



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS MECÁNICOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE FOTOELASTICIDAD

Alumno: Javier Catalán Requena

Tutor: Prof. D. Luis Felipe Sesé

Cotutor: Prof. D. José Manuel Vasco Olmo

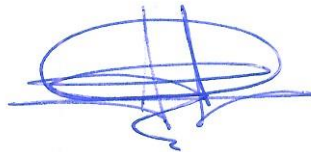
Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Febrero, 2016

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS NUMÉRICO Y
EXPERIMENTAL DE
ELEMENTOS MECÁNICOS
MEDIANTE LA TÉCNICA DE
FOTOELASTICIDAD**

TFG realizado por:



Javier Catalán Requena

VºBº Tutor:

FELIPE SESE
LUIS
ANTONIO -
26242833V

Firmado digitalmente por FELIPE SESE LUIS ANTONIO - 26242833V
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, serialNumber=26242833V, sn=FELIPE SESE, givenName=LUIS ANTONIO, cn=FELIPE SESE LUIS ANTONIO - 26242833V
Fecha: 2016.02.04 16:36:22 +01'00'

Prof. D. Luis Felipe Sesé

VºBº Cotutor:

NOMBRE
VASCO OLMO
JOSE
MANUEL - NIF
77351094R

Firmado digitalmente por NOMBRE VASCO OLMO JOSE MANUEL - NIF 77351094R
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, o=FNMT, ou=FNMT Clase 2 CA, ou=501074183, cn=NOMBRE VASCO OLMO JOSE MANUEL - NIF 77351094R
Fecha: 2016.02.04 16:23:11 +01'00'

Prof. D. José Manuel Vasco Olmo

Índice General

1. Introducción.....	1
2. Memoria.....	3
2.1. Motivaciones y Objeto Principal del Trabajo.....	4
2.2. Fundamentos Teóricos.....	4
2.2.1. Fotoelasticidad.....	4
2.2.1.1. Principio Físico de la Fotoelasticidad.....	5
2.2.1.2. Conceptos Básicos.....	7
2.2.1.3. Ecuación Fundamental de la Fotoelasticidad: Ley Tenso-Óptica.....	10
2.2.2. Técnicas Ópticas.....	11
2.2.2.1. Fotoelasticidad en Reflexión.....	12
2.2.3. Simulación Numérica: Elementos Finitos.....	14
2.3. Estado del Arte.....	15
2.3.1. Aplicación de la Técnica de Reflexión en Fotoelasticidad.....	15
2.3.2. Aplicación del Análisis mediante Elementos Finitos.....	16
2.4. Análisis Experimental.....	17
2.4.1. Elementos y Modelos Empleados.....	17
2.4.2. Equipos Empleados.....	20
2.4.2.1. Fuente de Luz Monocromática.....	32
2.4.3. Metodología Experimental.....	37
2.4.3.1. Generación de la Franja.....	37
2.4.3.2. Análisis de Franjas Fotoelásticas.....	40
2.4.3.3. Procedimiento General.....	44
2.4.3.4. Corrección de Errores.....	54

2.5.	Análisis Numérico.....	55
2.5.1.	Metodología Teórica.....	56
2.5.1.1.	Aplicación Empleada.....	59
2.5.1.2.	Procedimiento General y Formación de la Técnica.....	60
2.6.	Resultados.....	63
2.6.1.	Resultados Experimentales.....	63
2.6.2.	Resultados Numéricos.....	70
2.6.3.	Discusión de Resultados.....	74
2.7.	Conclusiones.....	83
3.	Trabajo Futuro.....	85
4.	Anexo I – Simulaciones mediante Elementos Finitos.....	86
5.	Referencias.....	88

Índice de Figuras

▪ <i>Figura 1:</i> Birrefringencia o Doble Refracción.....	6
▪ <i>Figura 2:</i> Refracción de la Luz.....	7
▪ <i>Figura 3:</i> Retardo Relativo δ	8
▪ <i>Figura 4:</i> Polarización Plana.....	9
▪ <i>Figura 5:</i> Polarización Circular.....	9
▪ <i>Figura 6:</i> Polarización Elíptica.....	9
▪ <i>Figura 7:</i> Proyecciones en el Plano x – y de las Polarizaciones Circular y Elíptica.....	10
▪ <i>Figura 8:</i> Aplicación del Recubrimiento Fotoelástico a la Carcasa de una Bomba de Agua.....	13
▪ <i>Figura 9:</i> Diagrama Esquemático ilustrando la Popularidad Fluctuante del análisis de Tensión Fotoelástico.....	15
▪ <i>Figura 10:</i> Dimensiones y Geometría de la Probeta de Disco (cotas en mm).....	17
▪ <i>Figura 11:</i> Dimensiones y Geometría de la Probeta con Taladro Central (cotas en mm).....	18
▪ <i>Figura 12:</i> Dimensiones y Geometría de la Probeta con Cambio de Sección (cotas en mm).....	18
▪ <i>Figura 13:</i> Dimensiones y Geometría de la Probeta CCT con Taladro (cotas en mm).....	19
▪ <i>Figura 14:</i> Polarizador.....	21
▪ <i>Figura 15:</i> Lámina de Onda.....	21
▪ <i>Figura 16:</i> Lámina de Cuarto de Onda.....	22
▪ <i>Figura 17:</i> Polariscopio Plano.....	23
▪ <i>Figura 18:</i> Polariscopio Circular.....	25

▪ <i>Figura 19:</i> Campo de Franjas Isocromático: Izq) Campo Oscuro, Der) Campo Claro.....	27
▪ <i>Figura 20:</i> Disposición Óptica para Obtener una Incidencia Normal en un Polariscopio de Reflexión.....	27
▪ <i>Figura 21:</i> Representación Esquemática de un Polariscopio por Reflexión.....	28
▪ <i>Figura 22:</i> Posicionamiento del Analizador, Polarizador y Láminas de Cuarto de Onda del Polariscopio Real de reflexión Modelo 031.....	28
▪ <i>Figura 23:</i> Pintura Plateada, de la marca AGALSA, usada para pintar las piezas ensayadas.....	29
▪ <i>Figura 24:</i> Perfil y Parte Trasera de una cámara Guppy Pro.....	30
▪ <i>Figura 25:</i> Cable y Detalle de Conexión FireWire.....	31
▪ <i>Figura 26:</i> Vistas de Perfil y Alzado de la Lente.....	31
▪ <i>Figura 27:</i> Máquina MTS Modelo 43 (C43.104).....	32
▪ <i>Figura 28:</i> Diferencia Visual entre Luz Monocromática y Luz Blanca.....	33
▪ <i>Figura 29:</i> Torta de Led´s.....	34
▪ <i>Figura 30:</i> Ventilador de un Ordenador Común.....	34
▪ <i>Figura 31:</i> Fuente de Alimentación de un Ordenador Común.....	34
▪ <i>Figura 32:</i> Pasos de Fabricación de una Lámpara de Luz Monocromática.....	35
▪ <i>Figura 33:</i> Ilustraciones Reales de los Pasos de Fabricación antes Explicados...36	
▪ <i>Figura 34:</i> Banco de Ensayos Empleado.....	37
▪ <i>Figura 35:</i> Franjas generadas en un elemento sometido a: (a) carga baja, (b) carga elevada.....	38
▪ <i>Figura 36:</i> Franja Isocromáticas.....	39
▪ <i>Figura 37:</i> Direcciones Principales Detectadas mediante Rotación de los Ejes del Polarizador/Analizador hasta Conseguir la Extinción Total de la Luz en el Punto de Ensayo.....	45
▪ <i>Figura 38:</i> Ejemplo de Determinación de Isoclinas con un Polariscopio de Reflexión Modelo 031.....	46

▪ <i>Figura 39:</i> Franjas Isoclinas Correspondientes a un Anillo Cargado Diametralmente con Incrementos de 15°.....	47
▪ <i>Figura 40:</i> Diagrama Esquemático de los Elementos Ópticos de Salida del Polariscopio Modelo 031, mostrando las Posiciones necesarias para las Seis Variaciones basadas en la Figura mostrada en el Manual del Polariscopio. El Arco Gris representa la Escala Roja del Instrumento con 0° en la Posición de “las 9 en Punto” y -90° “a las 12 en Punto”.....	48
▪ <i>Figura 41:</i> Logotipo del Software COPA.....	49
▪ <i>Figura 42:</i> Ejemplo de Modelo Tridimensional creado por un software de Diseño Asistido por Ordenador.....	57
▪ <i>Figura 43:</i> Ejemplo de Modelo Tridimensional con el Mallado aplicado.....	58
▪ <i>Figura 44:</i> Elemento tetraédrico de primer orden (izquierda) y de segundo orden (derecha).....	58
▪ <i>Figura 45:</i> Ejemplo de Modelo Tridimensional Mostrando el Resultado del Análisis de Deformaciones.....	59
▪ <i>Figura 46:</i> Vistas de Alzado de las Piezas con Entalla Horizontal y Entalla Girada.....	60
▪ <i>Figura 47:</i> Sujeciones en las caras inferiores, al igual que en el laboratorio, debido al tipo de mordazas utilizadas.....	61
▪ <i>Figura 48:</i> Cargas en las caras Superiores, igual que en el laboratorio, debido al tipo de mordazas utilizadas.....	61
▪ <i>Figura 49:</i> Mallado de las piezas, con una malla más concentrada en la zona de la entalla.....	62
▪ <i>Figura 50:</i> Resultados: a) Representación discreta de Tensiones, b) Representación continua de Deformaciones.....	63
▪ <i>Figura 51:</i> Imágenes obtenidas mediante el proceso de phase-stepping para una carga de 100 N.....	64
▪ <i>Figura 52:</i> Mapa de Isoclinas (disco).....	64
▪ <i>Figura 53:</i> Mapa de Isocromas (disco).....	64
▪ <i>Figura 54:</i> Mapa Isocromático desenvuelto y perfiles en los ejes x e y (disco)...	65
▪ <i>Figura 55:</i> Imágenes obtenidas mediante el proceso de phase-stepping para una carga de 150 N.....	65
▪ <i>Figura 56:</i> Mapa de Isoclinas (cambio de sección).....	66

▪ <i>Figura 57:</i> Mapa de Isocromas (cambio de sección).....	66
▪ <i>Figura 58:</i> Mapa Isocromático desenvuelto y perfil en el eje y (cambio de sección).....	66
▪ <i>Figura 59:</i> Imágenes obtenidas mediante el proceso de phase-stepping para una carga de 1000 N.....	67
▪ <i>Figura 60:</i> Mapa de Isoclinas (MT con taladro).....	67
▪ <i>Figura 61:</i> Mapa de Isocromas (MT con taladro).....	67
▪ <i>Figura 62:</i> Mapa Isocromático desenvuelto y perfiles en los ejes x e y (MT con taladro).....	68
▪ <i>Figura 63:</i> Imágenes obtenidas mediante el proceso de phase-stepping para una carga de 1000 N.....	68
▪ <i>Figura 64:</i> Mapa de Isoclinas (taladro centrado).....	69
▪ <i>Figura 65:</i> Mapa de Isocromas (taladro centrado).....	69
▪ <i>Figura 66:</i> Mapa Isocromático desenvuelto y perfiles en los ejes x e y (taladro centrado).....	69
▪ <i>Figura 67:</i> Comparativa gráfica de los perfiles obtenidos a lo largo del radio del disco de manera numérica, simulada y experimental.....	71
▪ <i>Figura 68:</i> Simulación mediante SolidWorks de la diferencia de tensiones principales del disco.....	71
▪ <i>Figura 69:</i> Orden de franja simulado obtenido en el perfil vertical obtenido de la mitad del elemento (debido a su simetría).....	71
▪ <i>Figura 70:</i> Distribución de la diferencia de tensiones principales mediante SolidWorks de la probeta de cambio de sección (arriba) y el perfil de orden de franja simulado obtenido.....	72
▪ <i>Figura 71:</i> Distribución de la diferencia de tensiones principales (con detalle del concentrador de tensiones) mediante SolidWorks de la probeta MT (izquierda) y el perfil de orden de franja simulado (derecha abajo) obtenido transversalmente a lo largo del eje de simetría.....	73
▪ <i>Figura 72:</i> Distribución de la diferencia de tensiones principales (con detalle del concentrador de tensiones) mediante SolidWorks de la probeta con taladro (izquierda) y el perfil de orden de franja simulado (derecha abajo) obtenido transversalmente a lo largo del eje de simetría.....	74
▪ <i>Figura 73:</i> Comparativa FEM- Fotoelasticidad en reflexión de los perfiles trazados en un ensayo de 100 N en un disco sometido compresión.....	75

▪ <i>Figura 74:</i> Comparativa gráfica FEM – Fotoelasticidad en Reflexión de distintos niveles de carga (disco).....	76
▪ <i>Figura 75:</i> Comparativa FEM- Fotoelasticidad en reflexión de los perfiles trazados en un ensayo de 150 N en una probeta con cambio de sección sometida a tracción.....	77
▪ <i>Figura 76:</i> Comparativa gráfica FEM – Fotoelasticidad en Reflexión de distintos niveles de carga (cambio de sección).....	79
▪ <i>Figura 77:</i> Comparativa FEM- Fotoelasticidad en reflexión de los perfiles trazados en un ensayo de 500 N en una probeta MT con entalla sometida a tracción.....	80
▪ <i>Figura 78:</i> Comparativa gráfica FEM – Fotoelasticidad en Reflexión de distintos niveles de carga (MT con taladro).....	81
▪ <i>Figura 79:</i> Comparativa FEM-Fotoelasticidad en reflexión de los perfiles trazados en un ensayo de 500 N en una probeta rectangular con taladro centrado.....	82
▪ <i>Figura 80:</i> Comparativa gráfica FEM – Fotoelasticidad en Reflexión de distintos niveles de carga (Probeta con taladro centrado).....	83

Índice de Tablas

- *Tabla 1:* Descripción de las Propiedades Generales del Policarbonato.....19
- *Tabla 2:* Distintas Combinaciones de los Elementos Ópticos y
Campo de Fondo Observado.....26
- *Tabla 3:* Características y Especificaciones de la Cámara Guppy Pro F-033B/C....30
- *Tabla 4:* Elementos necesarios para Trabajar con una Cámara Guppy Pro.....31
- *Tabla 5:* Características y Especificaciones MTS Modelo 43 (C43.104).....31
- *Tabla 6:* Posiciones en el Método de Variación de Fase con un Polariscopio
de Reflexión Modelo 031.....48
- *Tabla 7:* Reordenación de las Imágenes Obtenidas por Reflexión.....55

1.- Introducción

Según la normativa vigente regulada por la Universidad de Jaén, y concretamente por la Escuela Politécnica Superior de Linares para la obtención del título de cualquier Grado de Ingeniería Industrial y adaptado según el R.D. 1393/2007 de 29 de Octubre y modificado por el R.D. 861/2010 de 2 de Julio, es necesario haber conseguido el total de créditos y asignaturas exigidos por dicha Universidad, y por tanto, superar un Trabajo Fin de Grado.

