cdot [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \cdot \Delta g} \right]$
B. Criterios de Suma de Diferencias al cuadrado:	
B.1. Suma de Diferencias al cuadrado (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$
B.2. Suma de Diferencias al cuadrado Normalizadas (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
B.3. Suma de Diferencias al cuadrado Normalizadas a cero (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$

Figura 17-Criterios de correlación DIC.

Donde:

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2}$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j)]^2}$$

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j)$$

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

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

2.2.2 Procesamiento de las imágenes.

Para el procesamiento de las imágenes del DIC 2D se utilizará un software desarrollado por la casa Correlated Solutions, llamado VIC 2D.

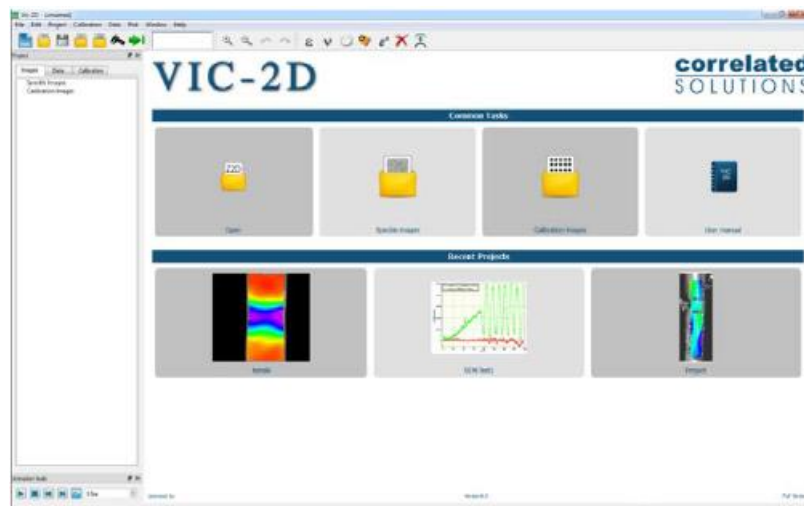


Figura 18-Interface del software VIC 2D.

2.3 Resolución teórica a problemas clásicos

Para el posterior análisis de resultados obtenidos en el presente trabajo será necesario conocer las soluciones teóricas de los diferentes elementos sometidos a ensayo con el fin de poder comparar estas soluciones analíticas con las

experimentales obtenidas. Para ello se exponen a continuación las diferentes expresiones a partir de las cuales se pueden obtener la diferencia de tensiones principales y con ella obtener el orden de franja en cada punto mediante la ecuación fundamental de la elasticidad (*ecuación 10*).

2.3.1 Solución teórica de un disco sometido a compresión

La expresión para obtener la diferencia de tensiones principales en un disco sometido a compresión diametral es **[4]**:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{4PR}{\pi t} * \frac{R^2 - (x^2 + y^2)}{(R^2 + x^2 + y^2)^2 - 4y^2R^2} \quad (25)$$

Donde:

- P = Carga aplicada (en Newton).
- R = Radio del disco (en mm).
- t = Espesor del disco (en mm).
- “x” e “y” = Coordenadas del punto a estudiar (en mm).

2.3.2 Solución teórica de un anillo sometido a compresión diametral

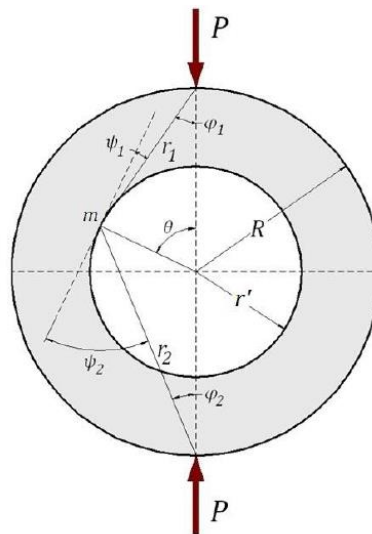


Figura 19– Anillo comprimido por dos fuerzas opuestas diametrales.

Para obtener la solución teórica del anillo sometido a compresión diametral se utiliza el método de superposición [14]:

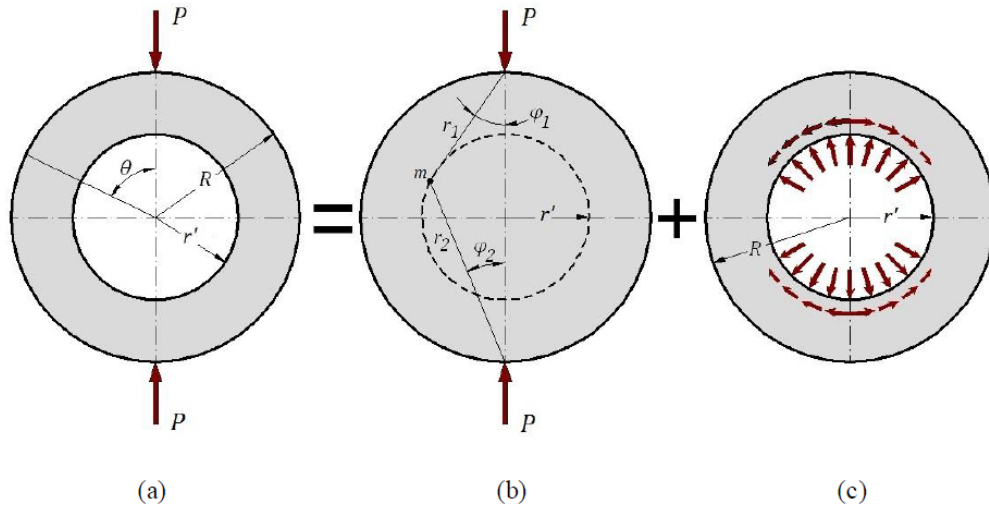


Figura 20– Descomposición de las fuerzas en el anillo.

Para estas condiciones y en coordenadas polares se obtienen las siguientes expresiones:

$$\sigma_r = \frac{2P}{\pi l R} \left[\frac{1}{2} - \frac{(1 - \frac{r}{R} \cos \theta)(\cos \theta - \frac{r}{R})^2}{\left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 + 1 - 2 \frac{r}{R} \cos \theta \right]^2} - \frac{(1 + \frac{r}{R} \cos \theta)(\cos \theta + \frac{r}{R})^2}{\left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 + 1 + 2 \frac{r}{R} \cos \theta \right]^2} \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{2P}{\pi l R} \left[\frac{1}{2} - \frac{(1 - \frac{r}{R} \cos \theta) \sin^2 \theta}{\left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 + 1 - 2 \frac{r}{R} \cos \theta \right]^2} - \frac{(1 + \frac{r}{R} \cos \theta) \sin^2 \theta}{\left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 + 1 + 2 \frac{r}{R} \cos \theta \right]^2} \right] \quad (26)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{2P}{\pi l R} \sin \theta \left[\frac{1}{2} - \frac{(1 - \frac{r}{R} \cos \theta)(\cos \theta - \frac{r}{R})^2}{\left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 + 1 - 2 \frac{r}{R} \cos \theta \right]^2} - \frac{(1 + \frac{r}{R} \cos \theta)(\cos \theta + \frac{r}{R})^2}{\left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 + 1 + 2 \frac{r}{R} \cos \theta \right]^2} \right]$$

Donde:

- R= radio externo del anillo (mm).

- r = punto del radio donde se calcula la tensión (mm).
- P = carga aplicada (N).
- l = espesor del anillo (mm).

Para calcular la tensión en los ejes de simetría será necesario sustituir θ por el valor que corresponda en cada caso. **Para el eje x $\theta = 90^\circ$ y para el eje y $\theta = 0$.**

2.3.3 Solución teórica de una placa con concentrador de tensiones

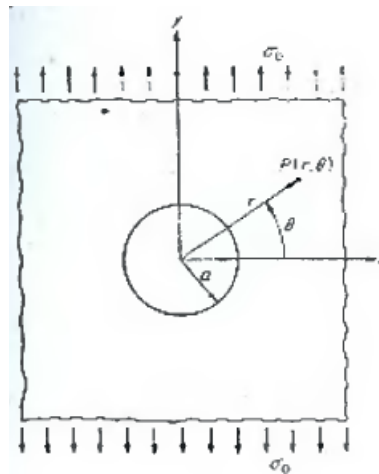


Figura 21- Placa con agujero central sometida a tracción.

La solución teórica de este problema se obtiene aplicando el método de superposición [7]:

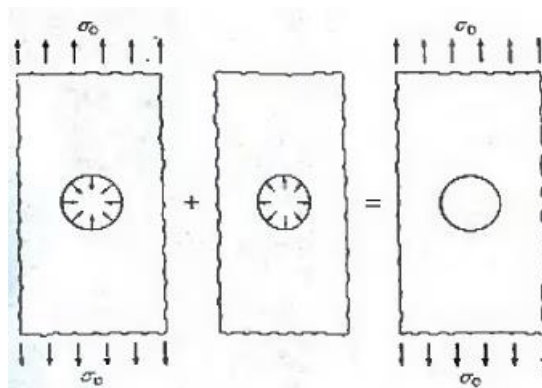


Figura 22- Método de superposición.

Las ecuaciones obtenidas para la tensión a la que está sometido el eje x son:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{x^2}\right) \frac{3a^2}{x^2}$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_0}{2} \left(2 + \frac{a^2}{x^2} + \frac{3a^4}{x^4}\right) \quad (27)$$

$$\tau_{xy} = 0$$

De manera similar se pueden obtener las expresiones para el eje y:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_0}{2} \left(2 - \frac{5a^2}{y^2} + \frac{3a^4}{y^4}\right)$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{a^2}{y^2} - \frac{3a^4}{y^4}\right) \quad (28)$$

$$\tau_{xy} = 0$$

3 OBJETIVOS DEL TRABAJO

En el presente trabajo los principales objetivos a cumplir se dividirán en dos grupos:

3.1 Objetivos de investigación

Consistentes en corroborar que los análisis experimentales basados en la fotoelasticidad y el DIC se corresponden posteriormente con las soluciones teóricas que existen para los diferentes casos estudiados.

Para ellos se realizará un programa experimental que nos permita obtener, mediante los diferentes softwares de procesamiento de las imágenes, el valor de la diferencia de tensiones principales para todos los puntos del objeto y con ello el orden de franja (*según ec.10*). A partir de ellos podremos compararlos con los valores que se obtienen del análisis teórico confirmando así la correspondencia entre ambos métodos de estudio.

3.2 Objetivos docentes

Por otro lado, existen también objetivos docentes puesto que se trata de un trabajo en el que se pondrán en práctica gran parte de conocimientos adquiridos durante el grado, mayormente en el ámbito de la elasticidad y resistencia de materiales.

También se adquiere otros nuevos conocimientos como puede ser el trabajo con las herramientas y maquinaria utilizada en el taller durante el proceso de ensayos y por último el descubrimiento de cómo funciona la fotoelasticidad, que es un método en el que no se había profundizado durante la época de estudios pero que ahora se conoce en profundidad tras la realización del presente trabajo.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental seguido para la realización del trabajo ha consistido en ensayos de compresión para los discos y el anillo y ensayos de tracción para la placa con agujero.

Concretamente se han ensayado dos diámetros de disco (60 y 80 mm), aunque inicialmente se propusieron tres diámetros, pero tras los primeros ensayos se descartó el diámetro de 40 mm debido a que las imágenes y resultados posteriores no eran correctos, se ha ensayado también un anillo a compresión y finalmente dos tipos de placa con agujero central, de 20 y 30 mm de diámetro. El espesor de todas las probetas era el de la plancha de policarbonato, 5 mm. Todos ellos han sido ensayados mediante el polariscopio a transmisión, a reflexión y con DIC 2D.

El material de las probetas es el policarbonato extruido, material que fue proporcionado por la Universidad de Jaén. El mecanizado de dicho material también ha sido motivo de estudio durante el presente trabajo puesto que en un principio se intentaron realizar las diferentes probetas en las instalaciones de la universidad, pero las herramientas de las que esta disponía no aportaban acabados suficientemente adecuados a los ensayos que se iban a realizar por lo que finalmente se optó por realizar el mecanizado mediante corte por chorro de agua.

Esto se realizó a través de una empresa externa llamada *“Ingeniería Mecánica y Control, S.L.”*. Dicha empresa cuenta con herramientas de corte por inyección de agua, técnica muy precisa, con tolerancias muy pequeñas y que proporciona acabados con la suficiente precisión para los ensayos posteriores. También se consigue mediante esta técnica reducir considerablemente las tensiones residuales que aparecen en el mecanizado.

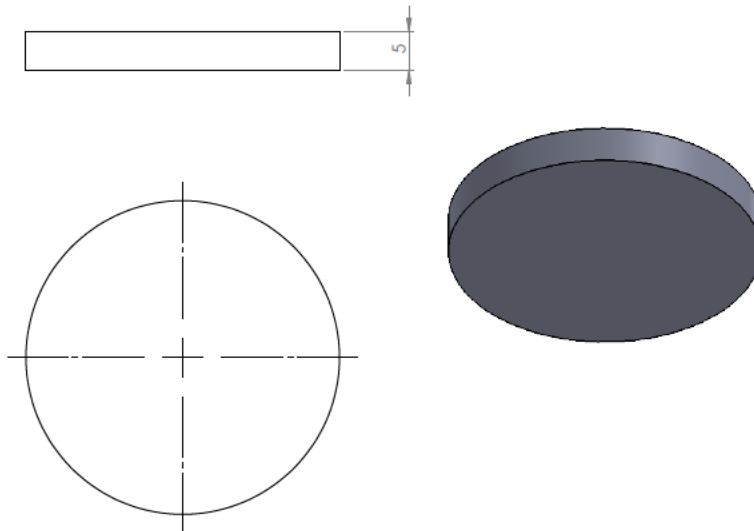


Figura 23- Diferentes imágenes tomadas en taller durante la producción de las piezas.

4.1 Piezas ensayadas

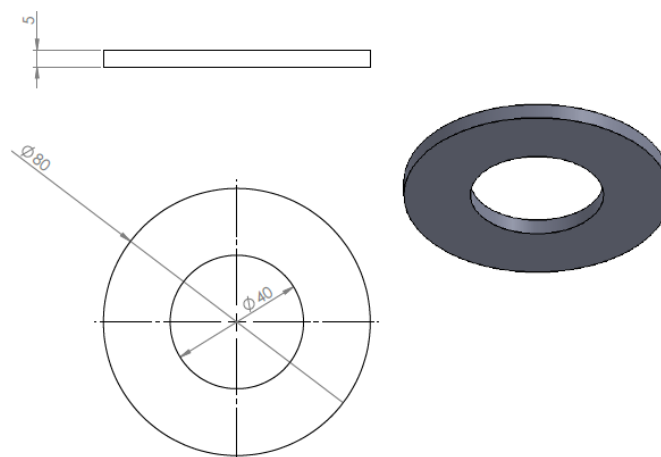
Se muestran los planos de cada uno de los tipos de probetas que fueron mecanizados para su posterior ensayo.

4.1.1 Discos de 80 y 60 mm de diámetro

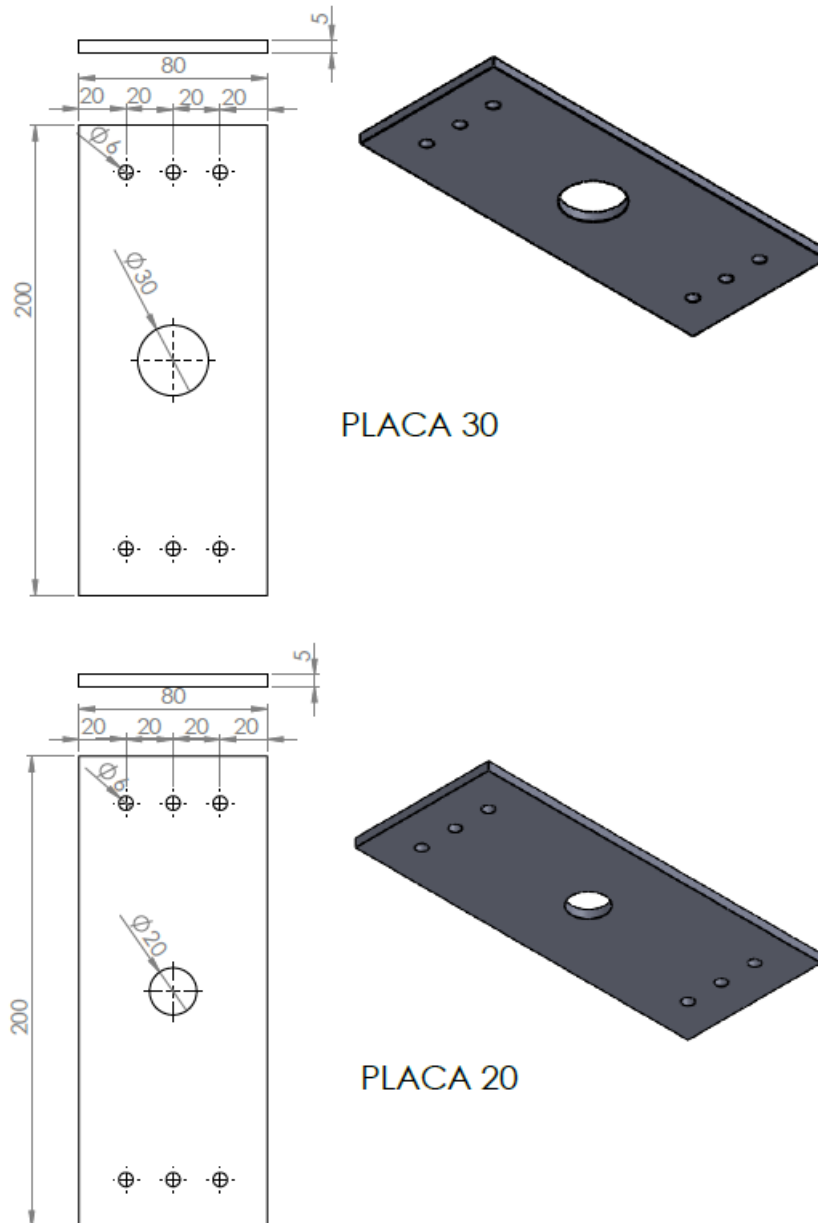


NOMBRE	DIAMETRO (mm)
DISCO 80	80
DISCO 60	60
DISCO 40	40

4.1.2 Anillo de 80 mm de diámetro



4.1.3 Placa con agujero de 20 y 30 mm de diámetro



4.2 Equipos utilizados.

Los ensayos del presente trabajo se llevaron a cabo en las instalaciones de la Escuela Politécnica Superior de Jaén con la maquinaria y herramienta de la que allí

se dispone. A continuación, se comentan las características de cada una de esas herramientas.

4.2.1 Máquina de tracción-compresión:

Para los ensayos de compresión de los diferentes especímenes se ha utilizado una máquina de tracción marca *INSTRON*, modelo 5567A, de una capacidad máxima de carga de 30 kN. Para el control de dicha máquina se utilizó el software correspondiente desde el PC del laboratorio.

Para la aplicación de la compresión diametral en los discos y el anillo se ha usado el útil accesorio de la figura 21, acoplado a la máquina de tracción.



Figura 24- Máquina de tracción INSTRON y accesorio para obtener compresión diametral.

4.2.2 Banco de carga para ensayos de tracción:

En el caso de los ensayos de tracción de las placas, y debido a las mordazas que no podían ser acopladas a la máquina anterior, se utilizó el banco de carga manual.

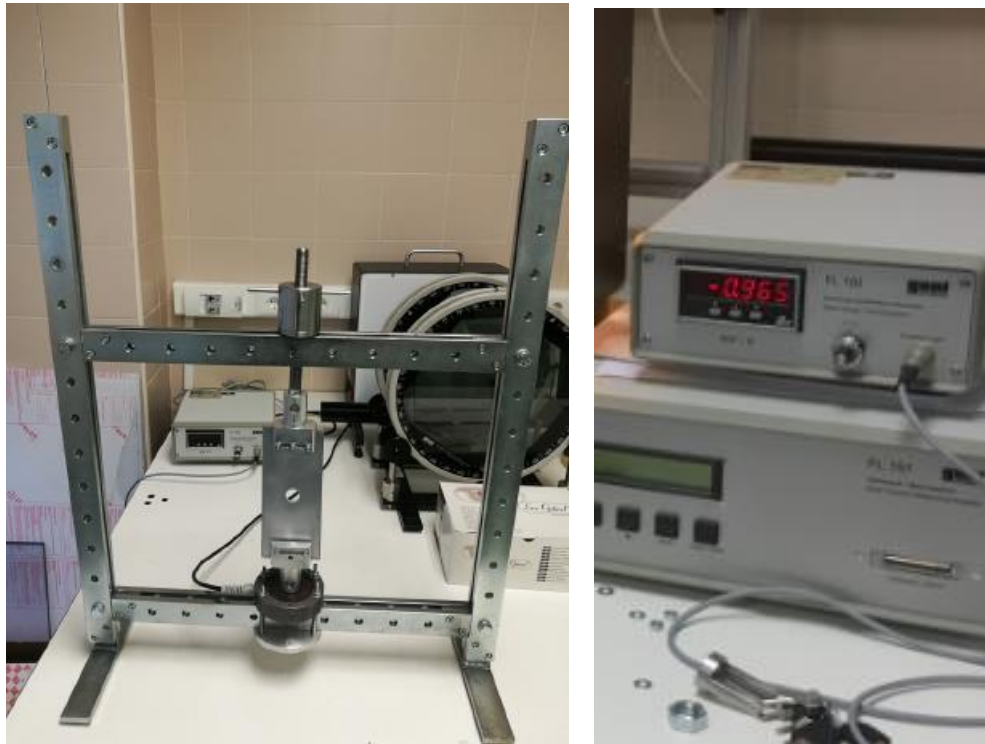


Figura 25- Banco de carga manual y elementos de medición de la célula de carga.

Este útil hace uso de una célula de carga la cual será necesario calibrar antes de comenzar. Para ello lo primero es colocar la célula en la barra superior, con el sensor hacia abajo, y se pone el medidor a 0. A continuación, se van añadiendo diferentes pesos y tomando nota de las lecturas que ofrece el display para poder finalmente realizar un ajuste por regresión lineal y obtener el valor exacto de la carga que corresponde con la medida mostrada en el display.

4.2.3 Equipos del polariscopio a transmisión:

En los ensayos de fotoelasticidad con el polariscopio de transmisión se ha utilizado un polariscopio circular de la marca GUNT, modelo FL 200:

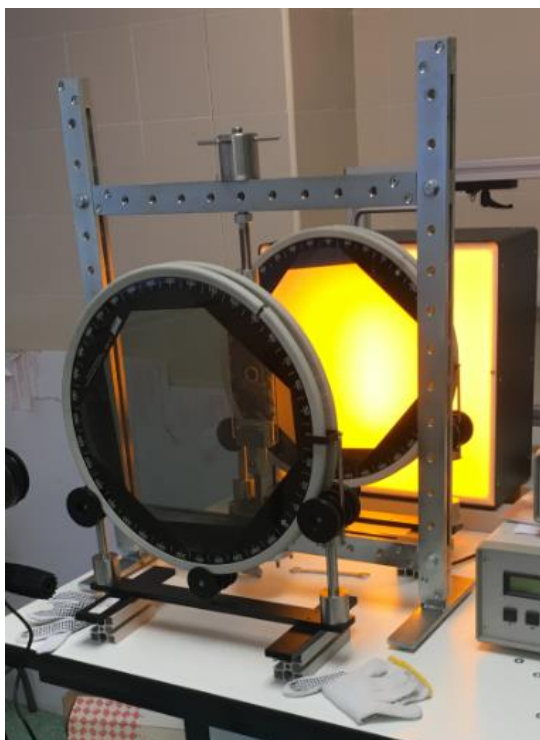


Figura 26- Montaje del polariscopio a transmisión.

Los elementos de los que se compone el polariscopio a transmisión son:

- Dos láminas de cuarto de onda (segundo y tercer disco en la figura 21)
- Dos filtros de polarización (primer y cuarto disco en la figura 21)
- Fuente de luz blanca y luz monocromática cuyas características son:

FUENTE DE LUZ	
Luz blanca	Un tubo fluorescente TL-E 32W Dos bombillas, lámpara tipo vela, interior mate E14, 230v y 25W
Luz monocromática	Una lámpara de vapor de sodio SOX 35, 35W

Tabla 3 – Características de la fuente de luz usada en los ensayos de transmisión.

Tanto los analizadores como las láminas de cuarto de onda de este modelo vienen graduados por sus ejes lo que facilita a la hora de la realización del método de Phase-Stepping.

La captura de las diferentes imágenes se ha llevado a cabo con una cámara fotográfica de la marca CANON, modelo EOS 1300D:



Figura 27– Cámara fotográfica utilizada para la toma de imágenes.

Las características de la cámara son:

Sensor de imagen	22.3 mm x 14.9 mm
Píxeles efectivos	18.0 megapíxeles
Formato	3:2
Autoenfoco	Si
Monitor LCD	TFT de 3.0"
Angulo de visión	170°
Flash	Si
Resolución de imagen	Hasta 5184 x 3456
Conectividad	Transmisión Wi-Fi, NFC
Dimensiones	129.0 x 101.3 x 77.6 mm
Peso	485 g

Tabla 4– Características de la cámara fotográfica.

4.2.4 Equipos del polariscopio a reflexión:

En los ensayos de fotoelasticidad a reflexión se ha utilizado un polariscopio circular, modelo LFZ/2 de la empresa Vishay Micro-Measurements compuesto por:

- Dos láminas de cuarto de onda.
- Dos filtros de polarización.
- Fuente de luz blanca.
- Soporte para el equipo y la cámara (se utiliza la misma cámara que para transmisión).
- Trípode ajustable.



Figura 28- Montaje del polariscopio a reflexión.

En este punto cabe destacar que surgieron problemas a la hora de realizar los ensayos del polariscopio a reflexión puesto que los elementos anteriormente descritos solo contaban con una fuente de luz blanca y para nuestro programa experimental era necesaria una luz monocromática igual que teníamos para el polariscopio a transmisión.

Después de un estudio del problema y una búsqueda de posibles soluciones se optó por utilizar la fuente de luz monocromática del polariscopio a transmisión como fuente de luz y para ello se desmonto la fuente de luz blanca del trípode a reflexión y se acopló la luz monocromática como se muestra en la *figura 29*.

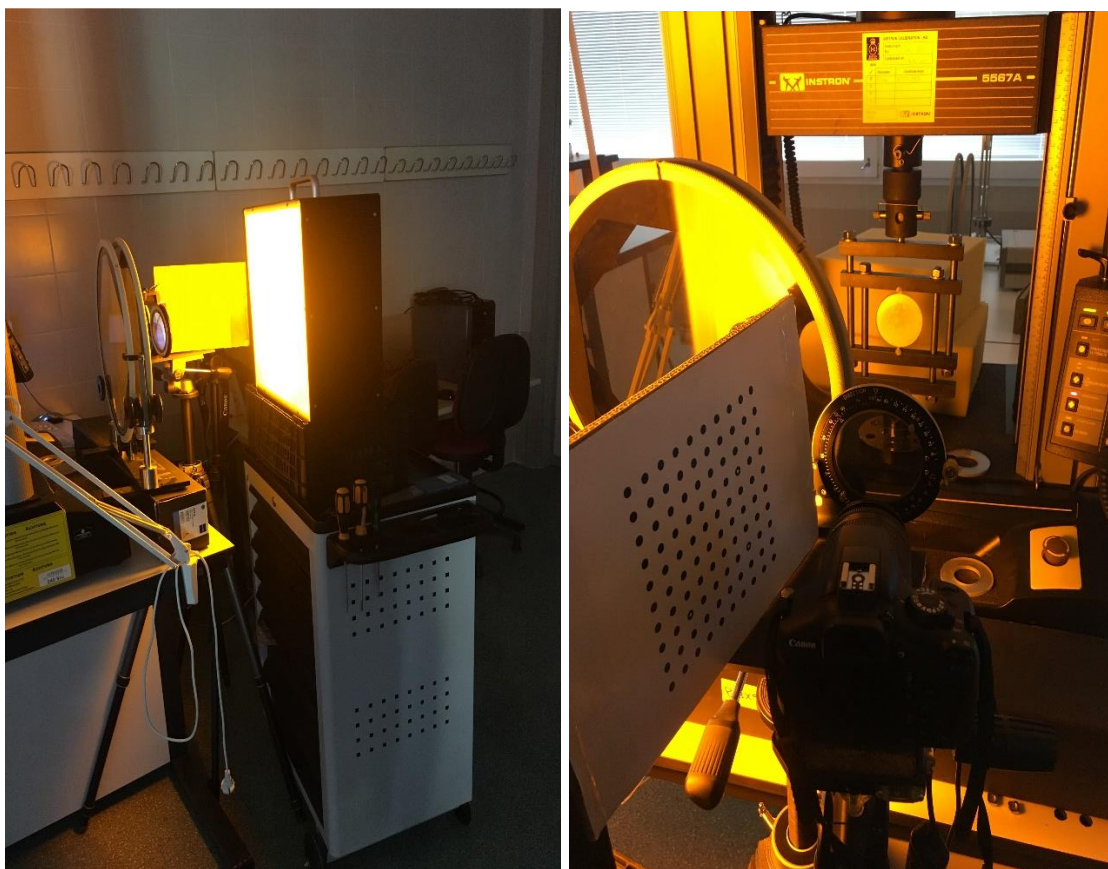


Figura 29– Montaje de la fuente monocromática en el polariscopio a reflexión.

Esta solución provocaba a su vez que, puesto que los discos del polarizador y la lámina de cuarto de onda eran de menor tamaño que los del polariscopio a transmisión, la luz monocromática sin polarizar que pasaba alrededor de los platos “se comiera” la luz polarizada y no se podía analizar la pieza. Para solucionar esto se utilizaron el polarizador y la primera lamina de cuarto de onda del polariscopio a transmisión y una vez montado se comprobó que el problema quedaba resuelto.

La preparación de las probetas para estos ensayos ha consistido en recubrirlas con una pintura de spray metalizada:



Figura 30– Preparación de las piezas para los ensayos a reflexión.

El método de incremento de fase en el polariscopio a reflexión es diferente a como se aplica para el polariscopio de transmisión. En este caso también consiste en la adquisición de 6 imágenes variando el ángulo de los diferentes platos de analizador y láminas de cuarto de onda per con diferentes valores y en diferente orden.

A continuación, se exponen las posiciones de los diferentes elementos para realizar las diferentes imágenes fotoelásticas que componen este método detallado en [9]:

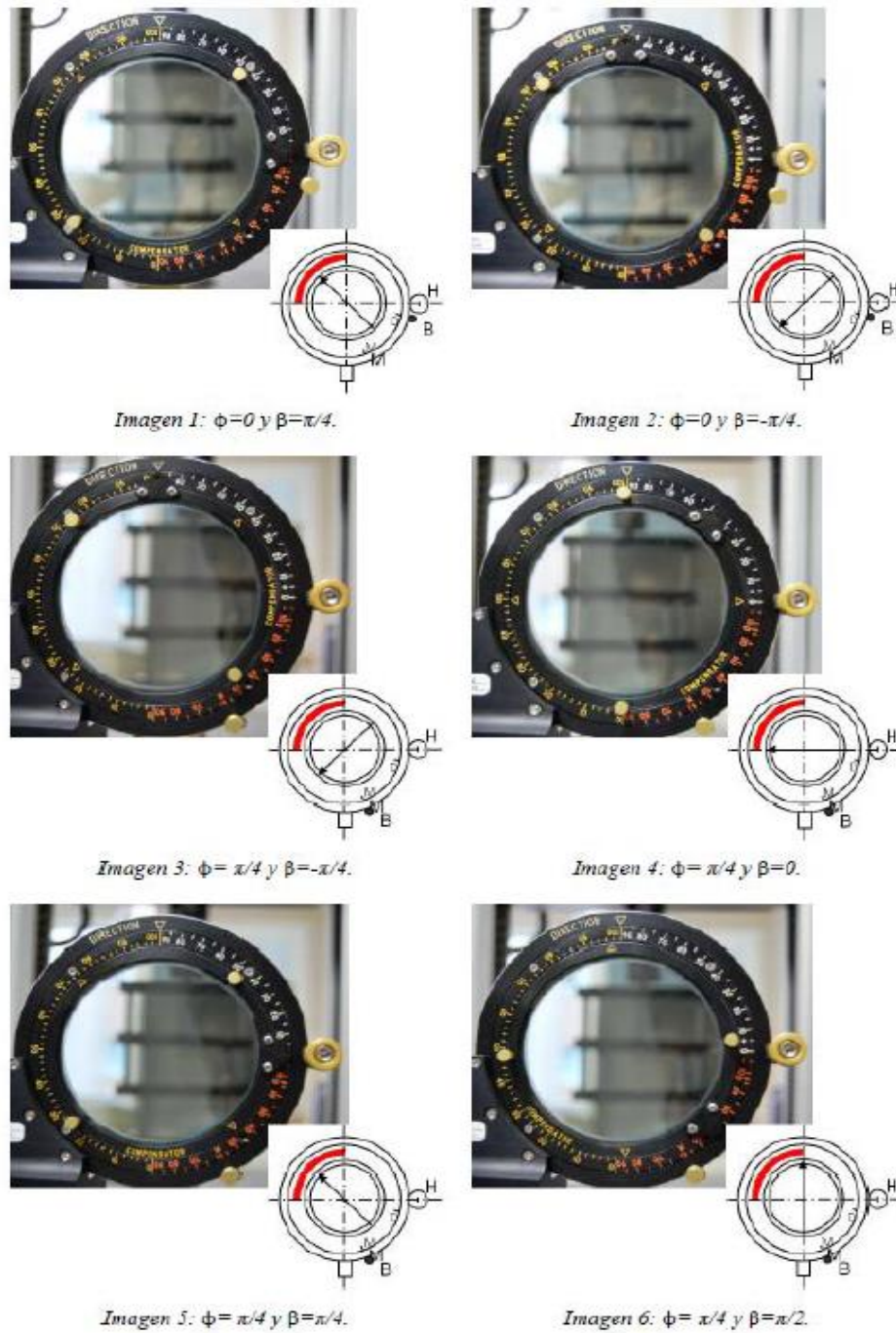


Figura 31– Posiciones de los diferentes elementos en el método de incremento de fase en reflexión [1].

4.2.5 Software COPA:

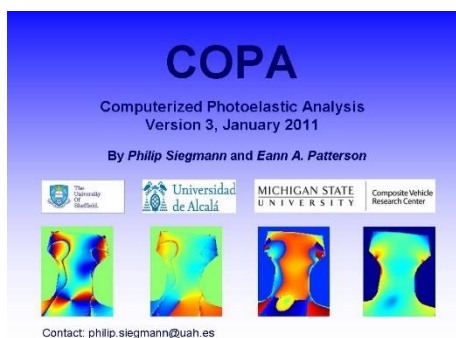


Figura 32– Portada del software COPA.

Para el procesamiento de las imágenes fotoelásticas y la obtención de los diferentes órdenes de franja se ha utilizado el software COPA. El funcionamiento de dicho software se resume en los siguientes pasos en los que se procesa una geometría sencilla, un disco sometido a compresión diametral, de la cual se conoce su solución teórica para poder así comparar los resultados obtenidos.

PASO 1: Tomar las 6 imágenes correspondientes con el método de incremento de fase descrito anteriormente.

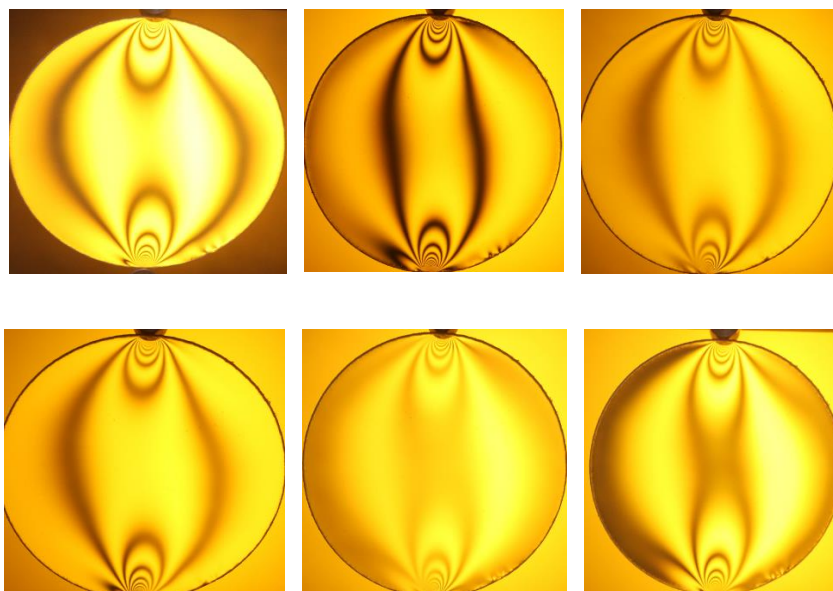


Figura 33– 6 imágenes del método de incremento de fase ordenadas de izquierda a derecha y de arriba abajo.