El Trabajo Fin de Grado (TFG), además de ser una de las condiciones obligatorias y necesarias para conseguir el título ingenieril, intenta abordar un trabajo o estudio, teórico y/o experimental, igual o similar, a los trabajos que en un futuro pueden llegar a desempeñarse en la profesión. Según José A. Mañas, profesor de la Universidad Politécnica de Madrid, “un Trabajo Fin de Grado tiene por objetivo la aplicación por parte del alumno de los conocimientos adquiridos, de las experiencias acumuladas, de sus dotes de creatividad y originalidad y de sus habilidades personales a la solución de problemas reales, al desarrollo de ideas, modelos o prototipos, a la realización de estudios técnicos, etc. Todo ello en el ámbito temático propio de la titulación” [1].

Este presente TFG, realizado por el alumno Javier Catalán Requena, en el curso 2015-16, con título “Análisis Numérico y Experimental de Elementos Mecánicos mediante la Técnica de Fotoelasticidad” de temática perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén, está dirigido por el profesor D. Luis Antonio Felipe Sesé y codirigido por el profesor D. José Manuel Vasco Olmo. Este trabajo se basa en el estudio del comportamiento de modelos sometidos a esfuerzos, mediante uno de los métodos que podemos encontrar en Fotoelasticidad, la reflexión.

La memoria del presente trabajo consta de los siguientes puntos:

- En el segundo punto, correspondiente al Trabajo Fin de Grado, se establece el objetivo principal de dicho trabajo, se realiza una revisión bibliográfica, se desarrollan los fundamentos de las técnicas ópticas estudiadas, centrándose en la técnica de fotoelasticidad mediante reflexión, se desarrolla la metodología y procedimientos seguidos, así como los pasos seguidos en la elaboración de una



lámpara de luz monocromática, y por último, se muestran los resultados obtenidos, realizando una posterior discusión de los mismos.

- En el siguiente punto se realizan las correspondientes conclusiones.
- En el cuarto punto se hace referencia al trabajo futuro, estableciendo de forma general las distintas líneas de trabajo con las que continuar la presente investigación.
- En el quinto punto se recogen las distintas referencias citadas en la memoria.

2.- Memoria

El presente trabajo se puede dividir en varios bloques: una fase teórica o fase previa de estudio y documentación, otra fase numérica, otra práctica ó experimental (en la que incluimos la fabricación de una fuente de luz), y la correspondiente a comparación de resultados.

- *Estudio y Documentación*

Los primeros pasos seguidos para la elaboración del presente trabajo fueron de preparación, un periodo de formación en el que el alumno debe recurrir a distintas referencias y bibliografía, artículos técnicos sobre la materia, estudios anteriores, etc. Todo lo necesario para que el alumno sea capaz de conseguir unos conocimientos teóricos que sirvan como base de partida.

- *Fase Numérica*

En este bloque se simulan los mismos ensayos experimentales que se realizan en el laboratorio, mediante software informático, realizando el estudio mediante elementos finitos, el cual ofrece una solución numérica aproximada, de los elementos a estudio, sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales de manera integral que caracterizan el comportamiento físico del ensayo.

- *Fase Experimental*

Esta es la parte práctica del trabajo, en la cual se determinan los elementos a estudio, las herramientas, máquinas y equipos necesarios, metodología a seguir en el laboratorio y todo lo concerniente para poder llevar a cabo la técnica de fotoelasticidad en reflexión y obtener unos resultados experimentales de los correspondientes ensayos realizados.

- *Resultados y Contrastación*

El último paso, será mostrar todos los resultados obtenidos, y relacionarlos en una comparativa teórico-experimental, de manera visual, gráfica y numéricamente para poder llegar a argumentar unas conclusiones coherentes y contrastadas.

2.1.- Motivaciones y Objeto Principal del Trabajo

La motivación que ha llevado a realizar este trabajo principalmente han sido dos razones: por un lado la técnica usada, es decir, la fotoelasticidad, y por otro lado el tipo de trabajo. La fotoelasticidad era un tema completamente desconocido para el alumno, lo cual despertaba una gran curiosidad y atracción por parte del mismo. La otra razón es el tipo de trabajo, la cual está completamente relacionado con lo anterior, ya que para llevar a cabo la fotoelasticidad obligatoriamente hay que realizar trabajos empíricos reales, lo cual provoca que este trabajo tenga que ser de tipo experimental, enfocado a trabajar en laboratorio y direccionado a resolver todos los problemas y contratiempos que se presenten en tiempo real.

En conjunto, se podría decir que el trabajo supone un gran reto, razón que también alentó mucho la realización del mismo.

El objeto principal de este Trabajo Fin de Grado es la validación de la técnica óptica de fotoelasticidad en reflexión mediante el estudio y análisis experimental de elementos mecánicos y su correspondiente comparativa numérica mediante el método de elementos finitos.

2.2.- Fundamentos Teóricos

Tanto la fotoelasticidad como los elementos finitos son verdaderamente útiles herramientas ingenieriles para solventar importantes y complicados problemas prácticos.

En los puntos que a continuación se desarrollan se explica con detalle todos los conceptos básicos y fundamentos necesarios para tener una comprensión óptima sobre estas dos técnicas y todos los aspectos que ellas conciernen:

2.2.1.- Fotoelasticidad [2] [8]

La fotoelasticidad es una técnica óptica experimental que se emplea para el análisis de tensiones en elementos mecánicos. Esta técnica se basa en los fenómenos experimentados por las ondas electromagnéticas a su paso por materiales transparentes, en particular la polarización de la luz que ocurre a consecuencia de las tensiones presentes en los cuerpos sometidos a esfuerzos.

Este método experimental es útil para el estudio de objetos de forma irregular y tensiones localizadas, como piezas de maquinaria con muescas o curvas, componentes estructurales con ranuras o agujeros y materiales con hendiduras. Proporciona un nivel visual para observar las características de las tensiones de los objetos por medio de diagramas de luz proyectados sobre una pantalla o sobre una película fotográfica. Por simple observación se determinan las regiones en que se concentran los esfuerzos. Sin embargo, se necesita una técnica más complicada para un análisis cuantitativo sobre la tensión, compresión, fuerzas de cizalladura y deformaciones en cualquier punto del objeto con tensiones en tres direcciones espaciales (triaxial).

Con la fotoelasticidad se pueden realizar los siguientes procesos [9]:

- 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 a 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 ha tenido aplicaciones exitosas en varios campos de manufactura y construcción, donde es empleada. Se destacan los usos en la industria automotriz, aviación, construcción naval, herramientas y muchas otras aplicaciones [6] [10]. Los avances tecnológicos a nivel de computación y las técnicas del procesamiento digital de imágenes han hecho la fotoelasticidad más eficiente y más confiable para la solución de problemas de ingeniería.

Encontramos dos modos de implementarla, en transmisión y en reflexión; siendo el segundo tipo objeto de estudio en el presente trabajo.

2.2.1.1.- Principio Físico de la Fotoelasticidad [2] [4]

Algunos materiales transparentes no cristalinos, en particular algunos plásticos polímeros, son ópticamente isotrópicos bajo condiciones normales pero empiezan a ser doblemente refractivos o birrefringentes cuando son sometidos a esfuerzos. Este efecto normalmente persiste cuando las cargas se mantienen pero desaparece casi instantáneamente

o después de un intervalo de tiempo dependiendo del material y condiciones de carga cuando las cargas son eliminadas.

Este fenómeno temporal o birrefringencia artificial (*figura 1*) fue primero observada por Brewster en 1816. Esta es la característica física en el cual la fotoelasticidad se basa.

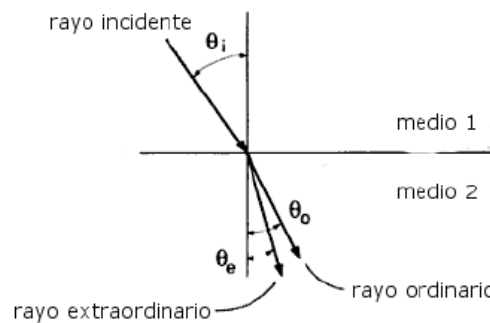


Figura 1.- Birrefringencia o Doble Refracción

Un material birrefringente se caracteriza por:

- Un material birrefringente divide la onda incidente en dos componentes polarizadas perpendiculares, denominadas ordinaria y extraordinaria. Las direcciones de polarización se denominan direcciones principales, mientras que los ejes asociados en el material se denominan ejes principales del índice de refracción.
- Las amplitudes de las dos componentes se establecen a partir del vector eléctrico en componentes a lo largo de las direcciones principales, asumiendo reflexión despreciable y pérdidas por absorción.
- Las velocidades de las dos componentes son diferentes y pueden describirse en términos de dos índices de refracción asociados con las dos direcciones principales.

Estos valores, denominados valores principales del índice de refracción, son designados como n_1 y n_2 .

Para terminar de comprender de mejor manera tanto esta técnica como su principio, a continuación se definen unos conceptos básicos necesarios:

2.2.1.2.- Conceptos Básicos

- Naturaleza de la Luz [2]

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:

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

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.

- Refracción [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 (Figura 2). Sin embargo, como la frecuencia permanece inalterada, la longitud de onda también disminuye:

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

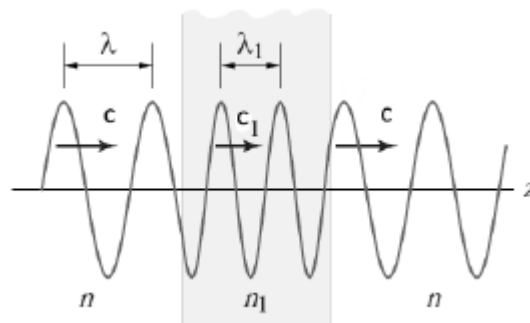


Figura 2.- Refracción de la Luz

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:

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

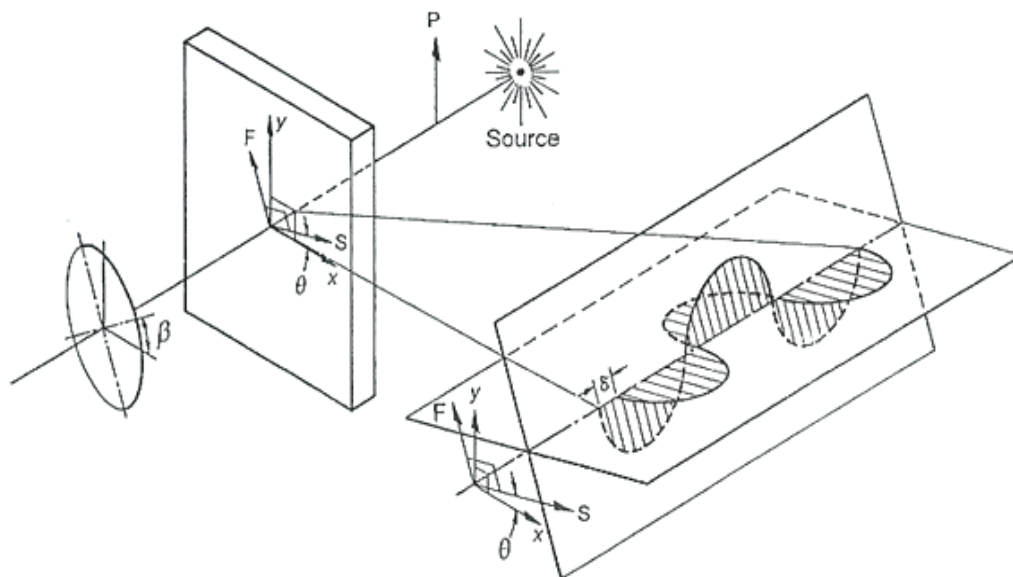


Figura 3.- Retardo Relativo δ [4]

- Polarización

Un rayo de luz no polarizada se compone de un gran número de haces transversales, los cuales están orientados aleatoriamente. Por consiguiente, un rayo de luz polarizada se compone de un gran número de haces transversales, los cuales tienen una orientación predeterminada. Hay tres tipos de luz polarizada: luz polarizada elíptica, luz polarizada circular y luz polarizada plana [7].