PASO 2: Abrir el MatLab y cargar en el directorio la carpeta donde se encuentra el software, a continuación, ejecutamos el programa escribiendo “copa” en la ventana de comandos.

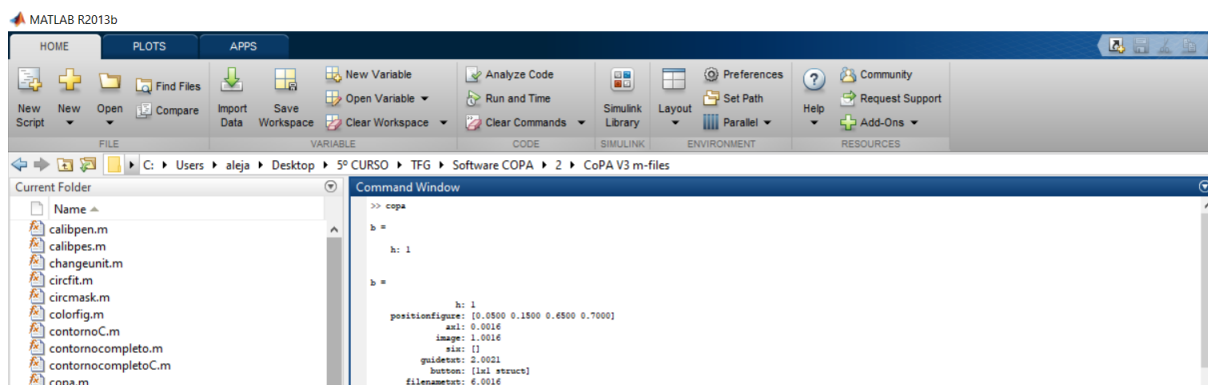


Figura 34– Inicio de COPA desde MatLab.

PASO 3: Una vez abierto el programa lo siguiente será cargar las 6 imágenes, pulsamos la opción de “*open .bmp*” y cargamos las 6 imágenes. El propio programa se encarga ya de combinarlas y obtener una única imagen que corresponde con el **mapa de isoclinas** que deberá ser desenvuelto por medio de los algoritmos del programa mediante el proceso de unwrapping. Antes de esto deberemos preparar la imagen.

Lo siguiente será crear una máscara de trabajo para delimitar la zona de interés de la pieza donde queremos realizar el procesamiento y obtener el orden de franja, y para ellos pulsaremos sobre la opción “*Create mask*”.

PASO 4: Una vez tenemos concretada la pieza que queremos estudiar seleccionamos la opción “*Wrapped Isochromatic Phase Map*” para obtener el **mapa de isocromáticas** envuelto.

PASO 5: Ahora seleccionamos la opción de “*Unwrapping*” para desenvolver la pieza y obtener finalmente el **mapa de isocromáticas** desenvuelto.

Una vez llegados a este punto hay que aclarar que en algunos casos la escala de valores puede no coincidir con la zona donde deberían obtenerse los valores máximos y mínimos, por ello las zonas rojas deben de coincidir con los lugares de

aplicación de la carga. En caso de que no coincida de esta forma se deberán invertir los valores y para esto tenemos la opción “*Invert*”.

PASO 6: Llega el momento de calibrar los valores obtenidos puesto que en la escala aparecen números negativos y esto no se corresponde con la realidad. Este proceso consiste en [15]:

- En la opción “*Units*” seleccionamos “*Fringe Order (N)*”.
- Observando la franja de valores interpolamos e identificamos el valor más negativo de dicha franja.
- Ingresamos este valor en la opción “*Fringe Order (N) at P*”. Y pulsamos la opción de “*Calibration in N*”, se abre entonces una ventana donde se señala el punto donde el orden de franja es el más pequeño. De esta manera se contrarresta el valor del orden de franja negativo.

PASO 7: Ya podemos obtener los valores del orden de franja en cualquier punto de la pieza. En nuestro caso obtendremos perfiles en los ejes de simetría vertical y horizontal mediante la opción “*Profile*”. Estos perfiles serán los que posteriormente se comparen que el resto de resultados.

4.2.6 Equipos del montaje para DIC 2D:

Para los ensayos de DIC 2D se ha empleado una cámara de la marca BASLER, modelo acA2440-75um con las siguientes características:

Sensor	IMX250
Resolución	2448 px x 2048 px (5MP)
Conectividad	USB 3.0

Tabla 5– Características de la cámara de DIC 2D.



Figura 35– Cámara usada en el DIC 2D.

4.3 Resultados obtenidos

4.3.1 Disco de 60 mm sometido a compresión diametral:

Se han realizado ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y con DIC 2D, y todos ellos bajo la misma carga de compresión, **204 N** para esta probeta, con el fin de poder comparar, a posteriori, los resultados obtenidos.

A modo de ejemplo se muestran las imágenes utilizadas para los procesados de los diferentes métodos, esto se mostrará solo del disco pues las imágenes no ofrecen una gran información a simple vista sin procesar.

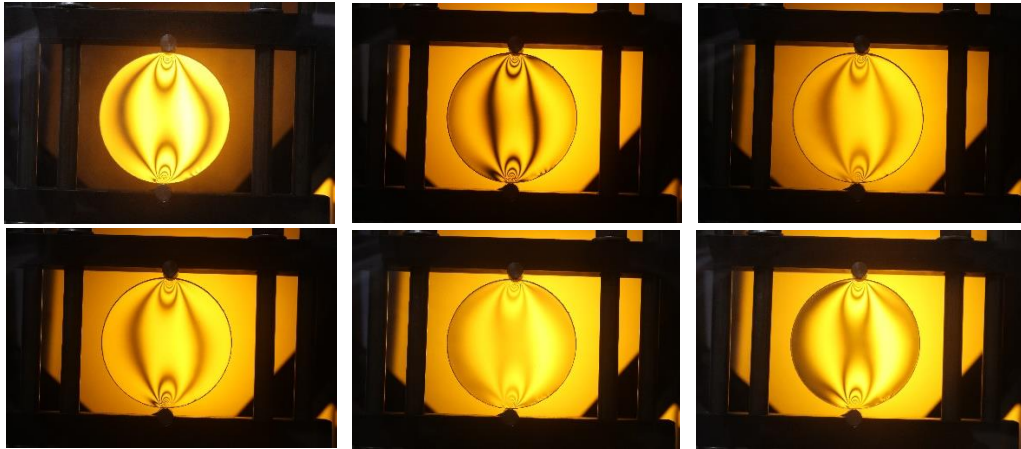
Polariscopio a transmisión:

Figura 36– Imágenes correspondientes al método de incremento de fase para el ensayo del disco a compresión bajo 204 N.

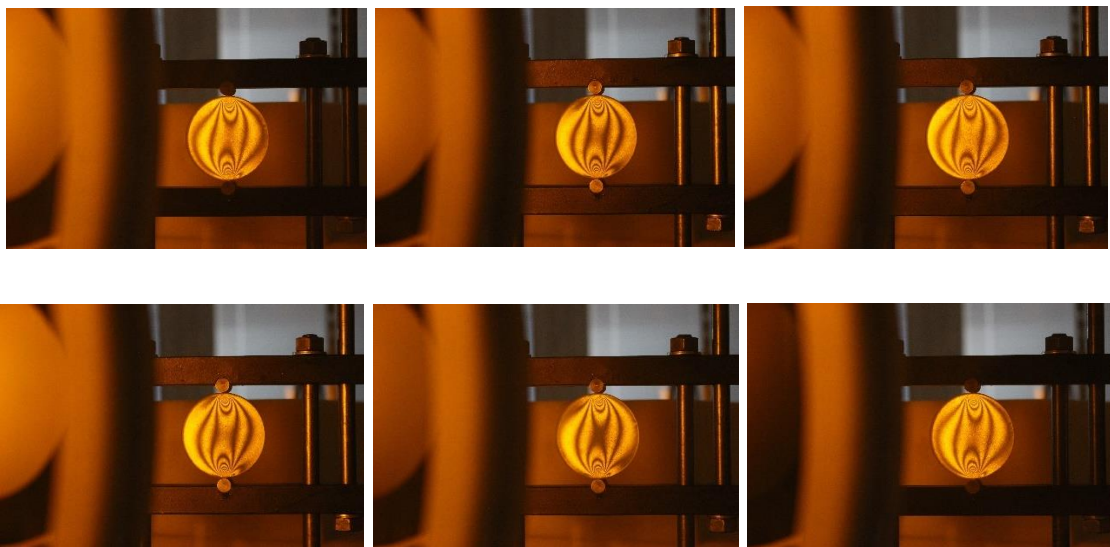
Polariscopio a reflexión:

Figura 37– Imágenes correspondientes al método de incremento de fase para el ensayo del disco a compresión bajo 204 N (reflexión).

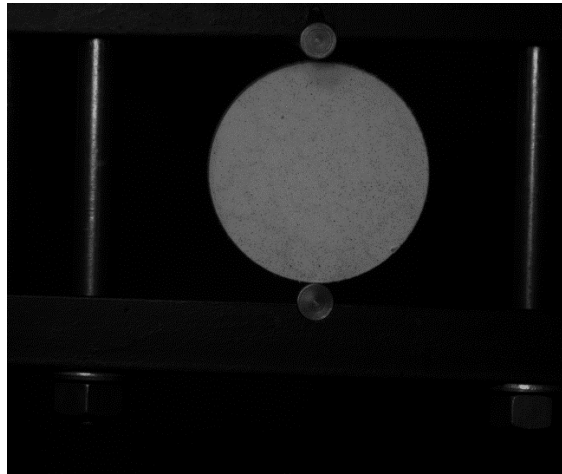
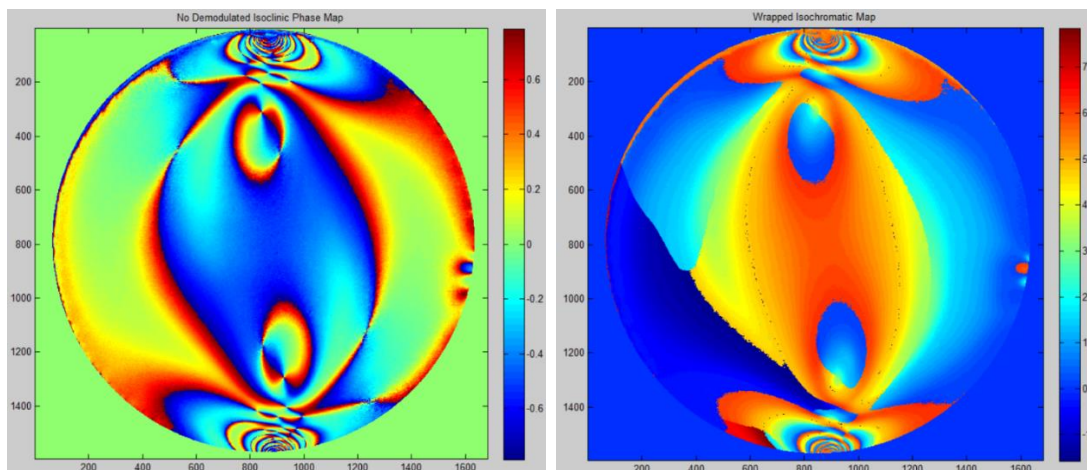
DIC 2D:

Figura 38– Imagen del ensayo de DIC para un disco a compresión.

Una vez terminado el procesamiento el software nos ofrece los distintos mapas de isoclinas e isocromáticas junto con el *unwrapping*, al igual que las imágenes anteriores, estos mapas a simple vista ofrecen poca información relevante por lo tanto se expondrán a modo de ejemplo para esta probeta, pero no para el resto. En próximos apartados se profundizará en la información que se puede extraer de estos mapas.



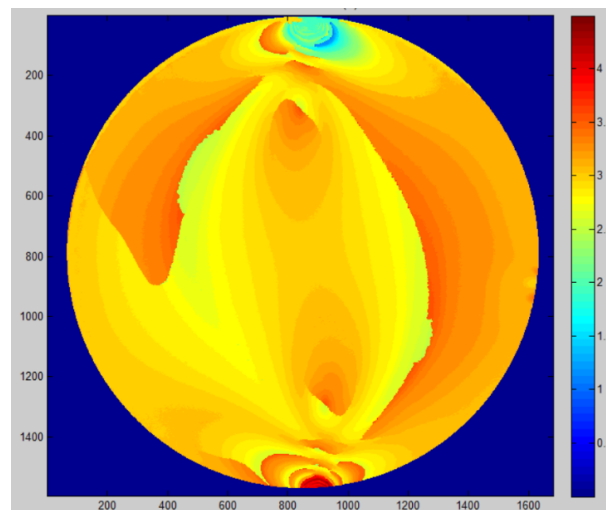


Figura 39– a) Mapa de isoclinas b) Mapa de isocromáticas c) *Unwrapping*.

En la figura 36 se observa la imagen del *unwrapping* junto a la distribución del orden de franja en los ejes vertical y horizontal.

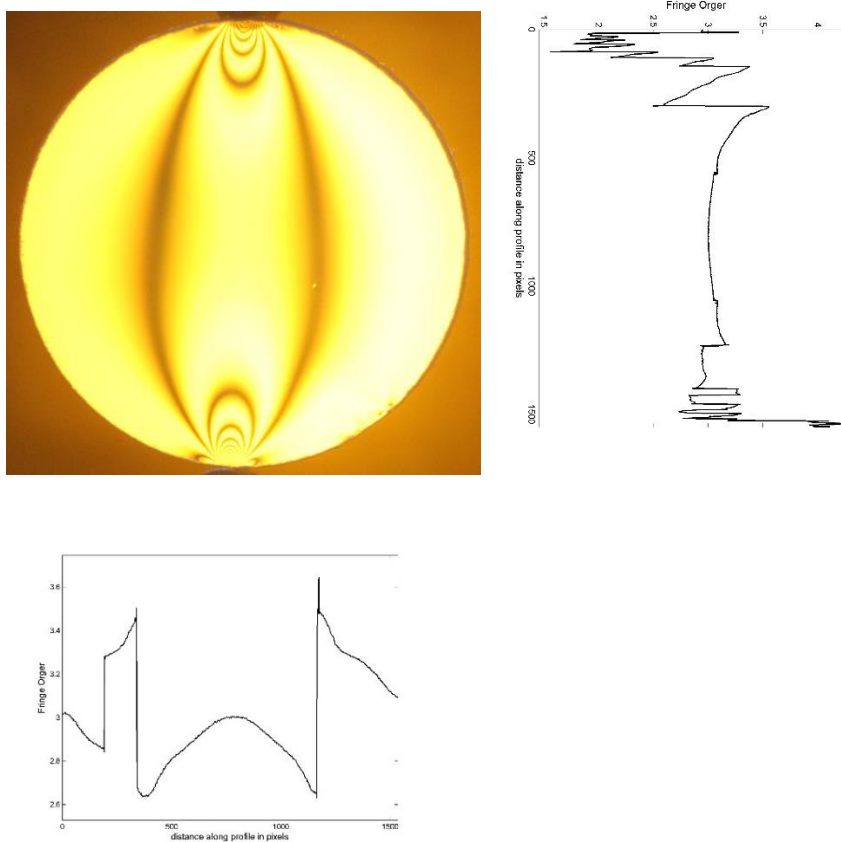


Figura 40– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.

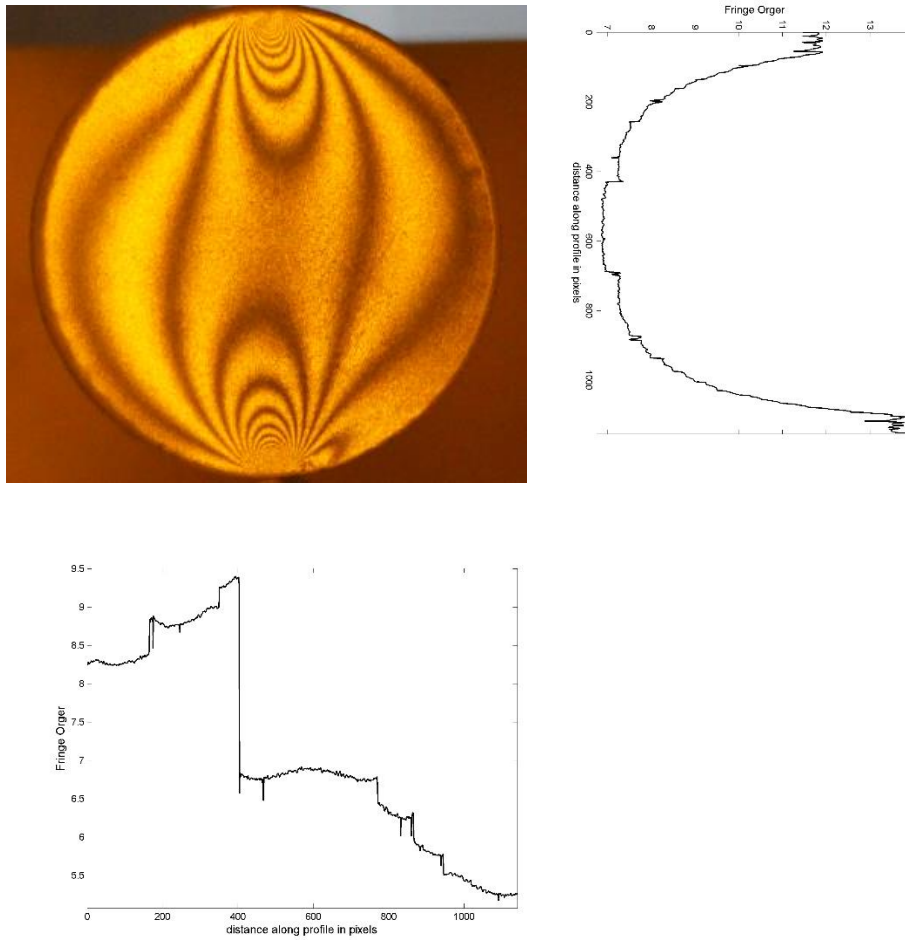


Figura 41– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en reflexión.