Luz Polarizada Plana [12]

Se dice que la luz es linealmente polarizada (o polarizada plana) 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.

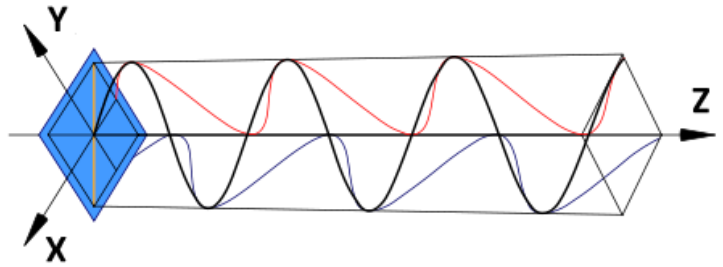


Figura 4.- Polarización Plana

Luz Polarizada Circular [12]

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, se habla de polarización circular. En este caso, si se pudiera observar las oscilaciones del campo eléctrico en un haz de luz linealmente polarizada, viniendo de frente (saliendo de la pantalla), entonces el movimiento descrito sería *circular*.

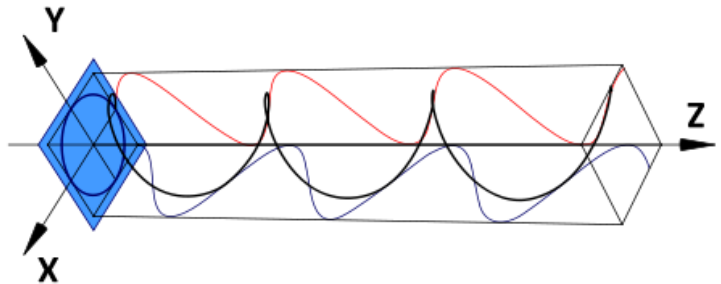


Figura 5.- Polarización Circular

Luz Polarizada Elíptica [12]

La polarización elíptica se presenta cuando las componentes E_x y E_y se encuentran desfasadas un valor ϵ arbitrario, y a su vez presentan una amplitud arbitraria.

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 polarización circular.

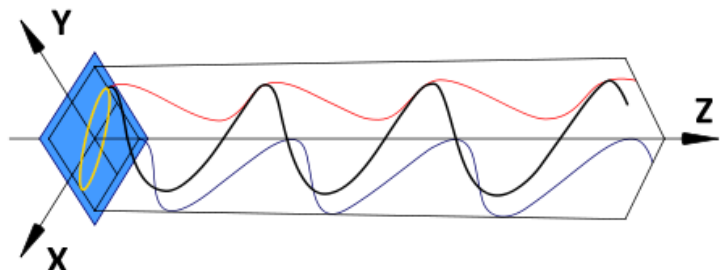


Figura 6.- Polarización Elíptica

Es por esto que a la polarización lineal y polarización circular se les considera casos especiales de *polarización elíptica*, a pesar de que éstos no manifiesten estrictamente un movimiento elíptico.

Las proyecciones en el eje x-y de estas dos formas anteriores, se muestran en la siguiente figura:

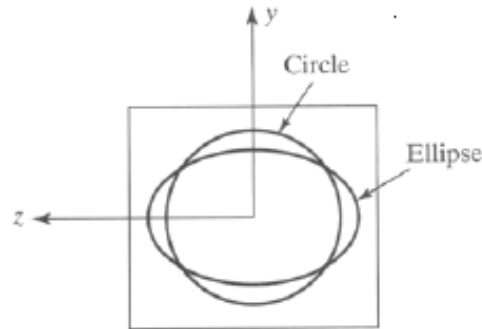


Figura 7.- Proyecciones en el Plano x – y de las Polarizaciones Circular y Elíptica [7]

2.2.1.3.- Ecuación Fundamental de la Elasticidad:

Ley Tenso - Óptica [4]

Consideremos un modelo birrefringente sujeto a un estado de tensión plana. El estado de tensión en un punto del modelo vendrá caracterizado a través de las tensiones principales σ_1 , σ_2 . Cuando el modelo es cargado, experimentalmente se muestra que el modelo pasa a ser doble refractivo y las direcciones de los ejes de polarización en un 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:

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

De 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 el modelo es iluminado con luz polarizada plana, el retardo relativo existente entre las dos componentes refractadas pasa a ser:

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

Esta ecuación indica que en un modelo fotoelástico, el retardo relativo cambia de un punto a otro dependiendo del nivel de tensión. Si $c_1 + c_2$ se reemplaza por C , el retardo relativo viene dado como:

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

El coeficiente tenso-óptico relativo C normalmente se asume como constante del material. Sin embargo, varios estudios han mostrado que este coeficiente depende de la longitud de onda y debería ser usado con cuidado.

Esta expresión puede reescribirse en términos del orden de franja N como:

$$N = \frac{\delta}{2\pi} = h \frac{C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (10)$$

Si despejamos la diferencia de tensiones principales en la ecuación anterior:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N \cdot F_\sigma}{h} \quad (11)$$

donde $F_\sigma = \frac{\lambda}{C}$ es conocido como el valor de franja del material, con unidades $N/(\text{mm} \cdot \text{franja})$ y h el valor del espesor del elemento.

Esta última ecuación es constituye la Ecuación Fundamental de la Fotoelasticidad, llamada Ley Tenso-Óptica, que relaciona el campo de tensiones con el orden de franja.

2.2.2.- Técnicas Ópticas

Una vez conocidos los términos fundamentales de la fotoelasticidad, como término general, a continuación, se van a especificar las posibles técnicas ópticas experimentales a emplear, hasta centrar el tema en la técnica en la que se basa este trabajo, la fotoelasticidad en reflexión.

Existen varias técnicas de análisis experimental de esfuerzos por métodos ópticos como, la técnica de Speckle también conocida como Correlación Digital de Imágenes (CDI) o la propia fotoelasticidad, entre otros. La fotoelasticidad tiene varias ventajas sobre otros métodos ya que es una técnica sencilla de implementar, se pueden utilizar en estructuras de gran tamaño, ayuda a establecer criterios de diseño ya que se puede modificar el modelo para producir un diseño óptimo con el mínimo posible de esfuerzos máximos, etc.

Centrándonos en la técnica objeto de estudio de este trabajo, es decir, la fotoelasticidad, cabe destacar que encontramos dos maneras de implementarla: por transmisión y por reflexión.

- **Fotoelasticidad en Transmisión**

Técnica que usa ciertos materiales transparentes no cristalinos que son ópticamente isotrópicos bajo condiciones normales, pero pasan a ser doblemente refractivos o birrefringentes cuando son sometidos a solicitaciones de carga [4].

- **Fotoelasticidad en Reflexión**

La fotoelasticidad en reflexión es una extensión de la fotoelasticidad en transmisión para el análisis de materiales opacos [4]. Así, un fino recubrimiento birrefringente es pegado en el prototipo con un adhesivo reflectante.

A diferencia de la fotoelasticidad en transmisión, en reflexión el plástico birrefringente no es cargado directamente, pero las deformaciones desarrolladas sobre la superficie del modelo son transmitidas a través del adhesivo al recubrimiento.

Una vez definidas y diferenciadas, general y brevemente, las técnicas fotoelásticas, se va a proceder a desarrollar de una manera más específica la técnica propia de este trabajo [10].

2.2.2.1.- Fotoelasticidad en Reflexión [13]

La fotoelasticidad en reflexión es una técnica de campo completo usada extensamente en deformaciones superficiales medidas con precisión para determinar las tensiones en un elemento o estructura durante ensayos estáticos o dinámicos.

Con este método, primero se vincula, al elemento a ensayar, un revestimiento especial de plástico sensible a la deformación. Luego, cuando son aplicadas las cargas de ensayo o de servicio al elemento, la protección es iluminada con luz polarizada de un polariscopio de reflexión. Cuando se observa a través del polariscopio, el revestimiento muestra las deformaciones en un diagrama informativo coloreado que inmediatamente revela la distribución global de deformación y las áreas de puntos altamente deformadas. Con un transductor óptico (compensador) adosado al polariscopio, el análisis tensional cuantitativo se puede realizar rápida y fácilmente. Se pueden hacer grabaciones permanentes de la distribución global de deformación por fotografía o por videograbación.

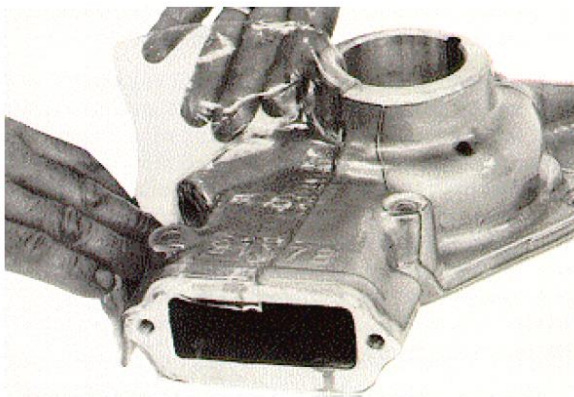


Figura 8.- Aplicación del Recubrimiento Fotoelástico a la Carcasa de una Bomba de Agua [13].

Concretamente con la fotoelasticidad en reflexión se pueden hacer, además de todos los puntos antes expuestos en el punto 2.2.1 en el que hemos definido los procesos que la fotoelasticidad puede realizar, los siguientes puntos:

- Optimizar la distribución de tensión en elementos y estructuras para mínimo peso y máxima fiabilidad.
- Medir tensiones y direcciones principales en cualquier punto del elemento revestido.
- Ensayar repetidamente bajo combinaciones de carga alternante sin repetir el revestimiento (protección) del elemento.
- Realizar medidas de tensión en el laboratorio o “a cielo abierto”, sin verse afectadas por la humedad o el tiempo.

Los revestimientos, en fotoelasticidad en reflexión, se pueden aplicar a la superficie de cualquier elemento de ensayo sin tener en cuenta su forma, tamaño, o composición del material. Para formas complejas a revestir, se funde plástico líquido en un molde de placa plana y es dejado polimerizar parcialmente. Todavía en un estado flexible, el revestimiento es desplazado del molde y conformado manualmente a los contornos del elemento de ensayo. Cuando está totalmente solidificado, el revestimiento de plástico se adapta en su lugar con un cemento especial reflectante, y el elemento está entonces preparado para ser ensayado. Para superficies planas, se cortan láminas planas premanufacturadas a medida y se adaptan directamente al elemento de ensayo.

Respecto al recubrimiento fotoelástico de este Trabajo, cabe destacar un punto muy importante, no se ha utilizado directamente este tipo de herramienta para conseguir el principio de birrefringencia, sino que se ha pintado con aerosol en la superficie inversa usando una pintura de plata, como bien referencia Patterson et. Al [3].

2.2.3.- Simulación Numérica: Elementos Finitos [11]

Para un uso óptimo de los programas disponibles para un análisis usando elementos finitos requieren entender adecuadamente su metodología y así producir resultados de calidad.

La aplicación utilizada para este estudio es SolidWorks (versión 2010), un programa de diseño asistido por ordenador para modelado mecánico, el cual permite realizar todo tipo de estudios y simulaciones virtuales, como es el caso de elementos finitos.

Los elementos finitos consisten en un método de análisis en ingeniería que permite reproducir virtualmente a un componente o sistema mecánico en situación de trabajo real ofreciendo las ventajas de la reducción de costes, tiempo, equipamiento y accesibilidad necesarios en un análisis real. Actualmente el método ha logrado desarrollarse en casi todos los campos de la ingeniería por lo que un análisis con elementos finitos puede aplicarse a casi todos los problemas de la industria. Habitualmente el manejo del método ha requerido un profundo conocimiento físico-matemático pero en la actualidad la disponibilidad de software y hardware han puesto al alcance de los usuarios esta potente herramienta.

2.3.- Estado del Arte

2.3.1.- Aplicación de la Técnica de Reflexión en Fotoelasticidad [4]

La fotoelasticidad en reflexión tiene una historia establecida de aplicaciones con éxito en cada campo de fabricación y construcción donde se emplea el análisis tensional, incluyendo: automoción, industria aeronáutica y aeroespacial, motores, construcción de barcos, herramientas y muchos más.