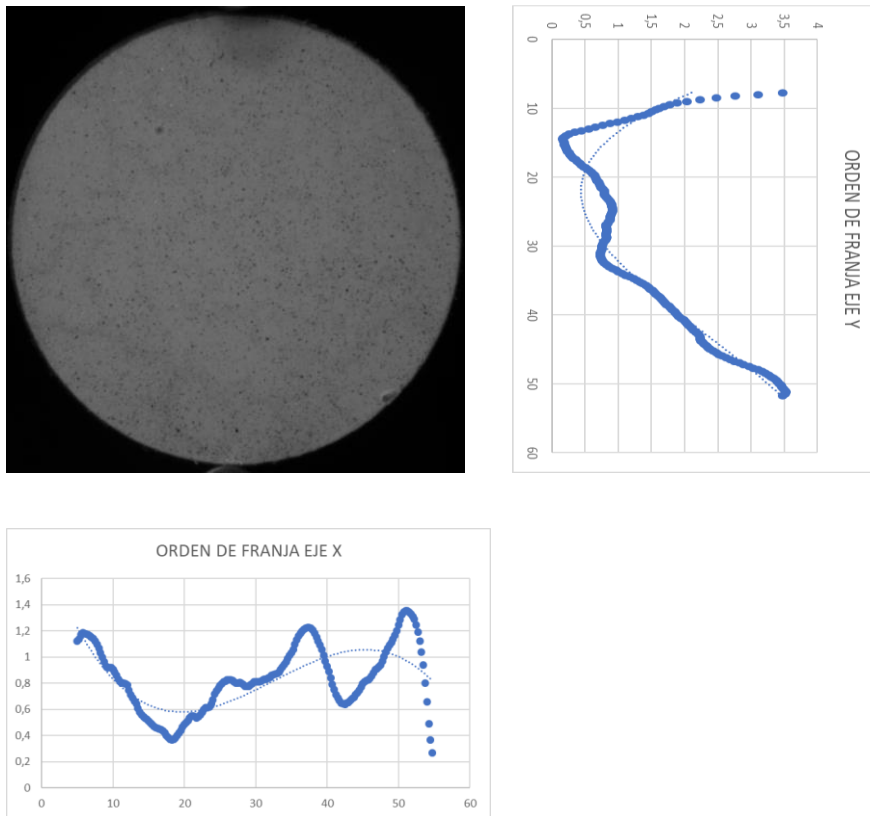


Figura 42– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.

4.3.2 Disco de 80 mm sometido a compresión diametral:

En este ensayo, la carga de compresión a la que fue sometido el disco fueron **258 N** obteniéndose la siguiente distribución del orden de franja.

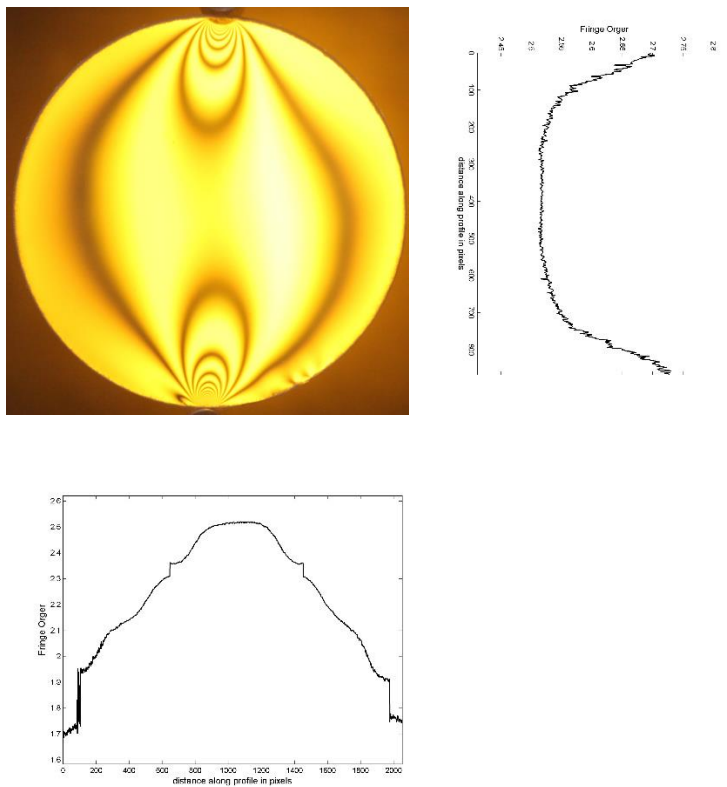


Figura 43– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.

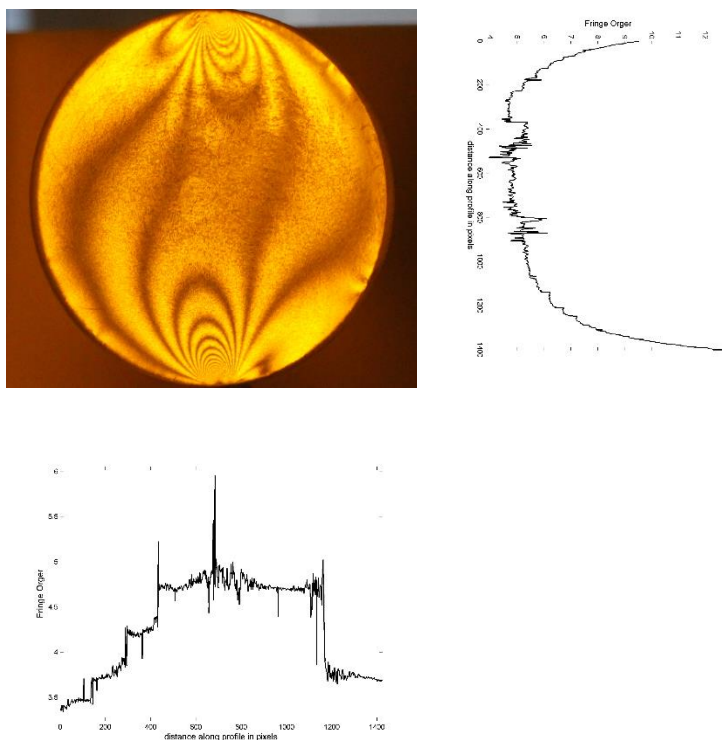


Figura 44– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en reflexión.

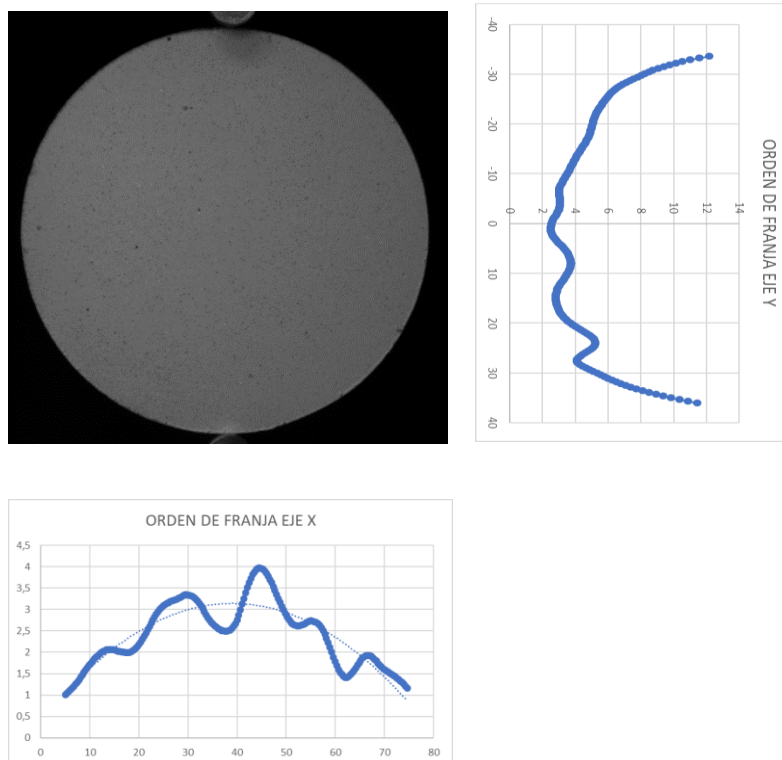


Figura 45– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.

4.3.3 Anillo de 80/40 mm sometido a compresión diametral:

En este ensayo la carga a la que fue sometido el anillo son **155 N** obteniéndose la siguiente distribución del orden de franja.

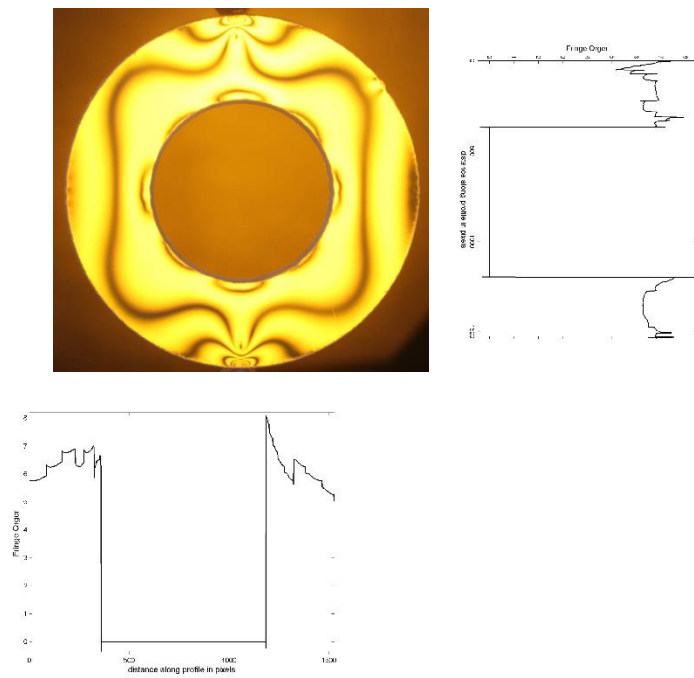


Figura 46– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.

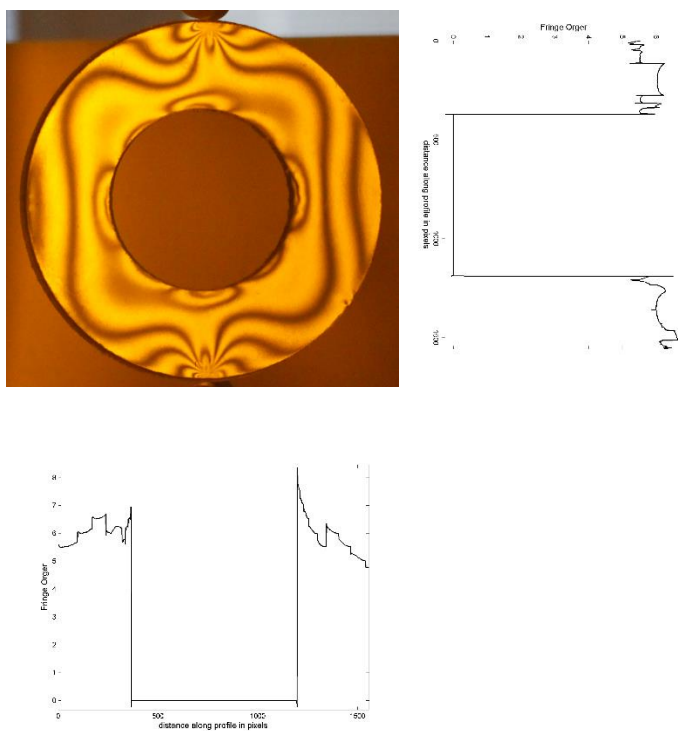


Figura 47– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en reflexión.

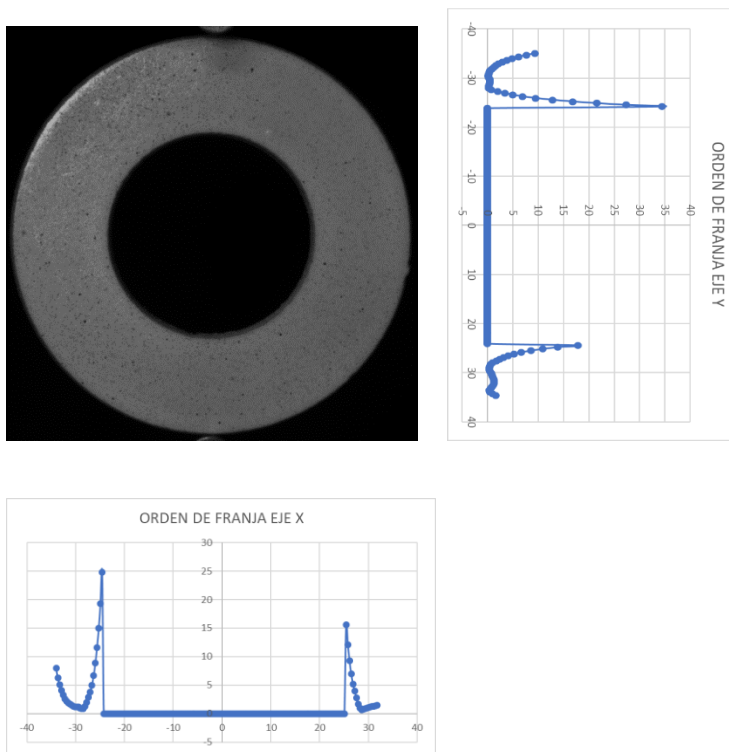


Figura 48– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.

4.3.4 Placa con agujero de 30 mm sometida a tracción:

En este ensayo la placa fue sometida a una tracción de 757,9 N obteniéndose la siguiente distribución del orden de franja.

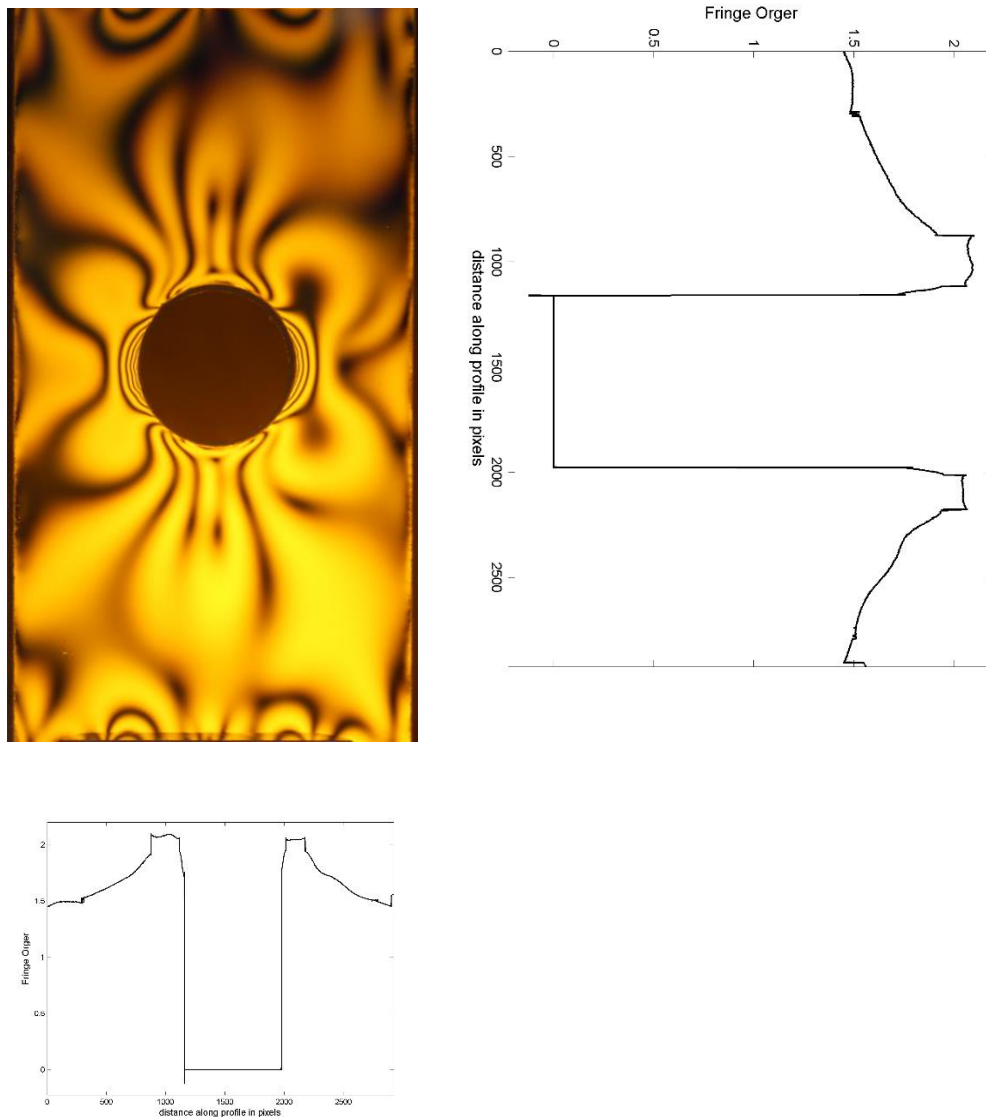


Figura 49– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.

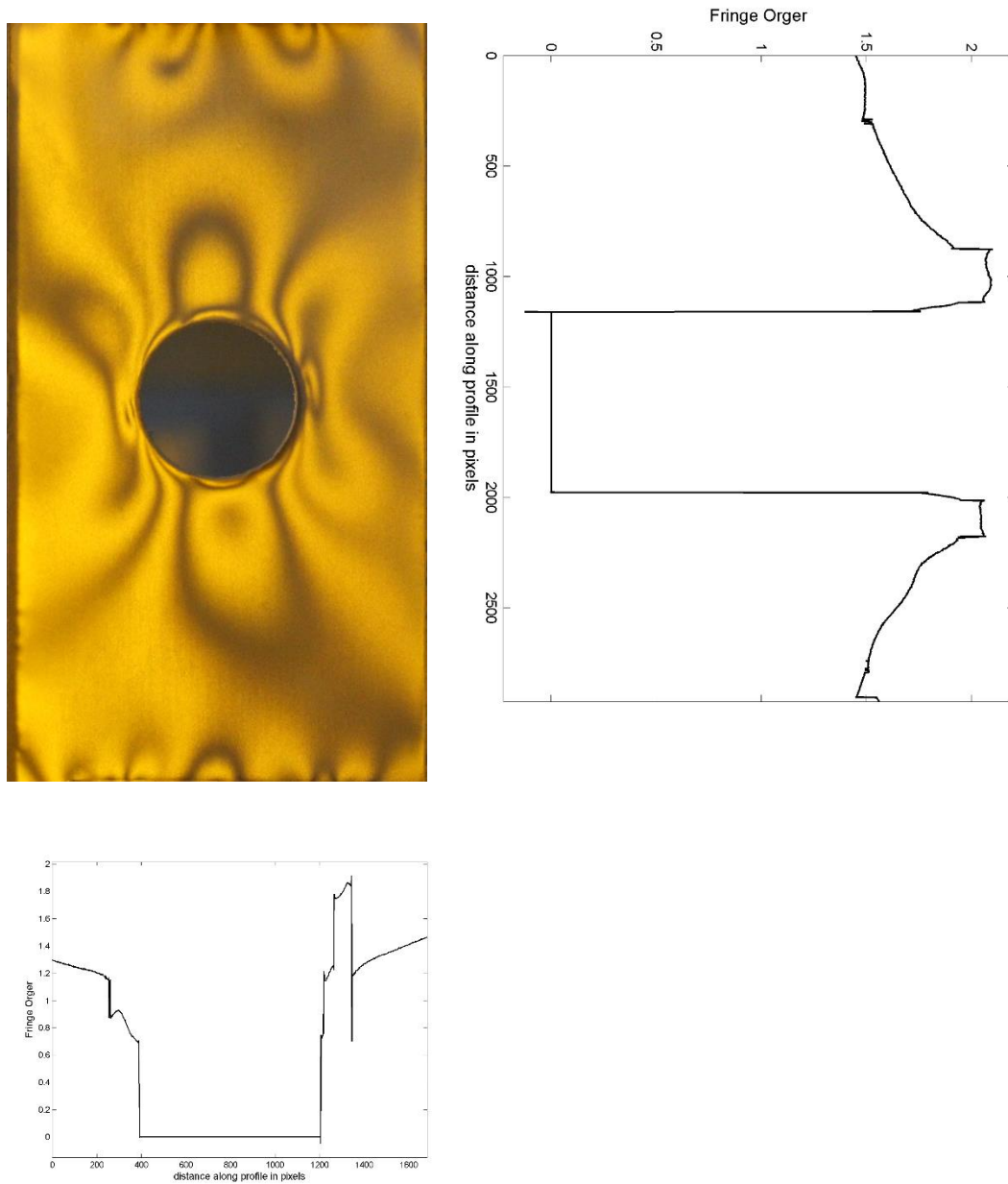


Figura 50– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.

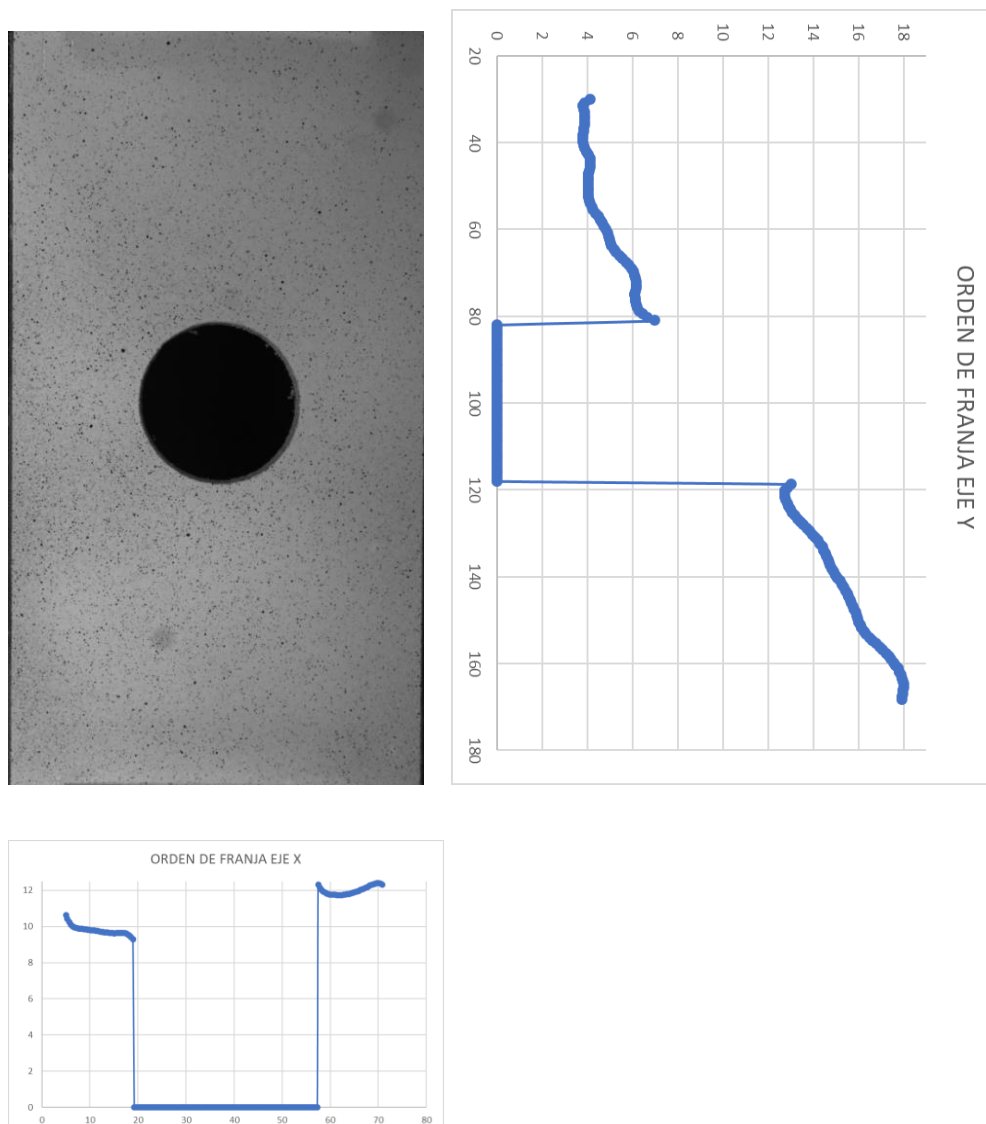


Figura 51– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.

4.3.5 Placa con agujero de 20 mm sometida a tracción:

En este ensayo la placa fue sometida a una tracción de 421 N obteniéndose la siguiente distribución del orden de franja.

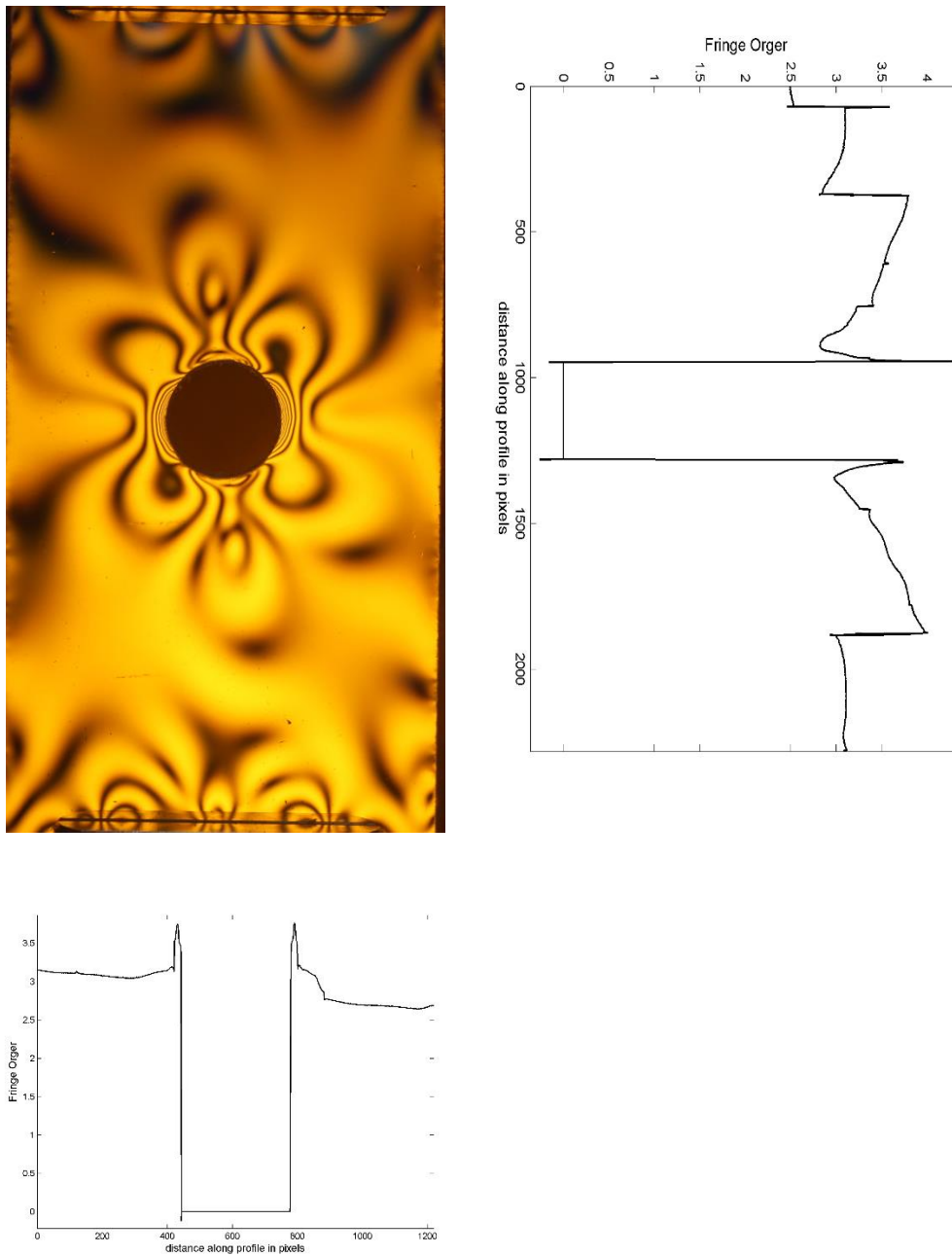


Figura 52– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en transmisión.

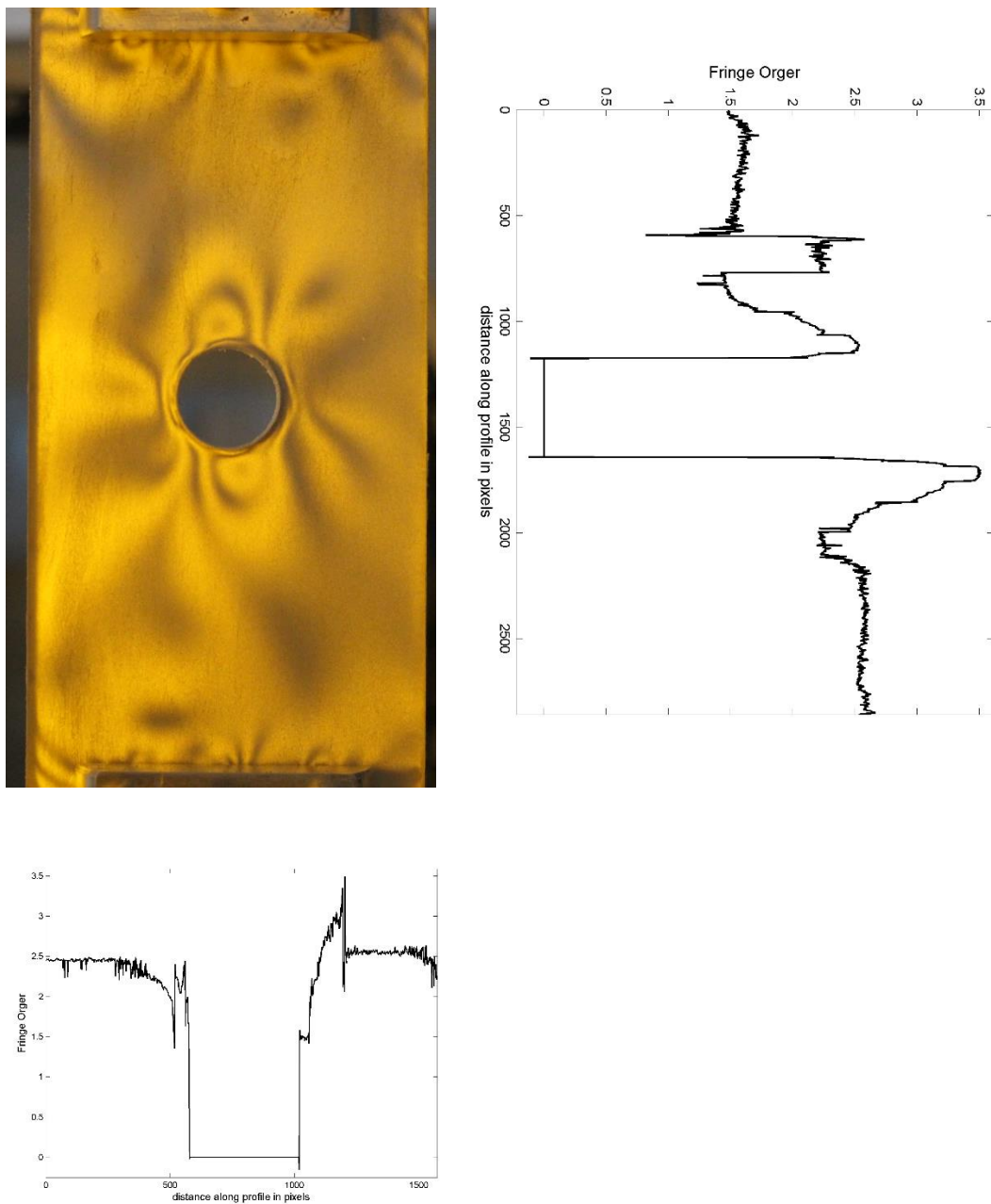


Figura 53– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en reflexión.

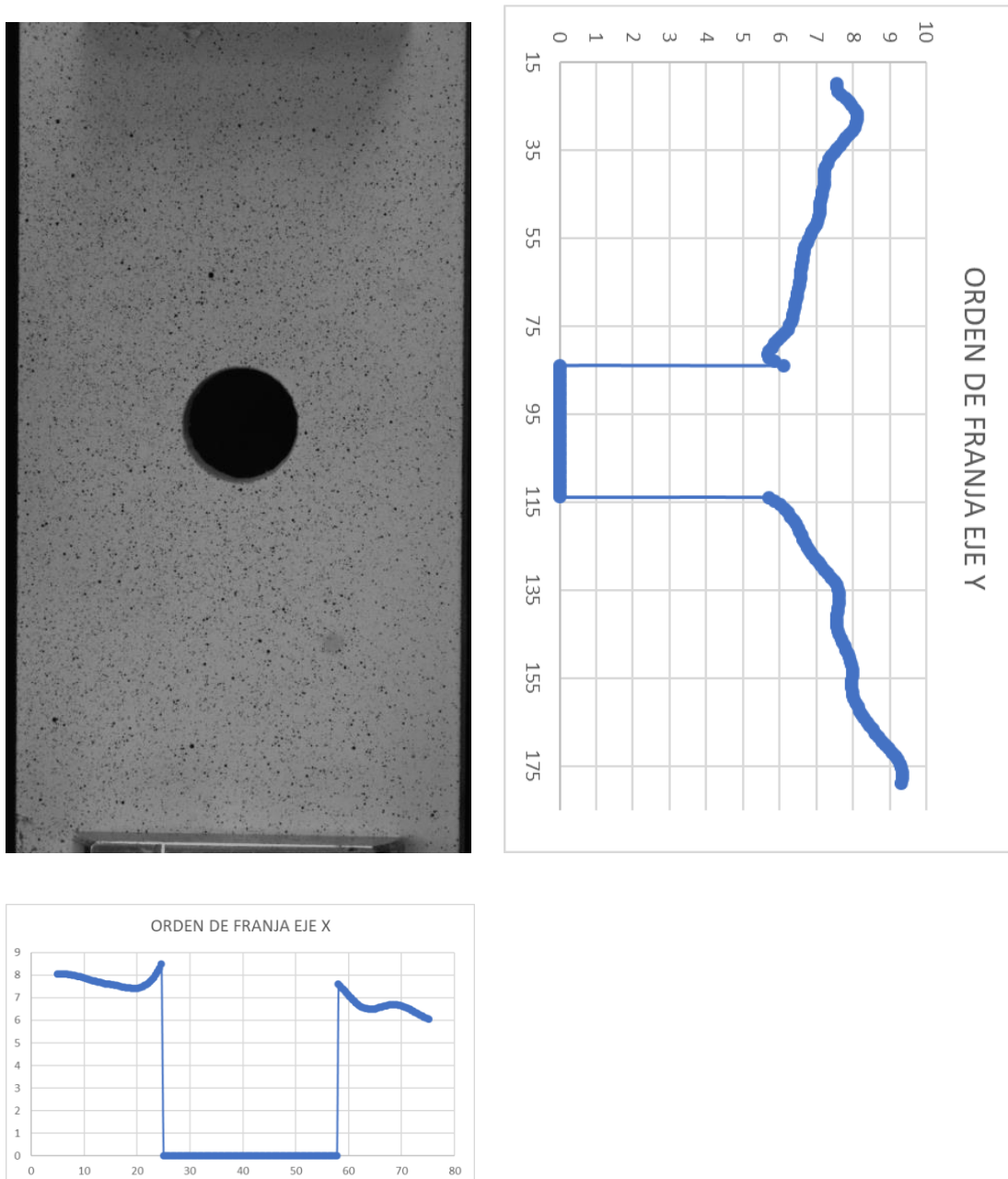


Figura 54– Orden de franja experimental a lo largo del eje x y eje y en DIC 2D.

5 ANALISIS DE RESULTADOS

En este apartado se analizarán los resultados anteriormente obtenidos con el fin de deducir conclusiones acerca de los diferentes métodos de análisis empleados. Para ello se aportarán gráficas comparativas donde se incluirán los resultados de los distintos métodos para cada pieza ensayada y de esta forma comprobar su grado de correspondencia con las soluciones teóricas, las cuales también se incluirán en las gráficas.

Con este fin se ha obtenido el orden de franja para cada uno de los métodos en dos de los ejes perpendiculares de simetría. El software Copa ofrecía directamente el orden de franja mientras que con DIC se han extraído los valores de las deformaciones principales en cada uno de los puntos de los ejes y a partir de ellas se han obtenido mediante la ecuación fundamental de la fotoelasticidad anteriormente desarrollada.