La historia de la fotoelasticidad se remonta, al menos, 150 años, con las observaciones de Brewster en 1853. Sin embargo este tiempo incluye largos periodos de relativa quietud, la

primera después de su descubrimiento inicial hasta que los polímeros fueron realmente útiles en la década de 1940 y el segundo tras el desarrollo del método

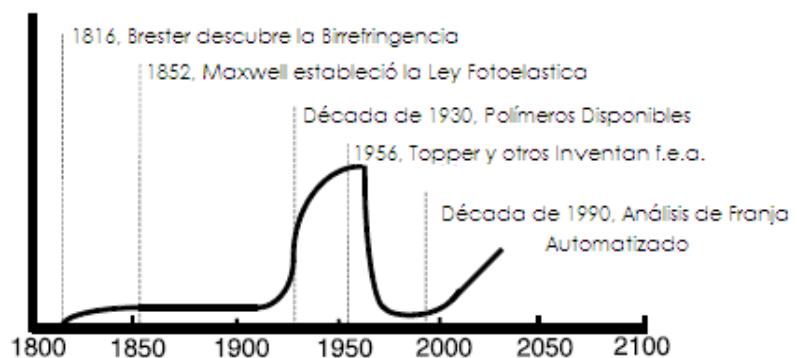


Figura 9.- Diagrama Esquemático ilustrando la Popularidad Fluctuante del análisis de Tensión Fotoelástico [3]

de elementos finitos a finales de 1950 [3].

Mesnager fue el primero en estudiar el concepto de capas fotoelásticas. Él usaba segmentos de cristal como capa. El método fue, además, desarrollado por Oppel en 1937, el cual usó láminas planas de Baquelita, que fue la primera sustancia plástica totalmente sintética (nombre procedente de su descubridor Leo Baekeland, y debido a esto, en muchos sitios, se puede encontrar escrita como “bakelita”). Ambos, cristal y Baquelita no fueron la elección ideal como materiales para capas fotoelásticas. El cristal tiene un módulo alto y tiende a reforzar significativamente al elemento a estudio.

La disponibilidad de resinas epoxi en 1950 contribuyeron significativamente al desarrollo de la técnica. Zandman, en 1960, desarrolló un único procedimiento para preparar plástico adaptable para capas de geometrías complejas de componentes industriales. Zandman estudió el problema de reforzamiento por la capa fotoelástica y los factores de corrección derivados de interpretar los patrones de franjas para uso ingenieril.

Algunas aproximaciones son hechas de las interpretaciones de la información óptica recolectada, utilizando los principios de la fotoelasticidad en transmisión y relacionando la respuesta óptica del recubrimiento con los esfuerzos del mismo. Basándose en los principios de la mecánica de sólidos, los esfuerzos del modelo a estudio son determinados por los esfuerzos del recubrimiento. El análisis es mejorado por el uso de factores de corrección apropiados.

2.3.2.- Aplicación del Análisis mediante Elementos Finitos

En las últimas décadas, los avances en software y hardware y la disminución de costes de los equipos informáticos, han favorecido la implementación de procesos de simulación que, en ocasiones, permiten realizar estimaciones aceptables de comportamiento de materiales, evitando la realización de numerosos ensayos y con el consecuente ahorro de material, equipos y consumo de recursos [11].

Aunque el nombre del FEM se ha establecido recientemente, el concepto se ha usado desde hace varios siglos. El empleo de métodos de aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos es conocido desde hace mucho tiempo. El concepto de “elementos finitos” parte de esa idea.

El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día ha estado ligado al cálculo estructural fundamentalmente en el campo aeroespacial. En los años 40 Courant propone la utilización de funciones polinómicas para la formulación de problemas elásticos en subregiones triangulares, como un método especial del método variacional de Rayleigh-Ritz para aproximar soluciones [14].

Aunque Isaac Newton propuso la forma más conceptual de FEM dentro de las bases de cálculo integral y diferencial, no fue hasta la década de los 60, concretamente en 1964, cuando finalmente se pudieron comenzar a considerar dentro del análisis de elemento finito los análisis térmicos y deflexiones de gran magnitud. Un año después se comenzaron a aplicar los análisis dinámicos con los cuales se exploraron los campos de flujo, torsiones de flecha y conducción de calor [15].

Actualmente el método se encuentra en una fase de gran expansión: es ampliamente utilizado en la industria y continúan apareciendo cientos de trabajos de investigación en este campo. Los ordenadores han aportado el medio eficaz de resolver la multitud de ecuaciones que se plantean en el MEF, cuyo desarrollo práctico ha ido caminando parejo de las innovaciones obtenidas en el campo de la arquitectura de los ordenadores. Entre éstas,

además de permitir la descentralización de los programas de EF, ha contribuido a favorecer su uso a través de sofisticados paquetes gráficos que facilitan el modelado y la síntesis de resultados. Hoy en día ya se concibe la conexión inteligente entre las técnicas de análisis estructural, las técnicas de diseño (CAD), y las técnicas de fabricación.

2.4.- Análisis Experimental

En esta sección, se va a explicar todo lo referente a la parte experimental del TFG: procedimiento seguido en el laboratorio, elementos a estudiar, herramientas utilizadas, etc.

2.4.1.- Elementos y Modelos Empleados

En este TFG, se han estudiado cuatro modelos: un disco, probeta con taladro centrado, otra con cambio de sección y una última probeta CCT con grieta centrada (CCT: Center – Cracked - Tension) y taladro.

Para la calibración del polariscopio se suele emplear un modelo que muestre una distribución del campo de tensiones conocida y que sea sensible a la desalineación de los elementos ópticos. Por ello, se ha empleado una de las cuatro probetas anteriormente citadas, el disco, el cual se ha sometido a compresión diametral ya que presenta simetría tanto en geometría como en carga y, por tanto, la solución del campo de tensiones es conocida. Las dimensiones del modelo fueron:

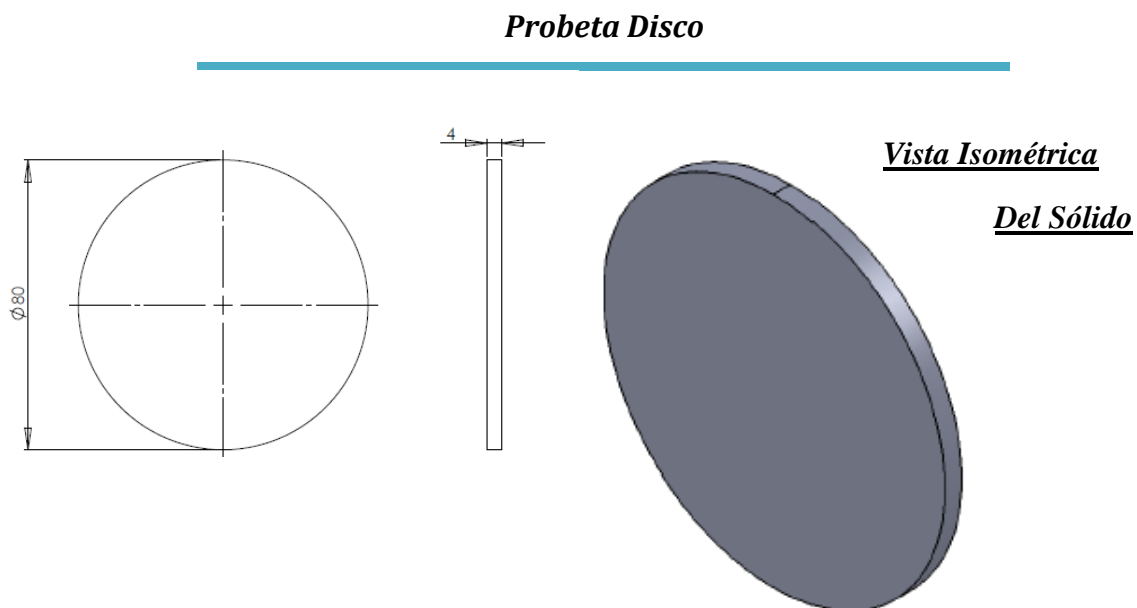


Figura 10.- Dimensiones y Geometría de la Probeta de Disco (cotas en mm)

Una vez presentada la pieza para la puesta a punto, vamos a describir las dimensiones y formas de los demás elementos estudiados:

Probeta con Taladro Centrado

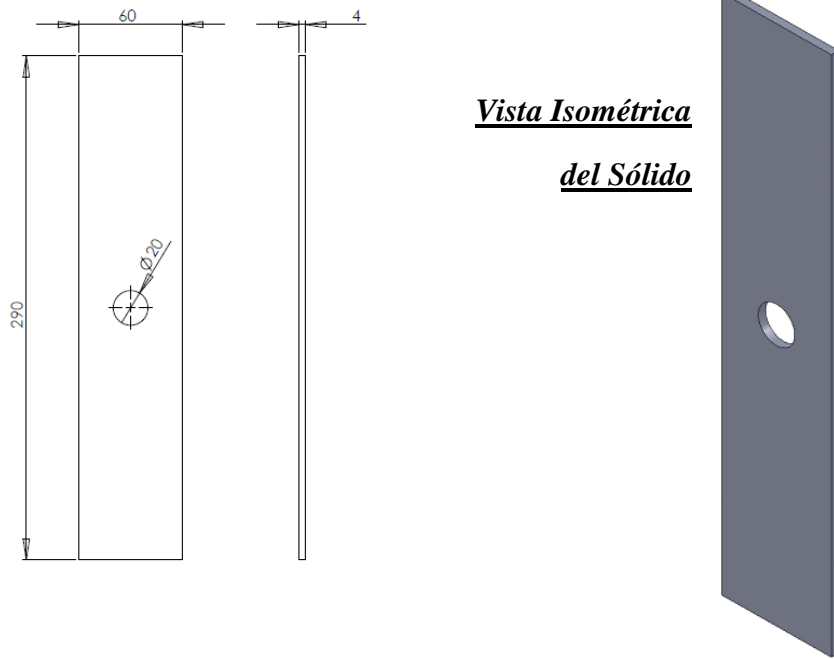


Figura 11.- Dimensiones y Geometría de la Probeta con Taladro Central (cotas en mm)

Probeta con Cambio de Sección

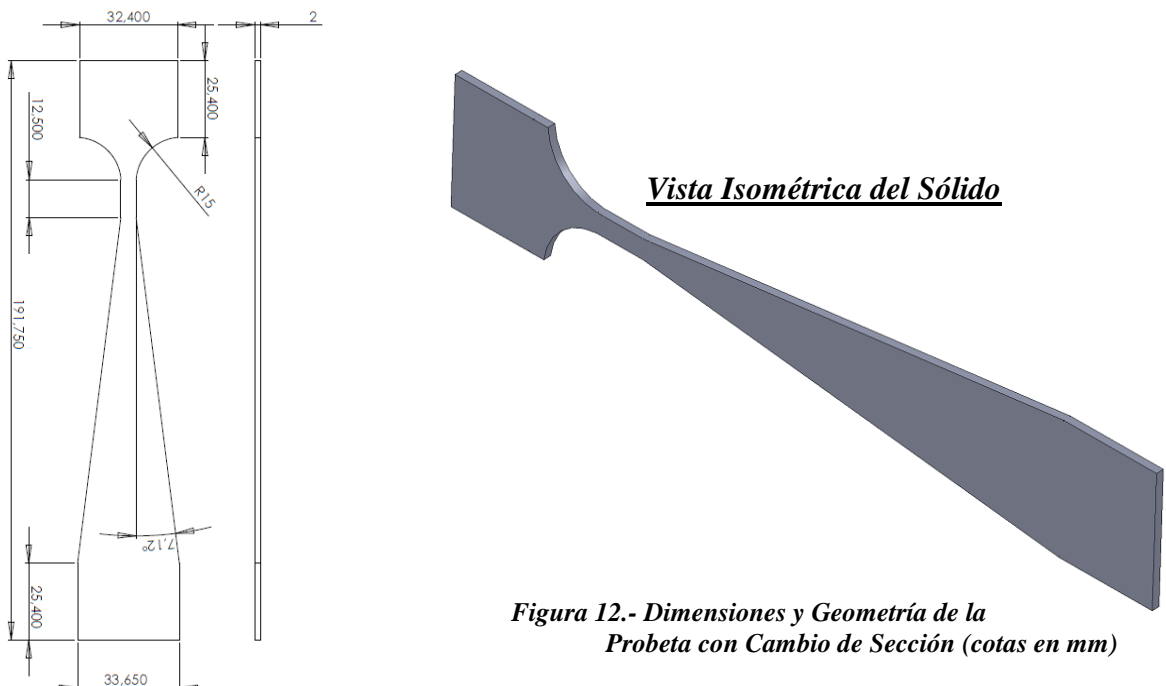
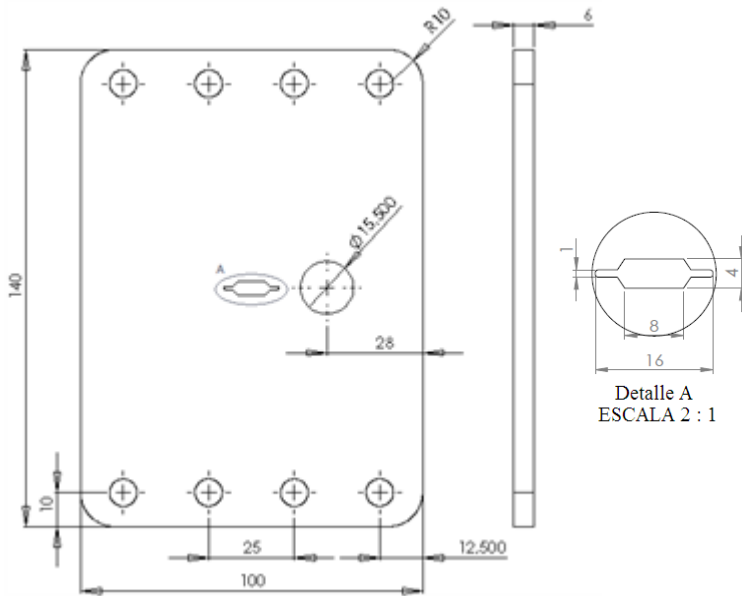