5.1 Discos a compresión:

5.1.1 Disco de 40 mm de diámetro:

Este disco no aparece en el programa experimental anteriormente desarrollado, pero se nombra en este apartado puesto que inicialmente formo parte de los planes de estudio. Sin embargo, tras realizarle numerosos ensayos y en todos ellos obtener resultados muy deficientes y sin ninguna correlación con las soluciones teóricas, se decidió retirar del estudio.

Después de analizar las posibles causas de la imposibilidad de estudiar este tipo de espécimen se llegó a la conclusión de que lo más probable era que al ser de un diámetro menor al ser cargado mínimamente aparecía una gran cantidad de franjas en las imágenes tomadas (*figura 55*) y esto es algo que impide un buen procesado de las imágenes como se explicará más adelante en el apartado de conclusiones.



Figura 55- Imagen del ensayo del disco de 40 mm a compresión diametral.

5.1.2 Disco de 60 mm de diámetro:

La siguiente grafica agrupa las soluciones teóricas, a transmisión, a reflexión y por DIC 2D obtenidas en cada uno de los ensayos.

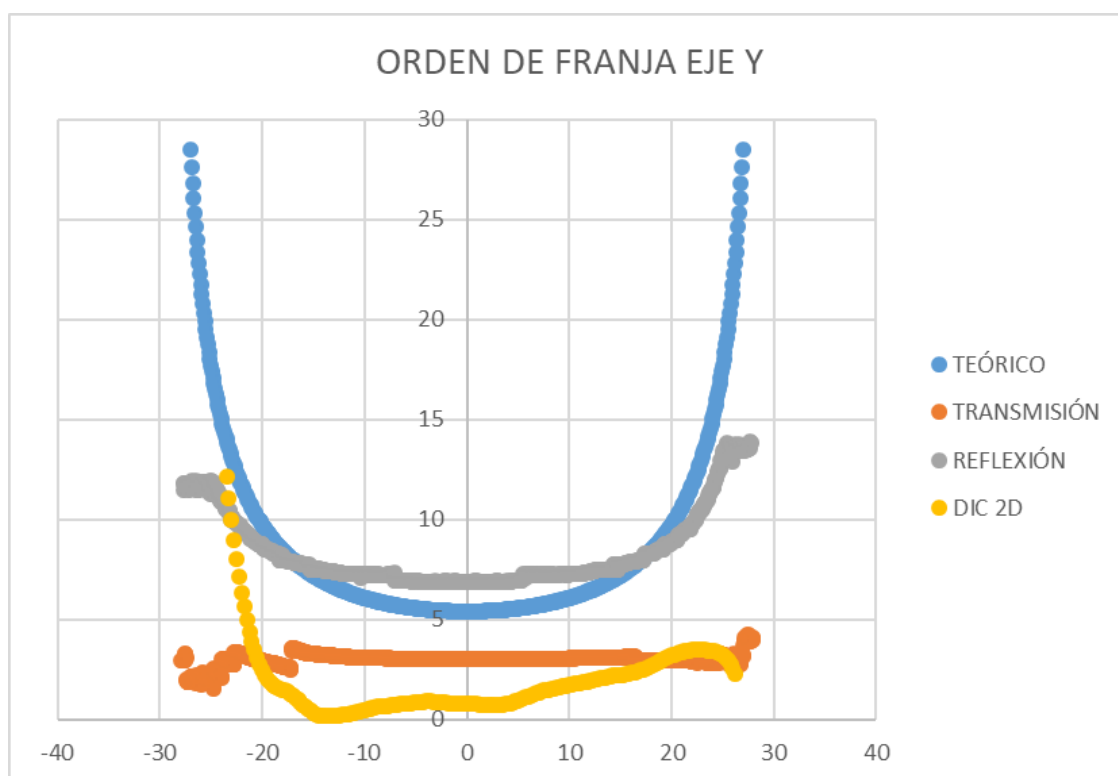


Figura 56– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en el disco de 60 mm (eje y).

Hay que puntualizar que en ninguno de los casos mostrados en esta gráfica los valores alcanzados son los de los extremos del disco, esto es debido a:

- Para el “eje y” los extremos son el punto de aplicación de la carga, en los cuales existe una concentración de tensiones. y por ello el orden de franja en esos puntos alcanza valores muy elevados en los resultadosóricos, por lo que se han retirado de la gráfica para poder compararlos con los experimentales
- En los valores experimentales tampoco se alcanzan los valores extremos y esto es debido a dos circunstancias, la primera es que durante la creación de la máscara de trabajo se pierde algo de información de los extremos para evitar fallos en el procesado. El segundo motivo es que estas zonas son lugares con mucha densidad de franjas en los cuales el proceso de “unwrapping” da fallos y a la hora de obtener el perfil no se incluyen estas zonas.

Este fenómeno de falta de información en los extremos se repetirá en todas las gráficas cuando se trate de los puntos de aplicación de las cargas y siempre debido al mismo motivo de creación de la máscara de trabajo y valores elevados.

En cuanto a la similitud de los resultados, se observa que en todos los ensayos se sigue la misma tendencia que la solución teórica, sin embargo, los valores no coinciden entre ellos, siendo menores en los casos de los ensayos de transmisión y DIC. El ensayo de reflexión en este caso es el que mejores resultados aporta con

respecto a la solución teórica, con valores cercanos a ella y una tendencia muy similar.

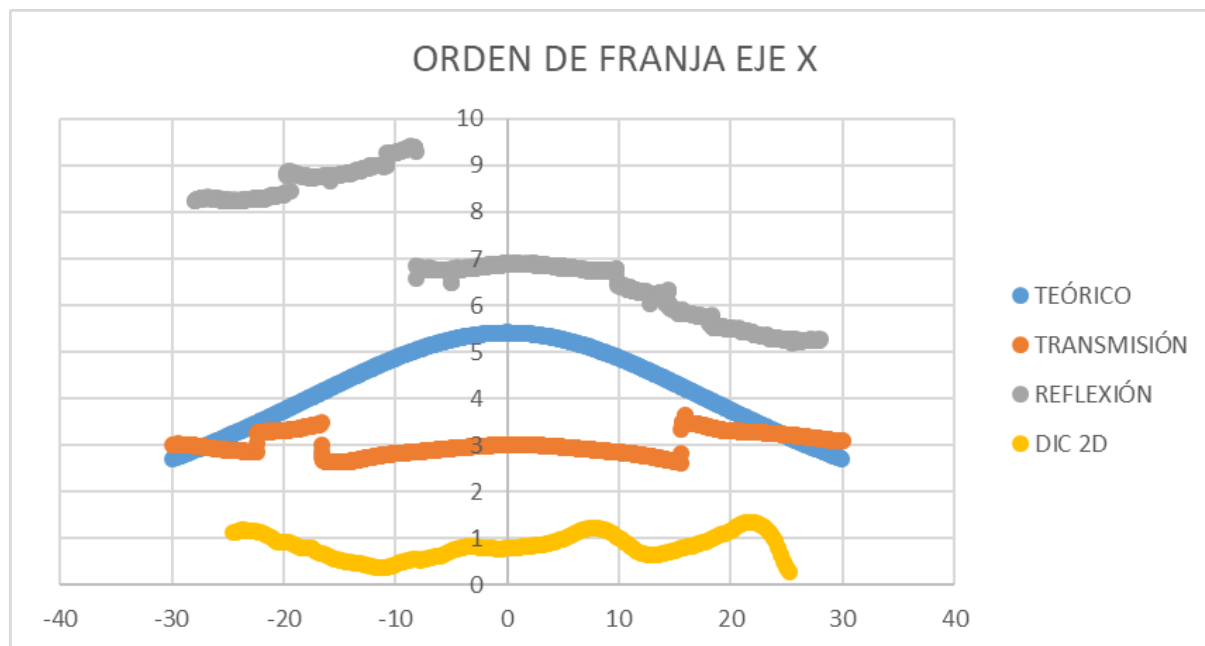


Figura 57– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en el disco de 60 mm (eje x).

En esta ocasión si se consiguen alcanzar los valores extremos del eje x y como se observa los valores de transmisión y los teóricos en estos puntos son muy parecidos. Sin embargo, el grafico de transmisión no sigue fielmente al de valores teóricos y esto se debe sin duda a un fallo del unwrapping ya que tal y como se aprecia en la gráfica aparece un salto de los datos en torno al punto de 18 mm, donde el programa no ha conseguido “sumar” los valores, lo que hubiera conseguido que la tendencia hubiera sido igual que la teórica.

Por otro lado, también se observa un salto en el unwrapping de reflexión, otro fallo a la hora del procesado que de no haber sucedido se hubiera conseguido una tendencia correcta de los resultados, aunque algo más elevados que los teóricos.

Si se realiza manualmente el proceso de *unwrapping* se observan comportamientos similares entre transmisión y reflexión, para ello se muestra la siguiente gráfica comparando estos resultados corregidos manualmente:

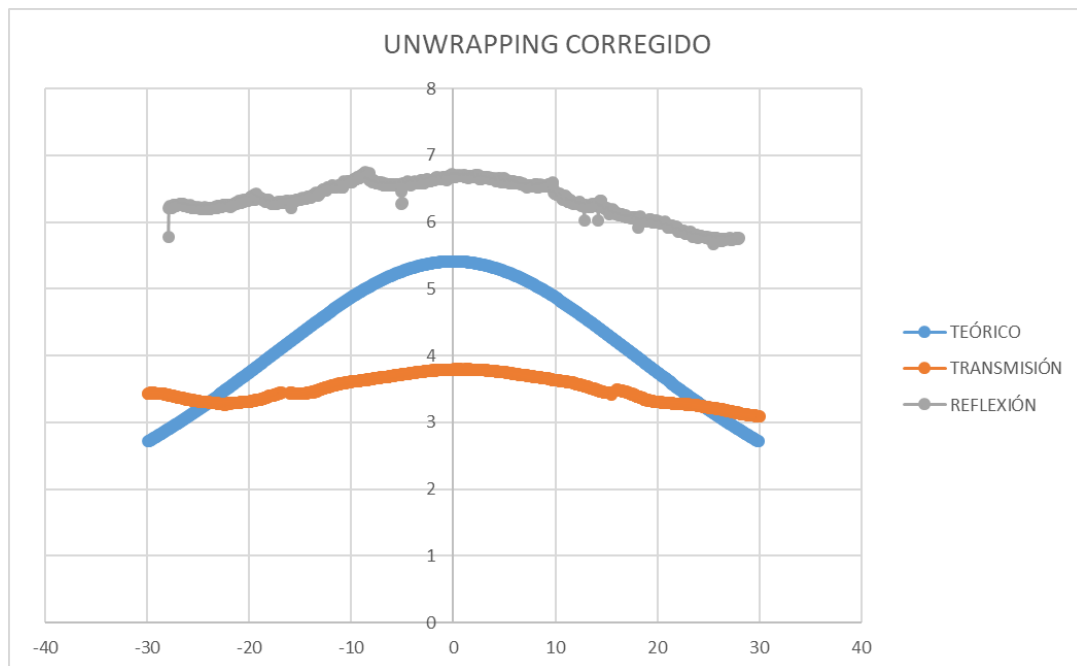


Figura 58- Comparación del orden de franja en transmisión, reflexión y teórico para el disco de 60 mm de diámetro corrigiendo manualmente el unwrapping.

En estos casos los resultados del DIC 2D han sido malos y no se corresponden ni en valor ni la tendencia con los resultados teóricos.

5.1.3 Disco de 80 mm de diámetro:

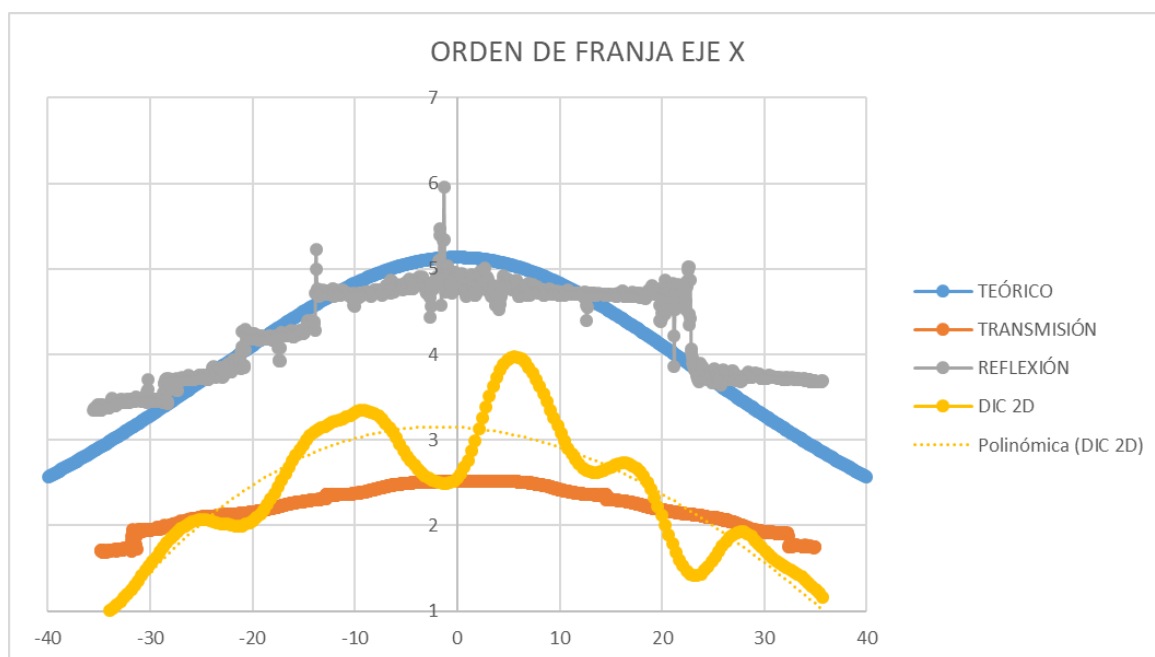
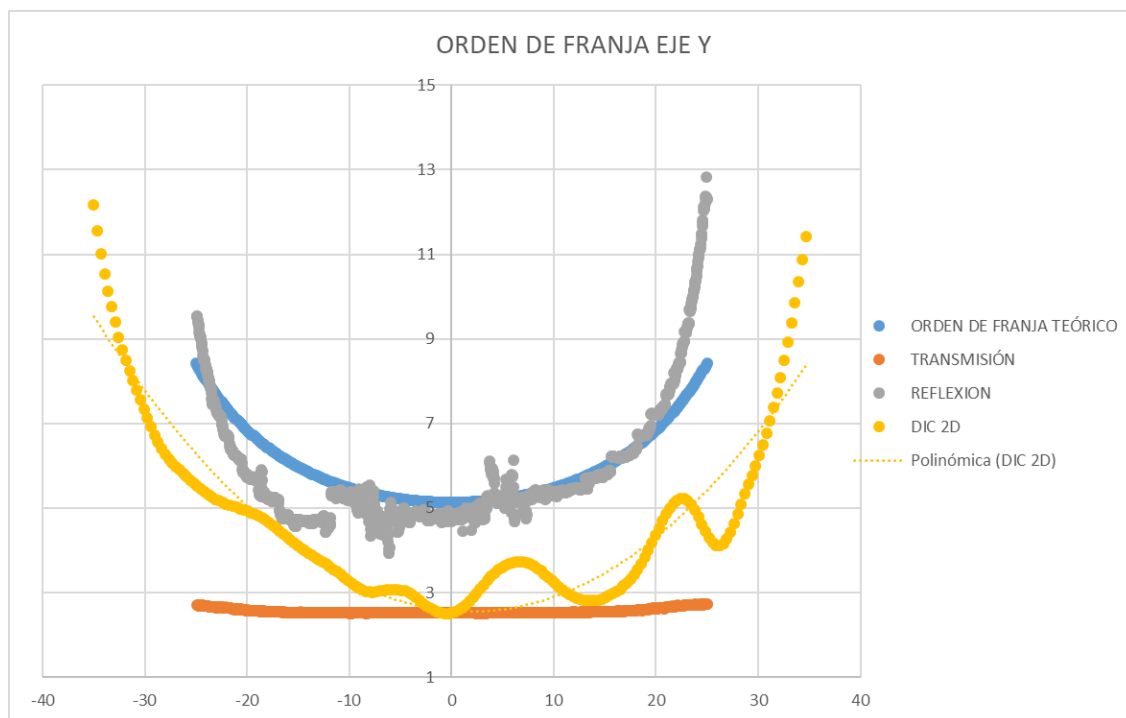


Figura 59– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en el disco de 80 mm (eje y, eje x).

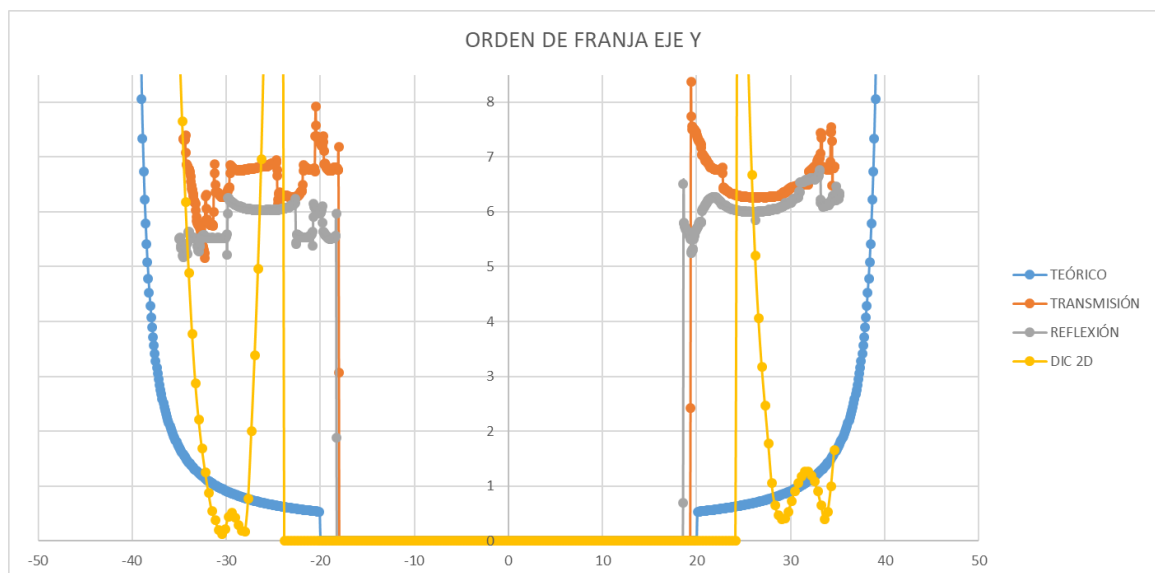
En esta ocasión encontramos de nuevo una tendencia similar a la ya conocida del disco de 60 mm y al igual que en aquel disco, para este ensayo el polariscopio a

reflexión también es el que mejores resultados ofrece. La tendencia es muy similar a la teórica y con valores muy próximos a esta. Cabe destacar que aparece mucho “ruido” en la línea de reflexión y esto es debido al recubrimiento ya que se realizó con una pintura en spray gris metalizada lo que provocaba que se generara una superficie irregular con rugosidad provocando sombras que afectan al procesamiento de las imágenes.

También se han obtenido mejores resultados para el ensayo de DIC, a los cuales se les ha agregado una línea de tendencia con la que es más fácil observar la correlación existente con los datos teóricos.

Sin embargo, los datos del polariscopio a transmisión siguen siendo los que peores resultados ofrecen. La tendencia es parecida pero los valores del orden de franja son diferentes al resto.

5.2 Anillo de 80/40 mm de diámetro:



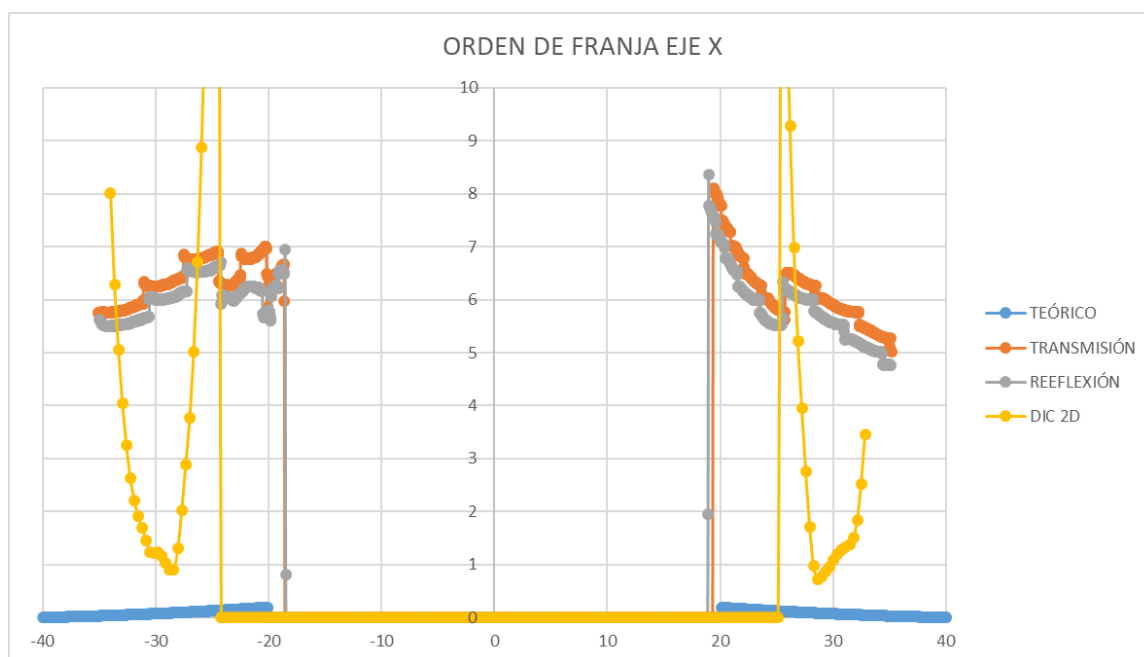


Figura 60– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en el anillo de 80 mm (eje y, eje x).

En estas gráficas aparecen valores cortados correspondientes a DIC pero es oportuno no aumentar más el rango de valores del eje y puesto que se perdería detalle del resto de gráficas. Además, los valores que salen de rango corresponden con puntos del interior del anillo que actúa como concentrador de tensiones y por este motivo se eleva el orden de franja. No obstante, se aprecia que en el resto de ensayos no se elevan tanto los valores en los puntos de concentración de tensiones.

En esta ocasión los valores y tendencias de transmisión y reflexión son prácticamente idénticos lo que hace pensar que esta es la distribución correcta del orden de franja para este modelo a pesar de la diferencia existente con el teórico. Se observa en ambos perfiles un claro aumento del orden de franja en las proximidades de la zona interior del anillo y esto se debe a la concentración de tensiones que ahí existe. También encontramos valores altos en las zonas de aplicación de la carga, principio y fin de la gráfica del eje y.

A pesar de ello también existen fallos en el unwrapping que se aprecian como saltos en las tendencias que siguen los resultados. Los posibles motivos de estos

fallos serán tratados en el apartado de conclusiones. A pesar de ello se ha realizado un unwrapping manual para poder comparar los ensayos de transmisión y reflexión:

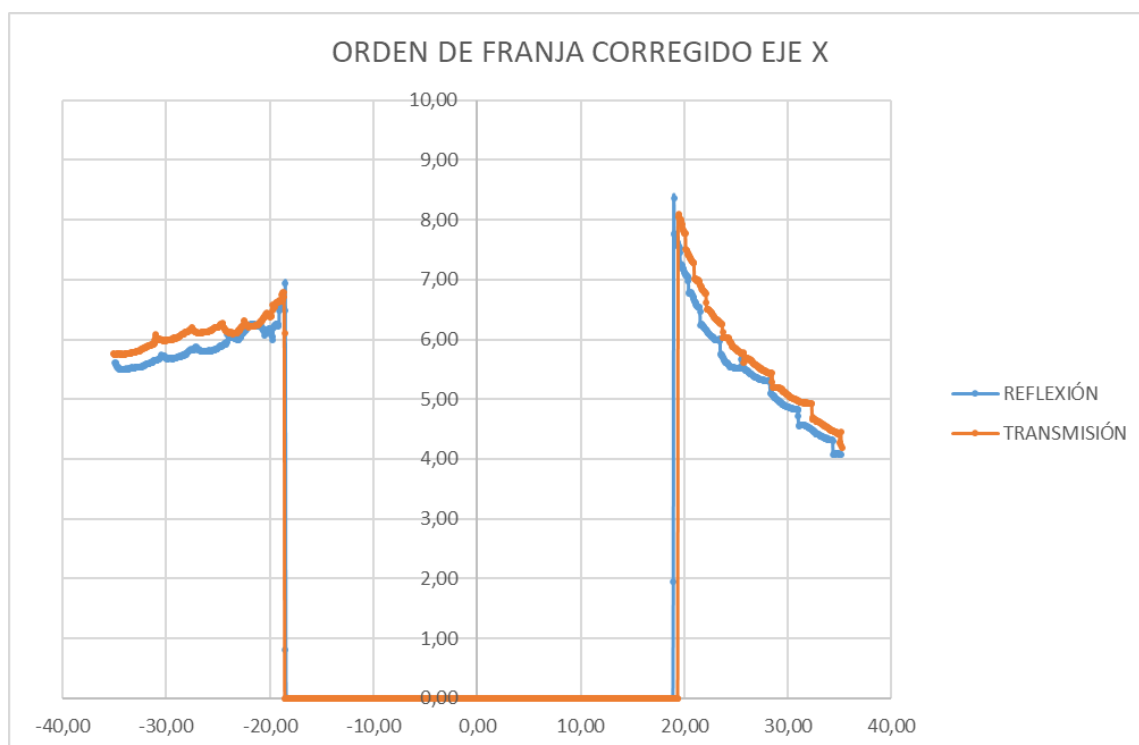
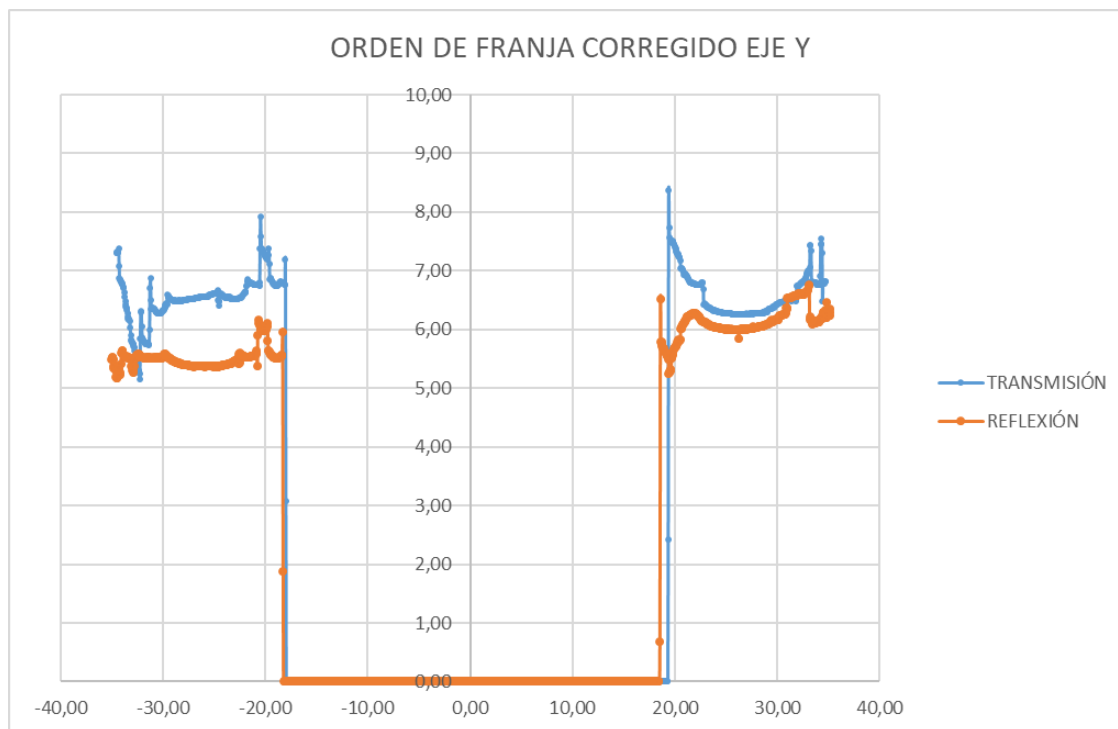
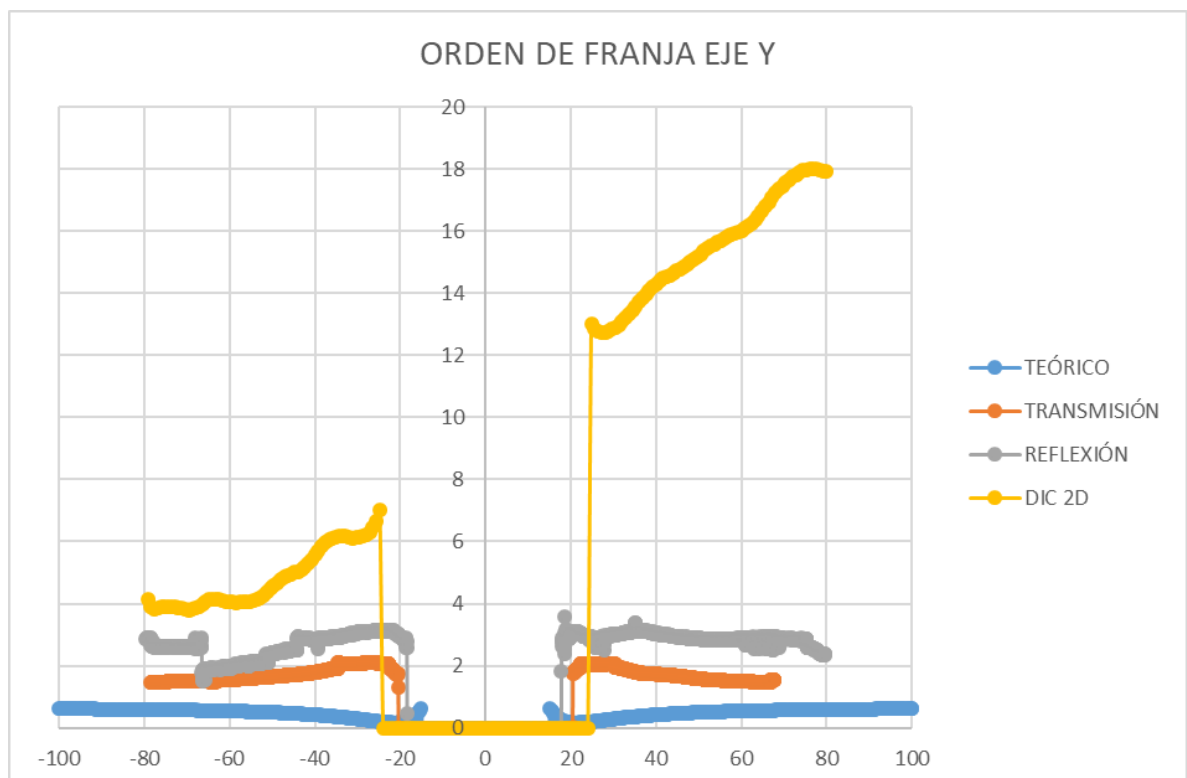


Figura 61- Comparación del orden de franja en transmisión, reflexión y teórico para el anillo corrigiendo manualmente el unwrapping.

En la *figura 61* se observan que las tendencias obtenidas en los ensayos de transmisión y reflexión son muy similares una vez se corrigen manualmente los errores del *unwrapping*.

5.3 Placas con agujero central.

5.3.1 Placa con agujero central de 30 mm:



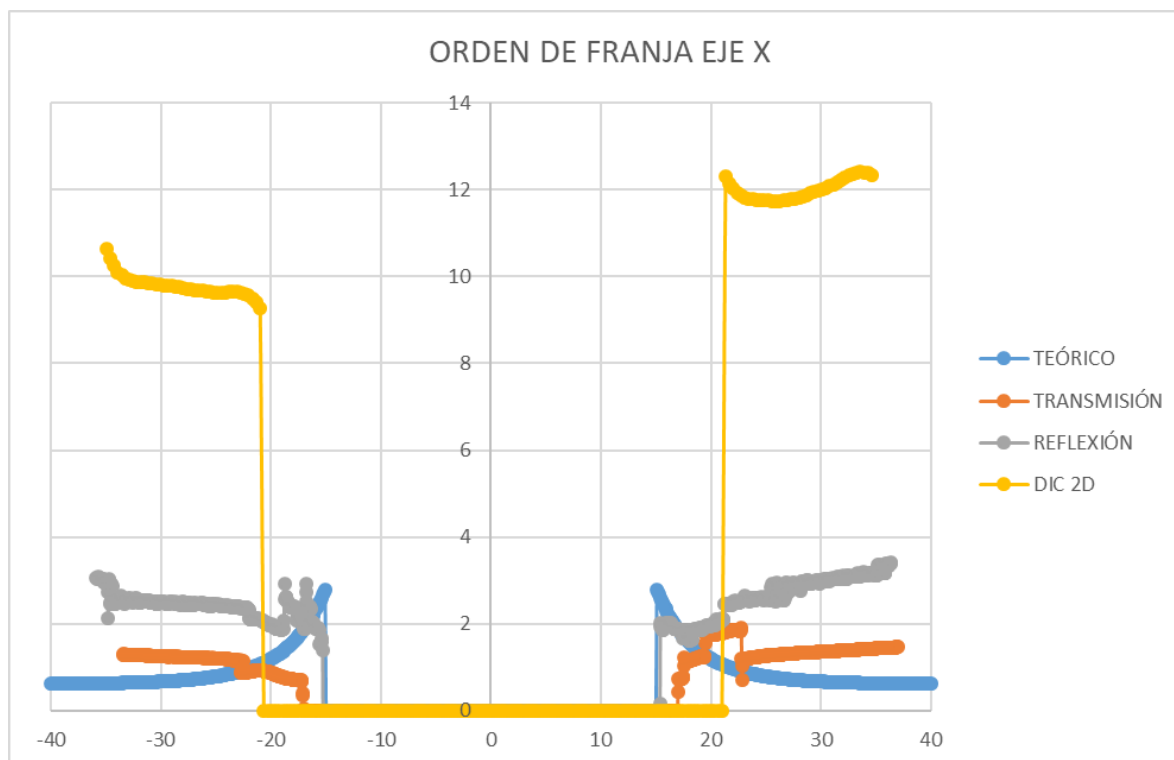


Figura 62– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en la placa con agujero de 30 mm (eje y, eje x).

Tal y como se puede observar en ambas graficas los resultados correspondientes al DIC 2D tienen valores muy elevados con respecto al resto de ensayos lo que no permite comparar correctamente estos últimos entre sí. Por otro lado, hay que decir que las tendencias seguidas por los resultados de DIC sí que son similares a las del resto a pesar de que no exista simetría entre ambos lados de cada eje, esto puede deberse a algún error en el procesado o algunas sombras durante el proceso de toma de imágenes.

Con el fin de poder comparar el resto de ensayos entre sí se adjuntan las gráficas anteriores reduciendo el rango del eje y, sin los valores obtenidos mediante DIC.