Figura 12.- Dimensiones y Geometría de la Probeta con Cambio de Sección (cotas en mm)

Probeta CCT con Taladro



Vista Isométrica del Sólido

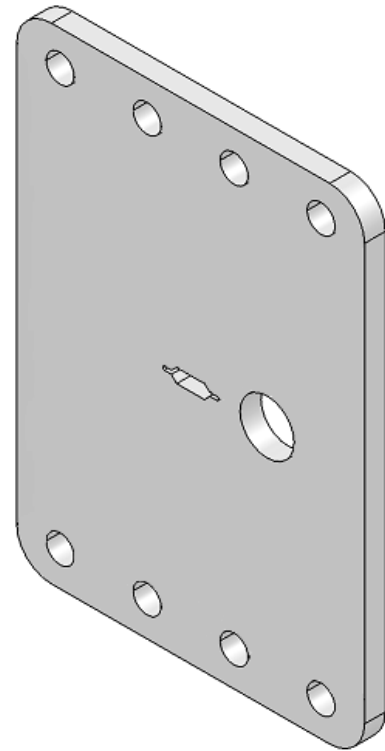


Figura 13.- Dimensiones y Geometría de la Probeta CCT con Taladro (cotas en mm)

- Material**

El material utilizado y el material del que están compuestas estas probetas anteriormente descritas es el **Policarbonato**, cuyas propiedades son las siguientes:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de Elasticidad en X	2300	N/mm ²
Coefficiente de Poisson en XY	0,37	N/D
Módulo Cortante en XY	318,9	N/mm ²
Densidad de Masa	1200	Kg/m ³
Límite de Tracción en X	65	N/mm ²
Límite de Compresión en X	80	N/mm ²
Límite Elástico	65	N/mm ²
Coefficiente de Expansión Térmica en X	$6,6 \cdot 10^{-5}$	/K
Conductividad Térmica en X	0,22	W/(m· K)
Calor Específico	1250	J/(Kg· K)

Tabla 1.- Descripción de las Propiedades Generales del Policarbonato

El policarbonato es un grupo de termoplásticos fácil de trabajar, moldear y termoformar, y son utilizados ampliamente en la manufactura moderna. El nombre “policarbonato” se basa en que se trata de polímeros que presentan grupos funcionales unidos por grupos carbonato en una larga cadena molecular.

Este material presenta también entre sus propiedades, un alto índice de sensibilidad, un grado bajo de deslizamiento a temperatura ambiente y es relativamente libre de efectos de envejecimiento [16].

2.4.2.- Equipos Empleados

En este punto se van a describir con detalle toda la maquinaria y herramientas utilizadas en el laboratorio para poder llevar a cabo todos los ensayos experimentales. Estos dispositivos son los siguientes:

- a) Un polariscopio, que incluye:
 - Polarizador.
 - Lámina de cuarto de onda.
 - Una segunda lámina de onda.
 - Analizador (que es el segundo polarizador).
- b) El recubrimiento birrefringente unido al modelo a estudiar.
- c) Un sistema para ver o fotografiar el modelo.
- d) Máquina de ensayos.
- e) Una fuente de luz (que en reflexión debe ser monocromática [6]).

A) Polariscopio [2]

A.1) Componentes

El polariscopio es el equipo empleado en fotoelasticidad. Se trata de una disposición determinada de unos elementos ópticos, los cuales se van describir a continuación. Un material birrefringente se inserta en el polariscopio, de tal forma que los patrones de franjas, relacionados con la diferencia de tensiones principales y las direcciones de las tensiones principales en el modelo, son capturados mediante una cámara digital y procesados y visualizados a través de un ordenador [2]. El tipo de polariscopio que se emplea para la

fotoelasticidad en reflexión, como su propio nombre indica, es un polariscopio por reflexión, el cual es un caso especial de un polariscopio circular, el cual se explica a continuación.

➤ **Polarizador**

Un polarizador (Figura 14) es un elemento óptico que transforma la luz incidente en luz polarizada plana.

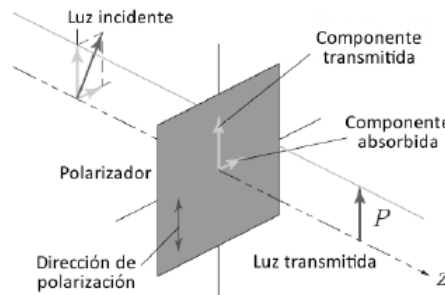


Figura 14.- Polarizador

En la figura, una onda de luz con una amplitud orientada aleatoriamente incide en el polarizador. Cuando la onda entra en contacto con el polarizador, ésta se divide en dos componentes, una paralela a la dirección de polarización y la otra perpendicular a esta dirección. La componente paralela es transmitida, mientras que la componente perpendicular es absorbida. La luz emergente del polarizador es por tanto polarizada plana según la dirección de polarización.

➤ **Lámina de Onda**

Una lámina de onda (Figura 15) divide la luz incidente en dos componentes, pero en lugar de absorber una de estas componentes, introduce un retardo relativo entre ambas.

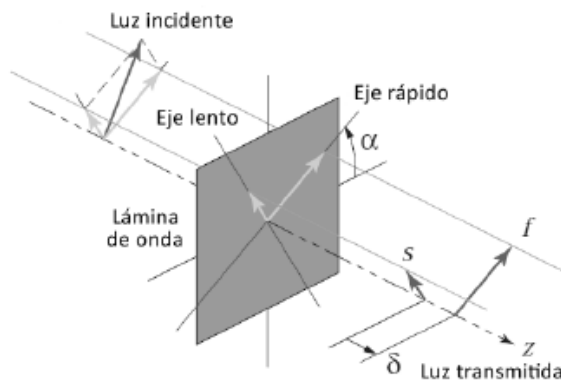


Figura 15.- Lámina de Onda

En la figura, el eje rápido de la lámina de onda forma un ángulo α con respecto a una dirección de referencia elegida de forma arbitraria. La componente f de la luz incidente sufre un retardo al atravesar la lámina de onda. Sin embargo, la componente perpendicular s sufre un retardo aún mayor, dándose por tanto un retardo relativo δ entre ambas componentes.

➤ Lámina de Cuarto de Onda

La lámina cuarto de onda (Figura 16) es un caso especial de lámina de onda en la que el ángulo $\alpha = 45^\circ$ y el retardo relativo introducido entre las componentes transmitidas es de $\lambda/4$.

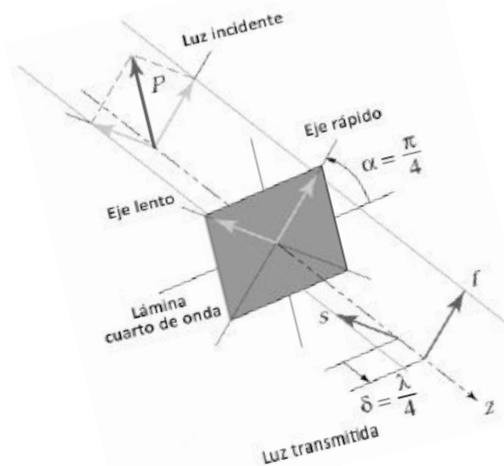


Figura 16.- Lámina de Cuarto de Onda

La lámina cuarto de onda ha sido indicada por su gran importancia en el equipo empleado en fotoelasticidad.

A continuación se van a explicar los tipos de polariscopios que podemos encontrar, según su disposición, y el tipo de polariscopio que se necesita para llevar a cabo la fotoelasticidad en reflexión:

A.2) Tipos de Polariscopio

Polariscopio Plano

Una de las disposiciones ópticas más simples es el polariscopio plano (Figura 17). Está compuesto por una fuente de luz, un polarizador, el modelo y un analizador. El polariscopio plano es iluminado con luz monocromática. Cuando ésta atraviesa el modelo, el estado de polarización cambia de punto a punto dependiendo de las direcciones de las tensiones principales y la diferencia entre las mismas. El polarizador se dispone a 90°

respecto a una dirección de referencia (normalmente la horizontal). La información sobre el campo de tensiones puede ser obtenida si el estado de polarización de la luz transmitida es estudiado. Esto se obtiene introduciendo un polarizador a 0° . Ya que este elemento ayuda al análisis de la luz emergente, se conoce como analizador. Con la introducción de este elemento, las franjas observadas corresponden a los puntos en los que la intensidad de la luz transmitida es cero. Es de notar que, en esta disposición, polarizador y analizador están cruzados y el fondo de la imagen es oscuro.

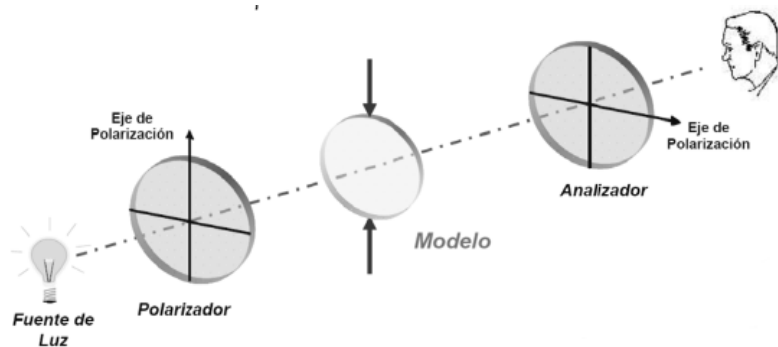


Figura 17.- Polariscopio Plano

Patrones de franjas observadas en un polariscopio plano

La luz incidente permanece inalterada en todos esos puntos donde el modelo se comporta como una lámina de onda completa. Esto sucede cuando la diferencia de tensiones principales es tal que causa un retardo relativo constante. Como las tensiones son continuas, se observa una colección de puntos formando contornos que satisfacen la condición anterior y al campo de franjas respectivo se le conoce como isocromático. Por tanto, las isocromas son los patrones de franjas observados en el modelo en las que el retardo relativo es constante. Así, conociendo el orden de franja isocromática en un punto del modelo y usando la ley tenso-óptica, se puede determinar la diferencia de tensiones principales en ese punto. Otra posibilidad, en la que la luz incidente permanece inalterada es cuando el eje del polarizador coincide con una de las direcciones de las tensiones principales en el punto de interés. En este caso, la extinción de la luz no depende de la longitud de onda y se observan franjas oscuras. Éstas son conocidas como isoclinas, definiendo contornos de inclinación constante. Por tanto, las isoclinas representan los contornos a lo largo de los cuales la orientación de las direcciones de las tensiones principales es constante. Por consiguiente, en un polariscopio plano, se tienen dos conjuntos de contornos, isocromas e isoclinas,

superpuestas unas sobre otras. Estos dos patrones de franjas se pueden distinguir utilizando luz blanca, excepto cuando el orden de franja toma un valor de cero. En este caso, para distinguir las isoclinas del orden de franja de valor cero, hay que girar polarizador y analizador hasta conseguir una disposición cruzada. El orden de franja cero no se moverá mientras que las isoclinas sí lo harán.

Análisis del polariscopio plano mediante el cálculo de Jones

En general, un elemento óptico en un polariscopio introduce una rotación y un retardo. Mediante el cálculo de Jones, estas operaciones básicas son representadas como matrices. De esta forma, usando el cálculo de Jones, las componentes del vector de la luz a lo largo del eje del analizador y perpendicular al mismo para la disposición de polariscopio plano son obtenidas como sigue:

$$D \begin{bmatrix} E_y \\ E_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & -i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ -i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} k e^{i\omega t} \quad (12)$$

Donde:

- δ es el retardo relativo introducido por el modelo.
- θ es el ángulo de las isoclinas.
- $K \cdot e^{i\omega t}$ es el vector de la luz incidente.

Alternativamente, se puede determinar la intensidad de la luz emergente a través del producto $E_x \cdot E_x^*$, donde E_x^* representa el conjugado complejo de E_x . Así, la intensidad de la luz transmitida es:

$$I_p = I_a \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin^2 2\theta \quad (13)$$

Donde I_a hace referencia a la amplitud de la luz incidente. De la expresión anterior se observa que la extinción de la luz se obtiene cuando: a) $\theta = 0$ o $\pi/2$, o b) $\delta = 2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$). La condición “a” corresponde a las isoclinas y la “b” a las isocromas.