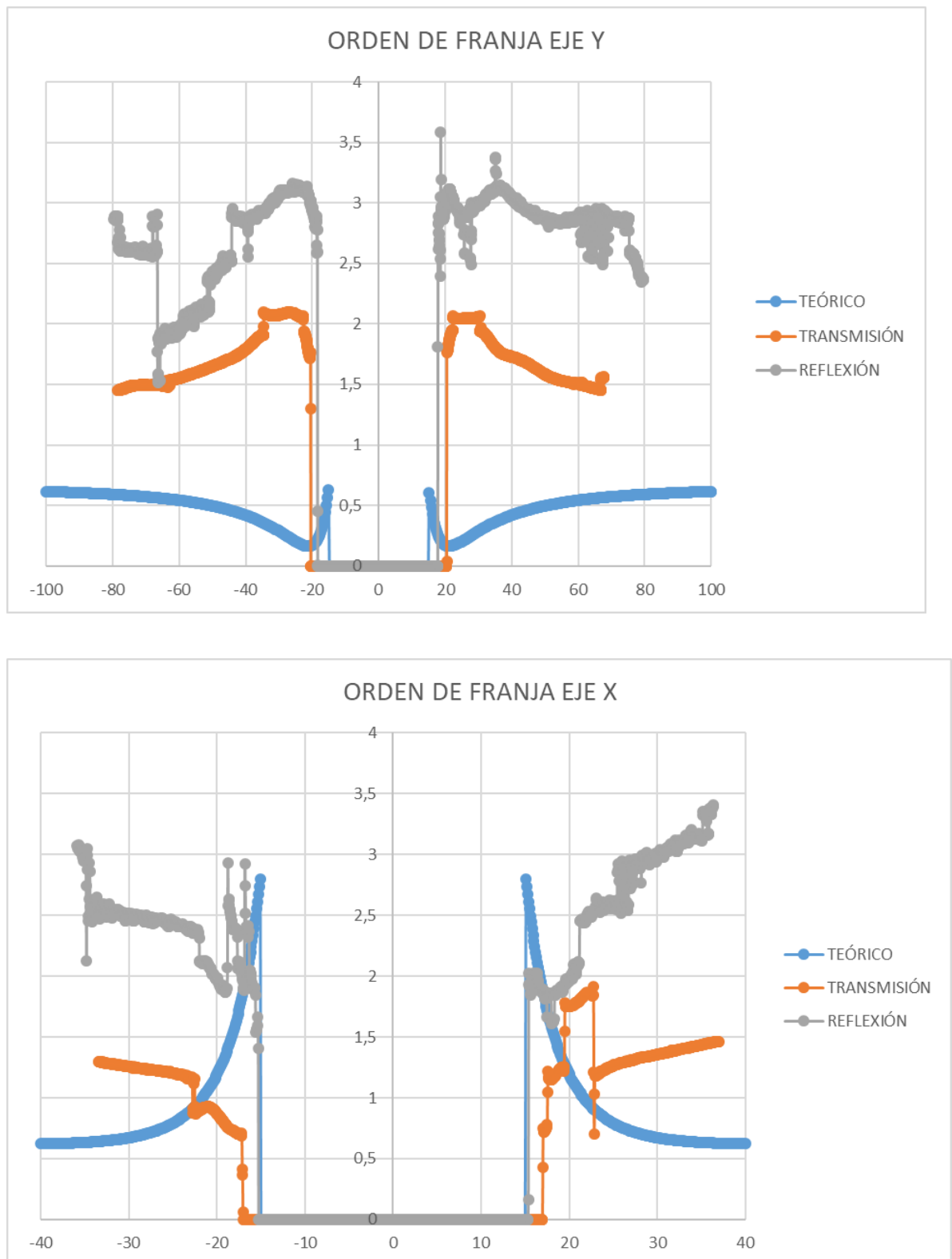


Figura 63– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión y a reflexión en la placa con agujero de 30 mm (eje y, eje x).

Ahora se pueden comparar los resultados observándose que efectivamente el ensayo de reflexión sigue aportando gran cantidad de ruido como se ha explicado con anterioridad. En el eje y la solución teórica muestra que según nos acercamos al agujero el orden de franja se mantiene constante hasta una zona cercana en la cual disminuye para posteriormente aumentar rápidamente en la zona del agujero, que actúa como un concentrador de tensiones. Sin embargo, los resultados experimentales nos muestran unas tendencias crecientes y que disminuyen justo antes del agujero. Esto se puede deber a que la zona de concentración de tensiones donde se dispara el orden de franja quedase fuera de la máscara de procesamiento, al ser muy pequeña la zona y estar pegada al borde, donde en fotoelasticidad siempre hay ruido por las tensiones residuales del mecanizado de las probetas.

La gráfica teórica del eje x muestra una tendencia creciente en todo momento hasta alcanzar el máximo valor en la zona del agujero central. Por otro lado, los resultados experimentales en esta región no se corresponden con la teoría ni en la tendencia ni en los valores numéricos, pero si tienen cierta similitud entre sí las tendencias de los resultados de transmisión y reflexión.

5.3.2 Placa con agujero central de 20 mm:

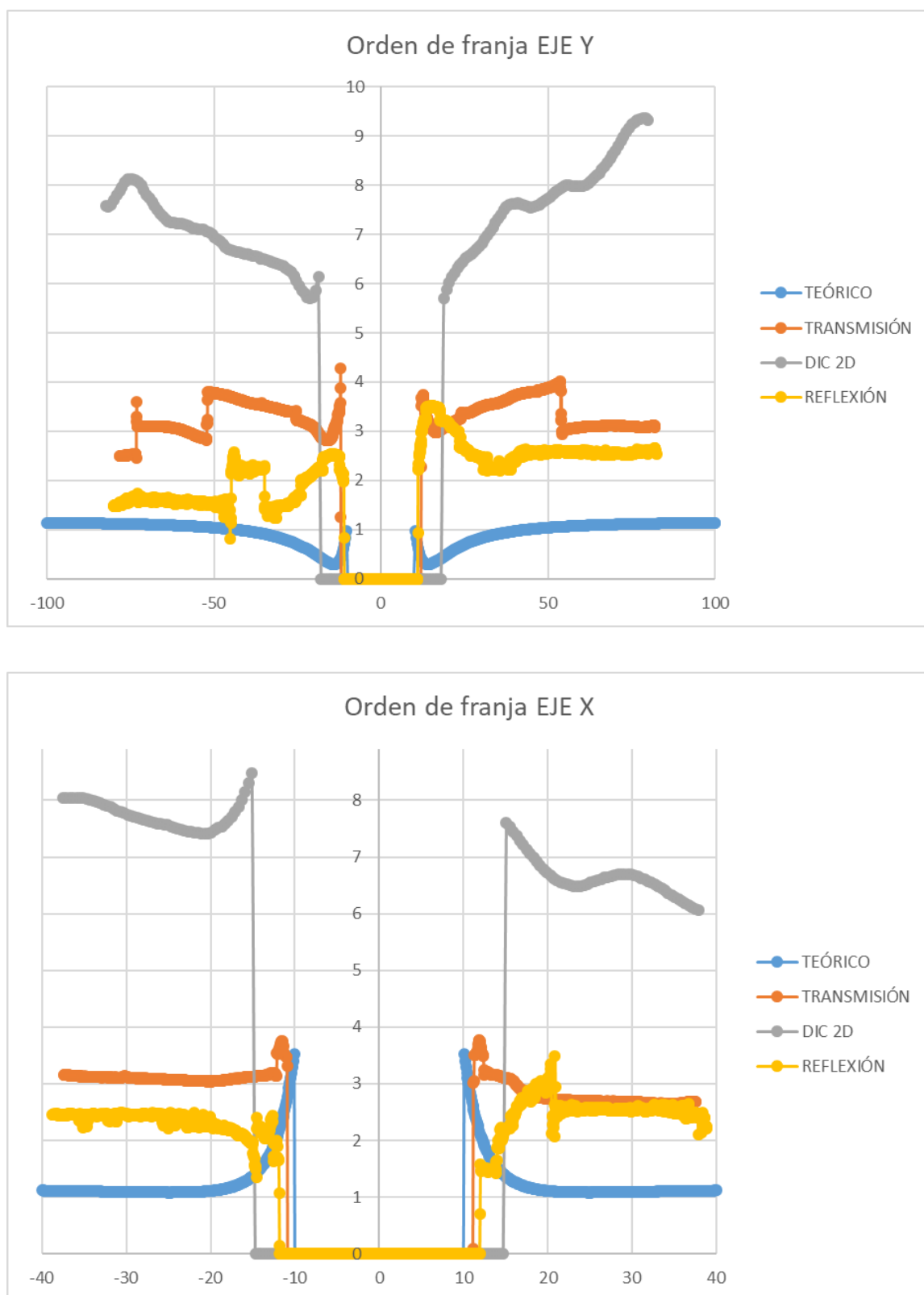


Figura 64– Comparativa entre orden de franja teórico, ensayos de polariscopio a transmisión, a reflexión y DIC 2D en la placa con agujero de 20 mm (eje y, eje x).

De nuevo en esta comparación es notable el ruido que aporta el ensayo de reflexión como en los casos anteriores, sin embargo, los valores que arroja son cercanos a los valores de transmisión en ambos ejes, siguiendo además una tendencia muy fiel a la teórica en el eje y.

No obstante, el ensayo de DIC aporta de nuevo unos valores alejados tanto de los teóricos como de los dos ensayos del polariscopio, lo que hace pensar que no son resultados correctos.

Por otro lado, vuelven a aparecer fallos en el proceso de *unwrapping* para el ensayo a transmisión, donde se aprecian saltos en los valores. De no ser por estos saltos, las tendencias seguidas por los valores de los ensayos a transmisión vuelven a ser similares a las teóricas, con algunas diferencias en los valores. Se observa a continuación la gráfica del *unwrapping* en transmisión y reflexión para el eje Y corregida manualmente ya que existe un salto claro en el orden de franja producido por un mal procesado.

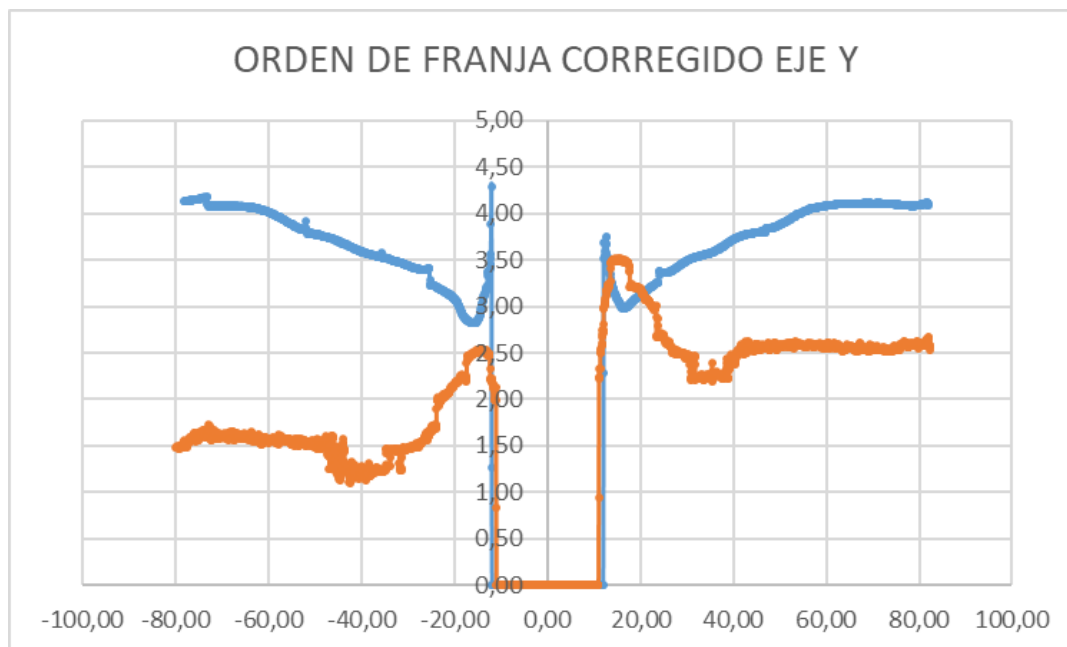


Figura 65- Comparación del orden de franja en transmisión, reflexión y teórico para el anillo corrigiendo manualmente el *unwrapping*.

6 CONCLUSIONES

El objetivo principal del presente trabajo de fin de grado era desde su inicio la calibración del polariscopio y, a posteriori, su utilización como técnica de medida de tensiones y deformaciones sobre modelos mecánicos, y una vez obtenidos los resultados del programa experimental que se ha llevado a cabo se pueden sacar gran cantidad de conclusiones sobre el tipo de técnicas que se han usado.

En cuanto a la complejidad de cada una de ellas la conclusión a la que he llegado tras gran cantidad de ensayos con cada método es que el más sencillo y rápido de realizar es el de DIC. No precisa de un montaje muy complejo, una cámara y un ordenador, y a la hora del procesado es mucho más sencillo y rápido que el software de procesamiento de las imágenes del polariscopio. Por otro lado, las técnicas del polariscopio tanto a transmisión como a reflexión han supuesto un reto a la hora de organizar y preparar los ensayos pues exigían gran cantidad de precauciones que se han ido descubriendo a medida que se fallaba en los procesados de las imágenes durante el programa experimental. Para una correcta aplicación de esta técnica será necesario:

- Una adecuada iluminación del lugar donde se realizan los ensayos. Este ha sido, posiblemente, uno de los errores cometidos durante este trabajo y que se ha descubierto durante la exposición de los resultados ya que se pueden observar en ciertas graficas una asimetría en el orden de franja respecto del eje y, posiblemente motivada porque en el laboratorio de la universidad donde se realizaron los ensayos la iluminación artificial instalada se encuentra solo en la zona izquierda de la mesa donde se encontraba la máquina de tracción. Esta deficiencia en la iluminación puede haber provocado fallos en el procesamiento de las imágenes.

- A la hora de tomar las imágenes, correspondientes al método de incremento de fase, es importante que todos los elementos del polariscopio junto con la cámara y la pieza a ensayar se encuentren perpendiculares entre sí.
- El software COPA no es capaz de procesar imágenes con alta densidad de franjas, de manera que hay que adecuar la carga de las piezas para evitar este problema con antelación.
- Por último, también es de gran importancia un buen acabado de las piezas tanto superficial como en el corte, ya que pueden aparecer tensiones superficiales que provoquen errores en el procesado.

Con respecto a la calidad de los resultados, se comprueba que estas técnicas son todas complejas de utilizar pues en ninguno de los ensayos se ha conseguido una correlación completa con la solución teórica. Sin embargo, si existen muchas de ellas con bastante similitud sobre todo en las tendencias seguidas por el factor de franja. Los resultados obtenidos mediante DIC en general no han resultado fiables, de lo que se deduce que se han cometido errores durante la aplicación del método en este trabajo, tales como baja calidad de las imágenes capturadas o un postprocesado incorrecto.

La comparativa de los diferentes ordenes de franja en el disco de 80 mm de diámetro muestra una muy alta correlación entre la técnica de fotoelasticidad en reflexión y la teoría, que si además estudiamos el resto de ensayos se puede llegar a la conclusión de que, a pesar del ruido que ofrecen sus resultados, los datos que nos ofrece el polariscopio a reflexión son los que más se aproximan a los resultados teóricos que se han obtenido.

En definitiva, se concluye que los sistemas fotoelásticos en transmisión y reflexión disponibles en la Universidad de Jaén proporcionan resultados

experimentales correctos, aunque el procesamiento automático mediante software introduce algunos errores que pueden ser corregidos manualmente.

Para finalizar el apartado de conclusiones, es importante destacar también que este trabajo de investigación ha supuesto para el estudiante todo un reto complejo a la hora de sobrepasar todos los problemas que han ido surgiendo con cada una de las técnicas utilizadas en el programa experimental y que han supuesto para él un gran aprendizaje tanto de la metodología de trabajo de laboratorio e investigación como la profundización en conceptos estudiados durante el grado pero que no habían sido aplicados.

7 TRABAJOS FUTUROS

Puesto que estos resultados, sin ser malos resultados, aun podrían ser mejores, se pueden proponer ciertas líneas de trabajo para el futuro de estas técnicas mediante las cuales mejoren sus resultados ya que son métodos relativamente modernos y aún en estudio que pueden avanzar muy rápido con la mejora de los softwares de procesado. Algunas de las propuestas para el futuro son:

- Realizar los ensayos a reflexión utilizando un correcto recubrimiento birrefringente y dejar de utilizar el spray metalizado ya que este es posiblemente el motivo del ruido de los resultados.
- Optimizar la iluminación utilizada durante la toma de fotografías para estos métodos puesto que puede ser otro de los focos de errores de procesado.
- Realizar un análisis numérico, por ejemplo, mediante elementos finitos, de los problemas aquí planteados, para contrastar con las soluciones teóricas y experimentales anteriormente expuestas.

- Planteamiento de nuevos códigos para el procesado más potentes que permitan procesar imágenes con una mayor densidad de franjas isocromáticas.
- Estudiar otro tipo de piezas que no han podido ser ensayadas en este trabajo u otro tipo de materiales o procesos de fabricación actuales como la impresión 3D.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Carazo, (2012) Universidad de Jaén: Tesis Doctoral. *“Estudio de uniones T-Stub en estructuras metálicas utilizando métodos ópticos para la medida de tensiones y deformaciones”*
- [2] Vishay Measurement Group (2005). *“Introduction to Stress Analysis by the PhotoStress Method”*.
- [3] D. Brewster, *“On the communication of the structure of doubly refracting crystals to glass, muriate of soda, flour spar and other substances by mechanical compression and dilatation”* Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. 106, pp.156-1578, 1816.
- [4] Ramesh K (2000). *“Digital Photoelasticity. Advanced Techniques and Applications”*. Springer
- [5] Manual on Experimental Stress Analysis (fifth edition). Society for Experimental Mechanics (1989)
- [6] M. Born & E. Wolf (7ª Edición, 1999) *“Principles of Optics”*. Cambridge University.
- [7] James W. Dally & William F. Riley (3º Edición) *“Experimental Stress Analysis”*
- [8] K. Ramesh, *“Photoelasticity” en Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics, Sharpe, Ed., 2008, ch.25, pp.701-742.*
- [9] Patterson Eann A. (2002) *“Digital Photoelasticity: Principles, Practice and Potencial Strain”, vol. 38, pp.27-39.*
- [10] P. Siegmann, D. Backman and E. A. Patterson *“A robust approach to demodulating and unwrapping pase-stepped photoelastic data” Experimental Mechanics, vol.45, no. 3, pp. 278-289, June 2005.*
- [11] W. H. Peters and W. F. Ranson, *“Digital Imaging techniques in experimental stress analysis” Opt.Eng., vol.21, no. 3, pp. 427-432, 1981.*
- [12] T. C. Chu, W.F. Ranson, M.A. Sutton, and W.H. Peters, *“Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics” Experimental Mechanics, vol.25, no. 3, pp. 232-245, 1985.*
- [13] P.F. Luo, Y.J. Chao, M.A. Sutton and W. H. Peters, *“Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using coputer visión,” Experimental Mechanics, vol.33, no. 2, pp. 123-132, 1993.*
- [14] D. Pablo Blanco Esteban (septiembre 2013) Proyecto de fin de carrera: *“Estudio de tensiones en un anillo comprimido diametralmente mediante elementos finitos”*
- [15] Javier Catalán Requena (febrero 2016) TFG: *“Análisis numérico y experimental de elementos mecánicos mediante la técnica de fotoelasticidad”*