Polariscopio Circular

La Figura 18 muestra una disposición general para un polariscopio circular. Está compuesto por una fuente de luz, un polarizador, una lámina cuarto de onda, el modelo, una segunda lámina cuarto de onda y un analizador. En este tipo de polariscopio, la luz polarizada circular se usa para revelar el campo de tensiones en el modelo. Esto se logra introduciendo una lámina cuarto de onda entre polarizador y modelo, con su eje lento a 45° con respecto del eje de polarización del polarizador. La luz emergente es analizada usando la combinación de una segunda lámina cuarto de onda y un analizador. El eje lento de esta lámina cuarto de onda se dispone a 45° respecto del eje de polarización del analizador. Por tanto, en esta disposición, en la que polarizador y analizador se encuentran cruzados al igual que las dos láminas cuarto de onda, el fondo de la imagen aparece oscuro y, por tanto, esta disposición se conoce como disposición de campo oscuro.

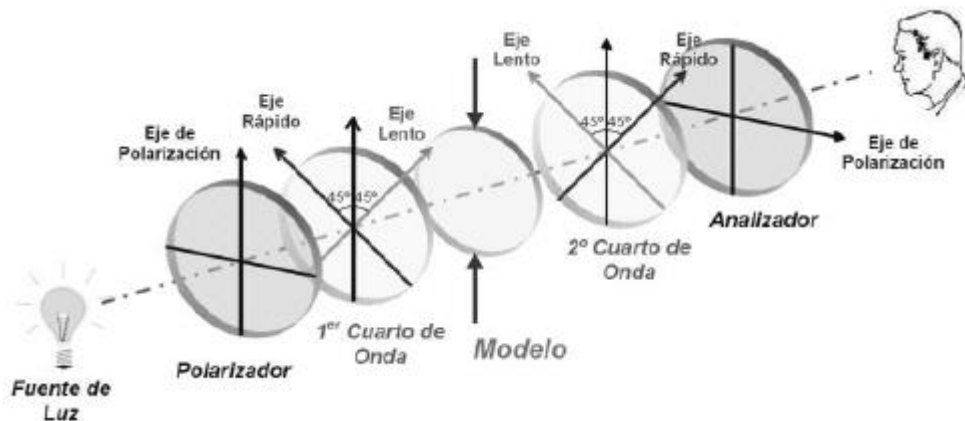


Figura 18.- Polariscopio Circular

Aunque varias combinaciones pueden establecerse entre los distintos elementos ópticos para obtener campo oscuro o campo claro, la Tabla 2 muestra las combinaciones más popularmente conocidas. Se observa que si la disposición del polarizador-analizador y las láminas cuarto de onda es la misma, bien cruzada o paralela, el campo de fondo es oscuro; mientras que si la disposición es cambiada, el campo de fondo es claro.

Configuración	Polarizador y Analizador	Láminas Cuarto de Onda	Campo de Fondo
Polariscopio Plano	Cruzados	-	Oscuro
	Cruzados	Cruzados	Oscuro
Polariscopio Circular	Paralelos	Paralelos	Oscuro
	Cruzados	Paralelos	Plano
	Paralelos	Cruzados	Plano

Tabla 2.- Distintas Combinaciones de los Elementos Ópticos y Campo de Fondo Observado

Al igual que se realizó para el caso de disposición de polariscopio plano, la representación del polariscopio circular a partir del cálculo de Jones es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} E_y \\ E_x \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & -i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ -i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} k e^{i\omega t} \quad (14)$$

La intensidad de la luz transmitida en campo oscuro se obtiene del producto de la componente x y el conjugado complejo de la misma:

$$I_d = I_a \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (15)$$

Para el caso de campo claro, el analizador transmitirá la componente E_y , quedando la intensidad:

$$I_l = I_a \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (16)$$

Es conveniente hacer notar que para ambos casos, campo oscuro y claro, la intensidad es independiente de θ , por lo que la condición de extinción es sólo función de δ y, por consiguiente, sólo se observarán las isocromas.

En la disposición de campo oscuro, la intensidad es cero cuando $\delta = 2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), correspondiendo las franjas a valores de $0, 1, 2, \dots$. En disposición de campo claro, la intensidad de la luz es cero cuando $\delta = (2m + 1)\pi$, correspondiendo las franjas a valores de $0.5, 1.5, 2.5, \dots$. En la Figura 19 se muestra el campo de franjas isocromático para las disposiciones de campo oscuro y campo claro. Se puede también observar el cambio de franjas entre las imágenes de campo oscuro y campo claro.

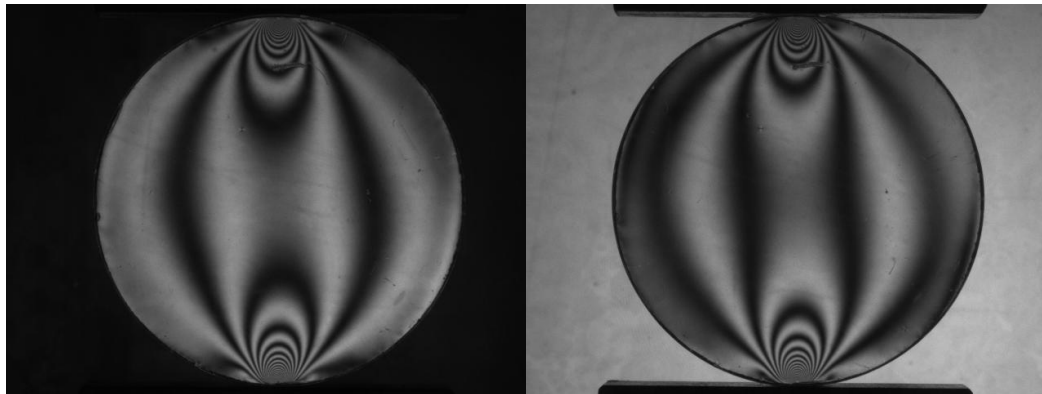


Figura 19.- Campo de Franjas Isocromático: Izq) Campo Oscuro, Der) Campo Claro

Una vez descritos los tipos de polariscopios, destacar que para llevar a cabo la fotoelasticidad en reflexión, se necesita un polariscopio de reflexión, el cual es, como se ha dicho anteriormente, un caso especial de un polariscopio circular.

Polariscopio por Reflexión [4]

Cuando se usan revestimientos fotoelásticos (en nuestro caso, una capa de pintura plateada), la luz debe ser reflejada por el interfaz entre el revestimiento (pintura) y el prototipo a estudio. Como en fotoelasticidad en transmisión, el fenómeno óptico puede ser fácilmente relacionado con las tensiones, solo si se utiliza una incidencia normal.

La disposición óptica más simple para obtener una incidencia normal está mostrada en la Figura 20.

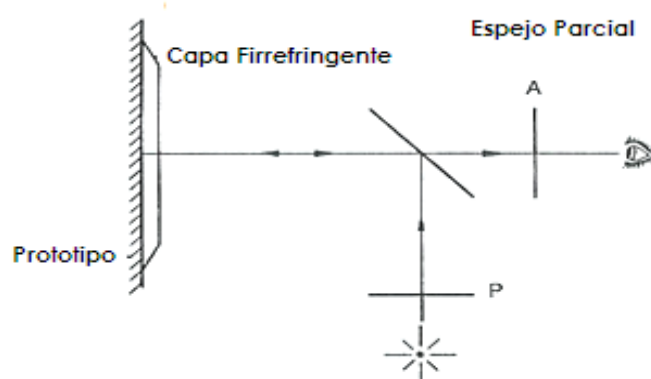


Figura 20.- Disposición Óptica para Obtener una Incidencia Normal en un Polariscopio de Reflexión

Aunque esta disposición es bastante buena para un polariscopio plano, para un polariscopio circular tiene que proporcionar una compensación apropiada como el espejo parcial cambia la elipticidad de la polarización. Normalmente, los polariscopios de este tipo son grandes y voluminosos para su transporte. La figura 21 muestra otra disposición, la cual es más portátil y también más disponible comercialmente. La más natural de las disposiciones de los elementos no garantiza una incidencia normal. El ángulo oblicuo es normalmente del orden de 4° , cuya influencia en el patrón de interpretación óptica es considerada insignificante. Por tanto, la aproximación ingenieril usada en la fotoelasticidad en reflexión comienza de la información recogida [4].

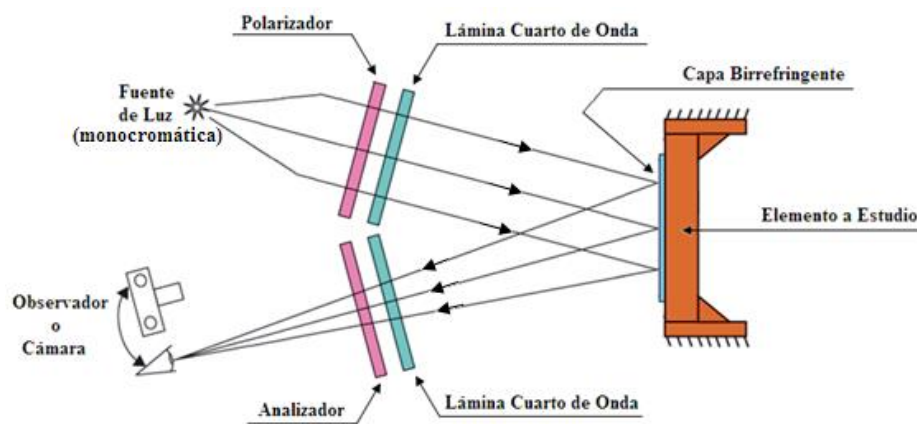


Figura 21.- Representación Esquemática de un Polariscopio por Reflexión

El polariscopio en reflexión básico es similar a un polariscopio de transmisión que se dobla en el medio. *Este trabajo se ha llevado a cabo con un polariscopio de reflexión modelo 031.*



Figura 22.- Posicionamiento del Analizador, Polarizador y Láminas de Cuarto de Onda del Polariscopio Real de reflexión Modelo 031

B) Revestimiento Birrefringente

Algunas de las principales características de los revestimientos birrefringentes son:

- están disponibles en una amplia gama de rigideces y espesores.
- se eligen para satisfacer el problema en parte.
- se pueden hacer usando plásticos fotoelásticos ordinarios.
- suelen ser comprados como hojas de plano flexible que se pueden aplicar a la plana o superficies cilíndricas,
- se puede aplicar a superficies complejas el uso del método de contorno de hoja [6].

Solamente se citan estas características puntuales, junto con lo explicado en el punto 2.2.2.1., para poder tener una idea general sobre la capa birrefringente, y saber que esta suele ser la técnica o la manera utilizada para conseguir esta propiedad de birrefringencia a la hora de utilizar la fotoelasticidad en reflexión. Pero se quiere resaltar, que en el caso de este Trabajo Fin de Grado, no se ha usado este procedimiento, sino que, como anteriormente se ha dicho, se han pintado los modelos empleados experimentalmente con un aerosol de pintura plateada, la cual realiza la misma función reflectante que realiza el recubrimiento, pudiendo así llevar a cabo los ensayos de la misma manera y con unos costes muchos más bajos y de una manera más fácil y rápida.



Figura 23.- Pintura Plateada, de la marca AGALSA, usada para pintar las piezas ensayadas

C) Cámara CCD AVT Guppy Pro F-033B/C

La cámara empleada para la captura de imágenes de franjas para los distintos estados de carga es una cámara con sensor CCD marca AVT modelo Guppy Pro F-033B/C.

Características	Especificaciones
Interfaz	IEEE 1934b – 800 Mb/s, 1 puerto
Resolución	656 x 492
Sensor	Sony ICX414
Tamaño del Tipo de Sensor	1/2
Tamaño de la Celda	9.9 μ m
Máx. Frecuencia de Imagen a Máx. Resol.	85 fps
A/C	14 bit
Profundidad de Bit	8 -12 bit
Dimensiones (L x W x H)	44.8 mm x 29 mm x 29 mm
Masa	75 g (sin lente) – 80 g (con lente)

Tabla 3.- Características y Especificaciones de la Cámara Guppy Pro F-033B/C

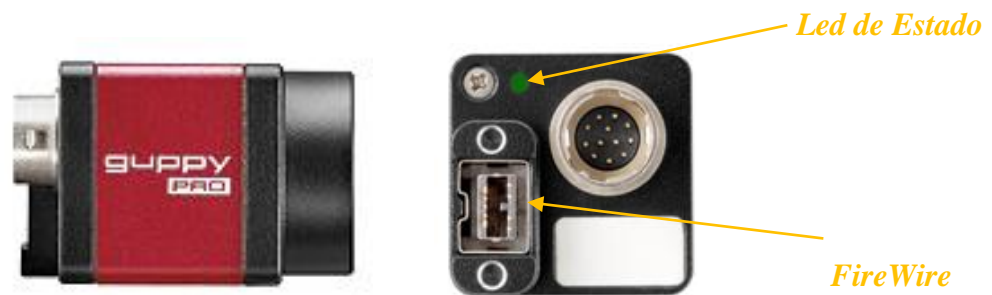
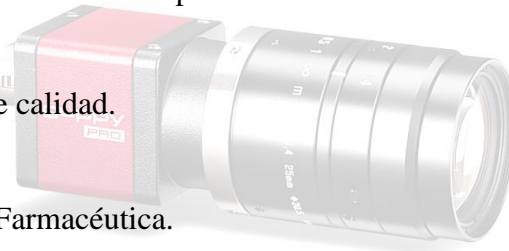


Figura 24.- Perfil y Parte Trasera de una cámara Guppy Pro

Guppy PRO tiene una amplia variedad de aplicaciones industriales:

- La visión artificial e inspección.
- Robótica.
- Control de calidad.
- Logística.
- Industria Farmacéutica.
- Su monitoreo / Tráfico.
- Las aplicaciones con restricciones de espacio... y muchos más.



A parte de la propia cámara justamente descrita, también han hecho falta otras herramientas imprescindibles como son un cable para conectar la cámara con un ordenador y una lente adecuada:

<i>Cable FireWire (IEEE 1394b)</i>	<i>Lente u Objetivo</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Facilita una simple compatibilidad computacional, además de una transferencia bidireccional de datos. - Es usado para conectar la cámara con el dispositivo donde se quiere obtener la imagen. - Interoperabilidad con múltiples tipos y marcas de cámaras.  <p><i>Figura 25.- Cable y Detalle de Conexión FireWire</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - La lente utilizada es: Lente zoom MLH-10x EO de 25 mm. - Campo de Visión a 500 mm = 122 mm x 91 mm. - Campo de Visión a 1000 mm = 250 mm x 187 mm.  <p><i>Figura 26.- Vistas de Perfil y Alzado de la Lente</i></p>

Tabla 4.- Elementos necesarios para Trabajar con una Cámara Guppy Pro

D) Máquina de Laboratorio MTS Criterion (Model 043)

Características	Especificaciones
Máx. Capacidad de Carga	10 KN
Máx. Velocidad de Análisis	2000 mm/min
Mínima Velocidad de Análisis	0,005 mm
Espacio entre Columnas	425 mm
Altura de Marco	1616 mm
Anchura de Marco	794 mm
Profundidad de Marco	757 mm
Peso de Marco	175 kg

Tabla 5.- Características y Especificaciones MTS Modelo 43 (C43.104)

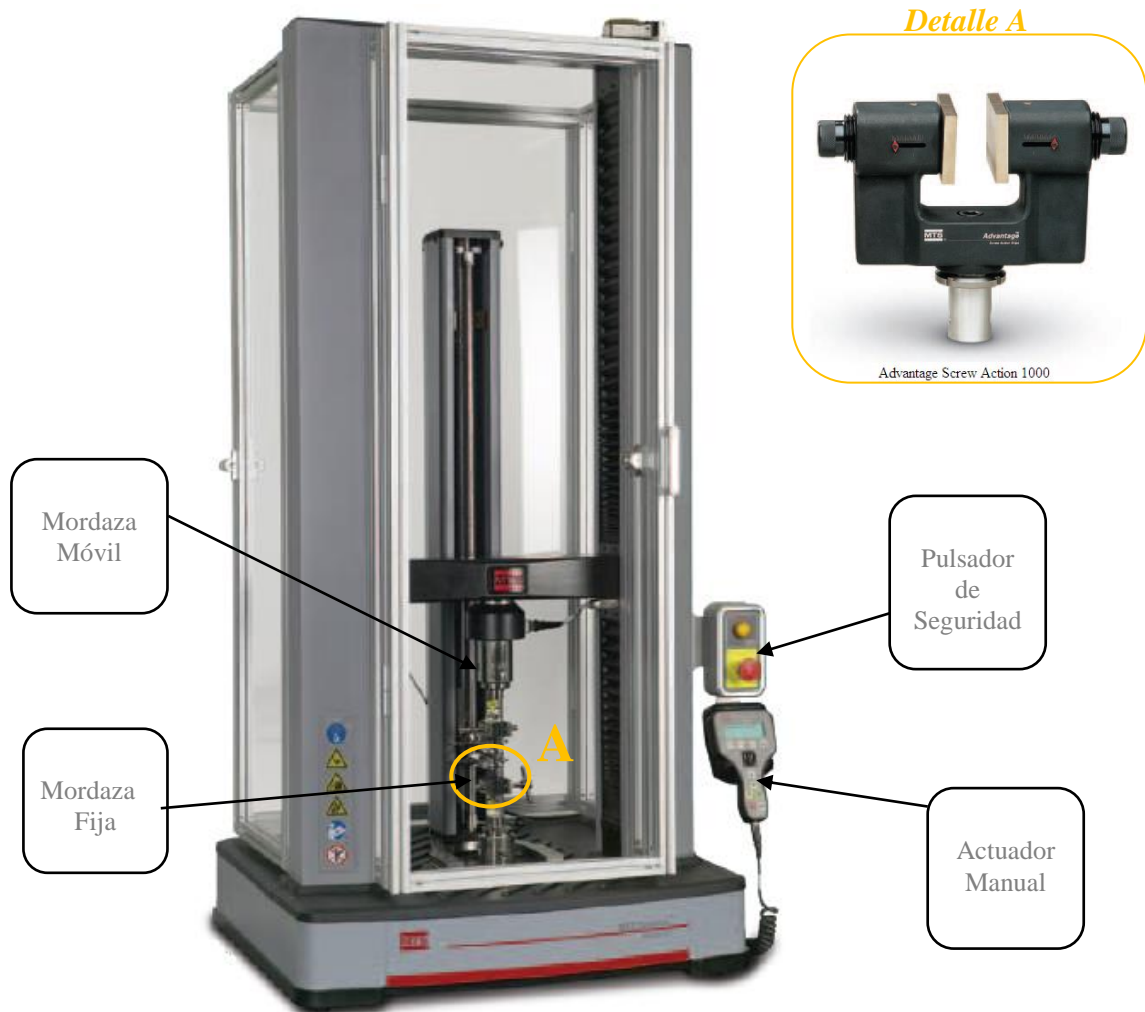


Figura 27.- Máquina MTS Modelo 43 (C43.104)

Otro equipo, imprescindible, empleado es una fuente de luz monocromática, de la cual no se disponía, por lo que se procedió a fabricar una propia de manera manual. Por eso el siguiente punto se centra únicamente en este tema, ya que para el alumno es un punto a resaltar.

2.4.2.1.- Fuente de Luz Monocromática

Antes de desarrollar este punto, se va a hacer dar una explicación del concepto de luz monocromática y cual es su diferencia con la luz blanca:

- Luz Monocromática

Haz de luz cuyos fotones tienen todos la misma longitud de onda o se encuentran comprendidos en una estrecha franja de longitudes de onda, es decir, la luz monocromática es aquella que está formada por componentes de un solo color, por tanto, de una sola longitud de onda.

El dispositivo utilizado en este trabajo para conseguir este tipo de luz han sido Led's de luz amarilla.

- Luz Blanca

A diferencia de la luz monocromática, la luz blanca está formada por muchos componentes y por consiguiente por varias longitudes de onda.

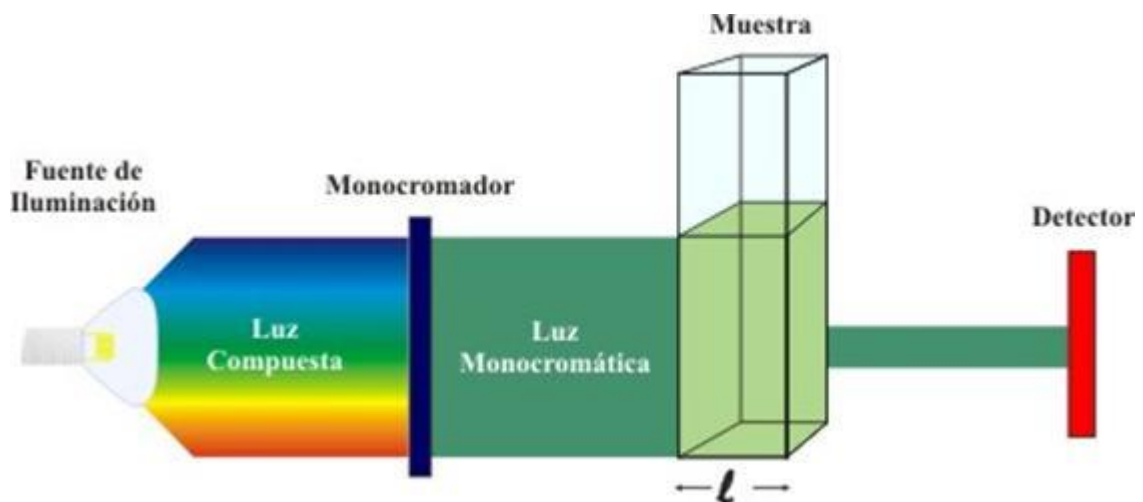


Figura 28.- Diferencia Visual entre Luz Monocromática y Luz Blanca

Para realizar correctamente los ensayos se necesitaba disponer de luz monocromática. En el laboratorio se dispone de una fuente de luz blanca, la cual no servía para este tipo de estudio sin unos filtros necesarios para poder observar la distribución de tensiones, por lo que se fabricó de manera manual y propia una fuente de luz monocromática. Esta fuente se realizó basándose en el foco de luz blanca disponible, intentando dar una forma y funcionalidad lo más parecida posible.

Para esta fuente se utilizaron los siguientes materiales y componentes:

➤ Componentes:

- Una torta de led's (10 x 9) de luz amarilla de 12 V de tensión con una longitud de onda de 610 nm. La cual proporciona la luz necesaria a enfocar al objeto a estudio.



Figura 29.- Torta de Led's

- Un ventilador de 12 V de tensión. La función de este tipo de ventilador es refrigerar la propia torta de leds, y así prevenir posibles sobrecalentamientos.



Figura 30.- Ventilador de un Ordenador Común

- Fuente de alimentación. Se usa un alimentador de un ordenador común el cual proporciona 12 V de tensión.



Figura 31.- Fuente de Alimentación de un Ordenador Común

➤ Materiales y Herramientas:

- Aluminio para la carcasa y pestañas.
- Pletina con orificios como respiradero y protección del ventilador.
- Porción rectangular de plástico como cristal.
- Conector para cableado (hembra).
- Cable adaptador para conectar la lámpara a la fuente de alimentación.
- Tornillería, silicona, gomaespuma.

➤ Pasos de Fabricación:

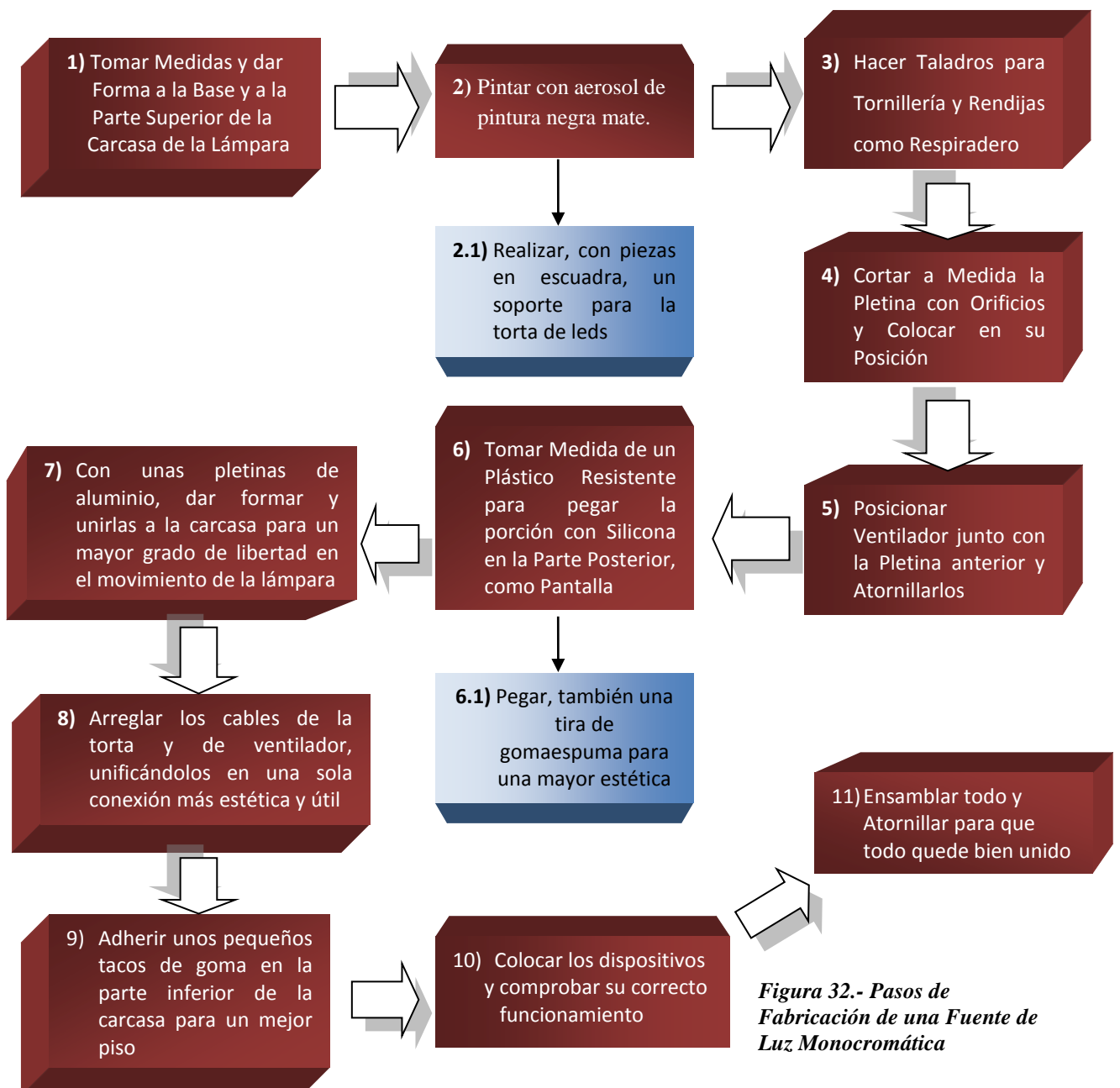


Figura 32.- Pasos de Fabricación de una Fuente de Luz Monocromática

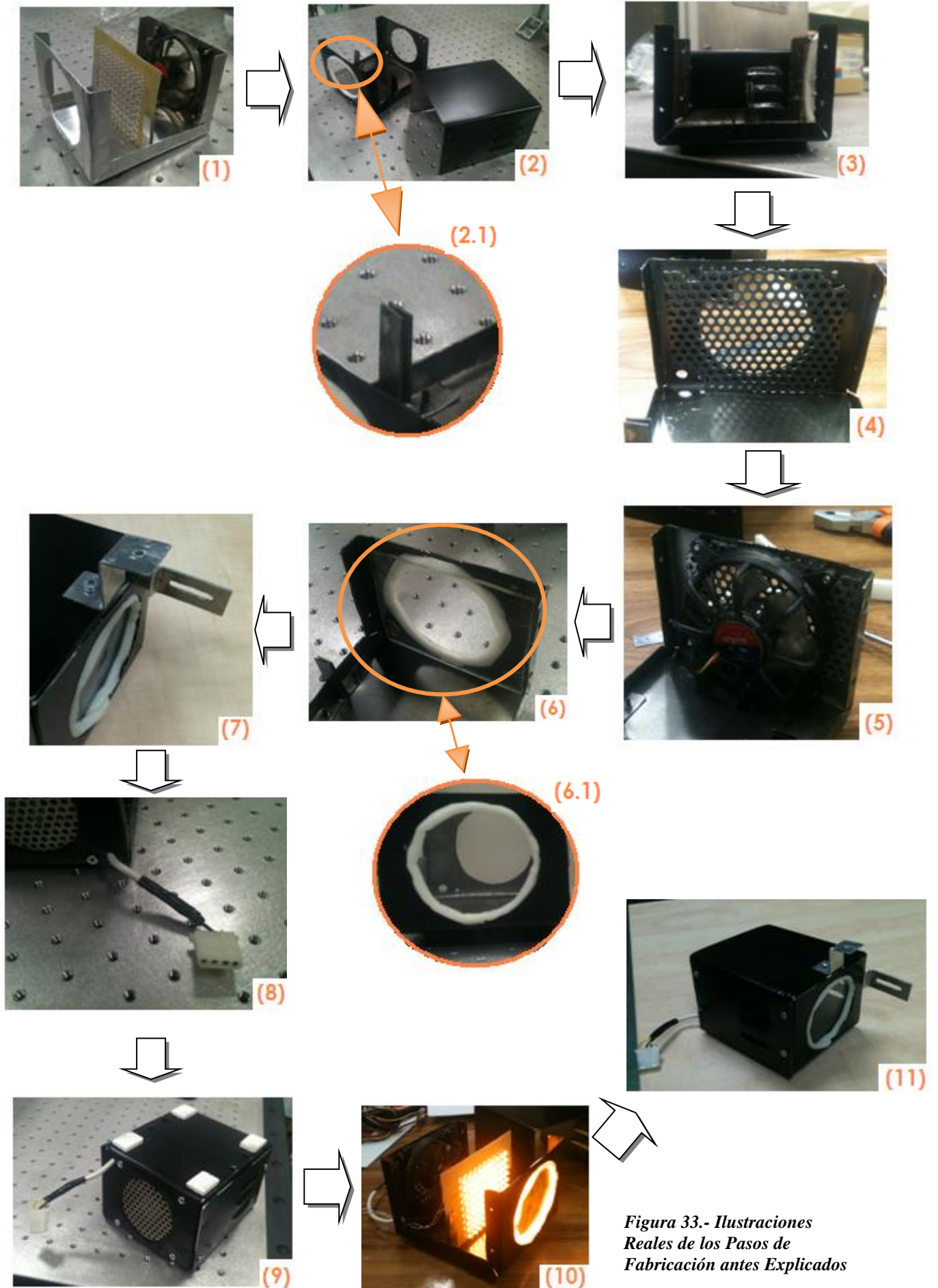


Figura 33.- Ilustraciones Reales de los Pasos de Fabricación antes Explicados

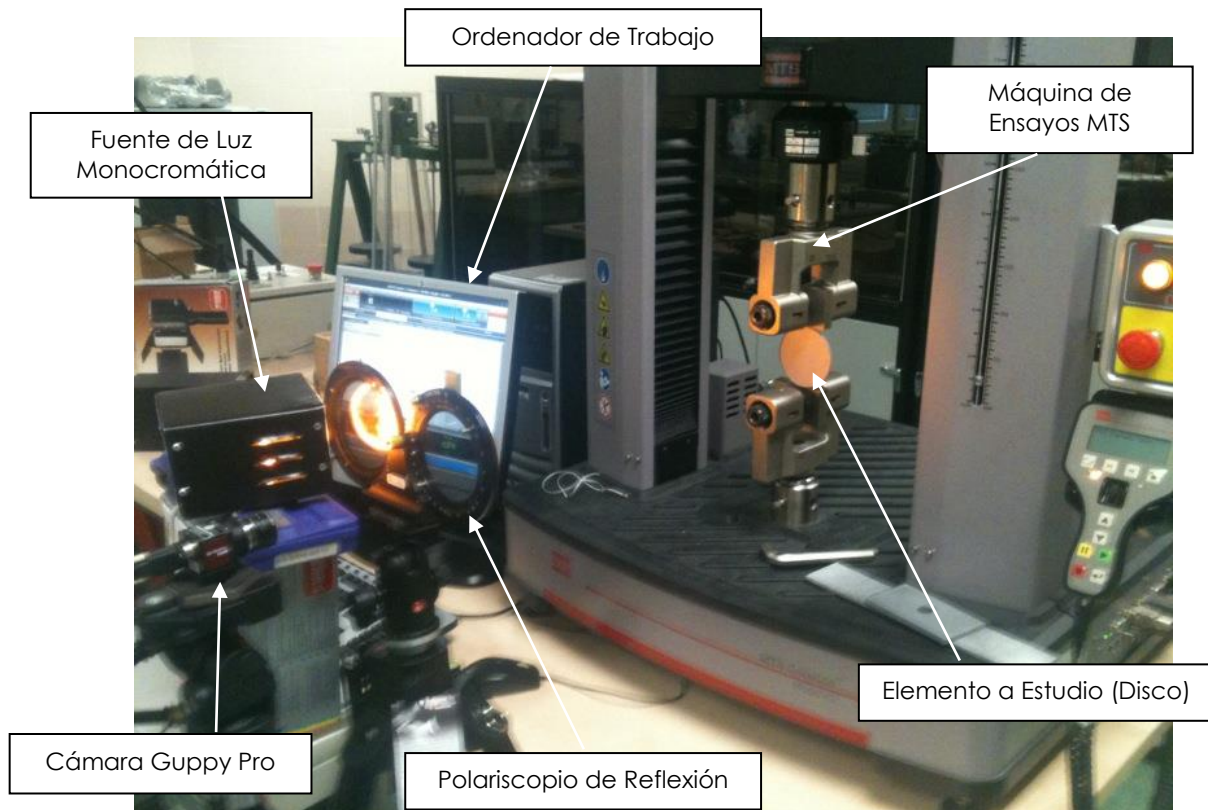


Figura 34.- Banco de Ensayos Empleado

2.4.3.- Metodología Experimental

En esta sección se va a desarrollar todo lo concerniente al análisis del proceso experimental una vez que se lleva a cabo debidamente todo lo anteriormente explicado, o dicho de otra manera, como interpretar los resultados empíricos que se obtienen y que en puntos posteriores se mostrarán.

2.4.3.1.- Generación de las Franjas [13]

Comenzando con el elemento de ensayo sin carga, y aplicando la carga, en intervalos determinados, las franjas aparecerán primero en los puntos de tensión más alta. Cuando la carga es aumentada y aparecen nuevas franjas, las primeras franjas son empujadas hacia las áreas de menor tensión. Con cargas mayores se generan franjas adicionales en las regiones de alta tensión y se desplazan hacia las regiones de cero o de tensión baja hasta que se alcanza la máxima carga. A las franjas se les puede asignar números ordinales (primera,

segunda, tercera, etc.) cuando aparezcan, y retendrán sus identidades individuales (“ordenes”) a través de la secuencia de carga. No sólo son franjas ordenadas en el sentido de numeración en serie (figura 35), sino que además son metódicas, es decir, son continuas, nunca se cruzan o se unen con otras, y siempre mantienen sus posiciones respectivas en la secuencia ordenada.

Cuando se observa con un polariscopio de reflexión, el diagrama de franja fotoelástico aparece como una serie de bandas sucesivas y contiguas de diferentes colores (isocromáticas) en las cuales cada banda representa un grado diferente de birrefringencia, un orden de franja (nivel de deformación), en cualquier lugar a lo largo de esa banda. Con un entendimiento de la secuencia invariante en la cual aparecen los colores, el diagrama de franja fotoelástica se puede leer como un mapa fotográfico para visualizar la distribución de tensión sobre la superficie del elemento revestido.

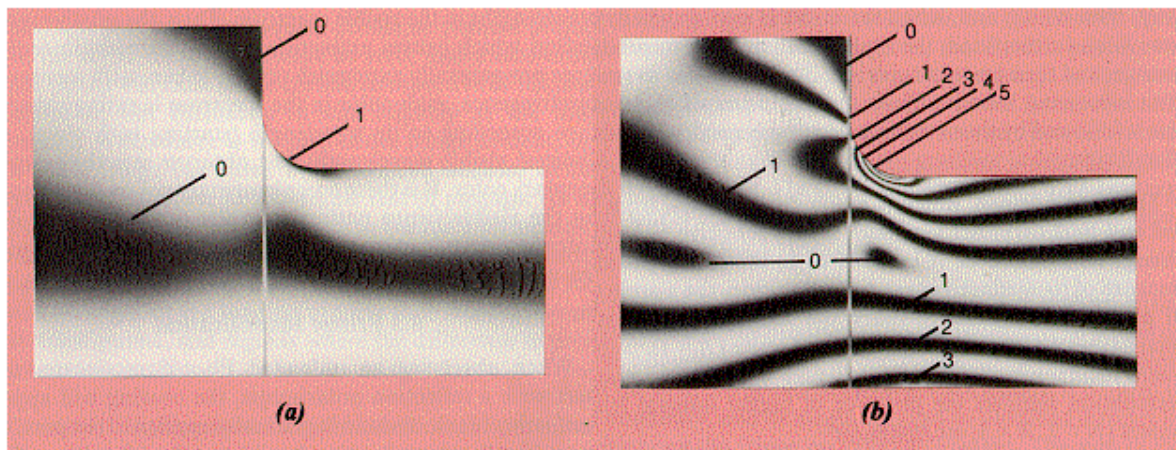


Figura 35.- Franjas generadas en un elemento sometido a [13]:

(a) carga baja

(b) carga elevada

Estas franjas que se obtiene al aplicar fuerza sobre un cuerpo iluminado con luz monocromática y observando por un polariscopio, pueden ser de dos tipos:

- *Franjas Isocromáticas*

Las franjas isocromáticas son el lugar geométrico de los puntos en que se tiene la misma diferencia de esfuerzos principales. Estas líneas isocromáticas, proporcionan el valor del orden de franja en toda la extensión del modelo y se pueden determinar por medio de la ecuación 3.4, la ecuación fundamental de la fotoelasticidad o Ley Tenso-Óptica [16].

Características de las isocromáticas [17]:

- Coloreadas, con excepción de las franjas de orden cero.
- Definidas más nítidamente que las isoclinas.
- A tensión constante, ellas permanecen fijas cuando rotamos el polarizador y analizador manteniéndolos cruzados a 90°.
- Con el polarizador y analizador mantenidos fijos, ellas varían con la tensión.

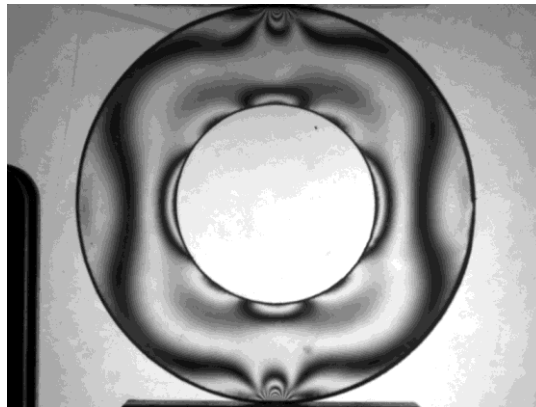


Figura 36.- Franjas Isocromáticas

- *Franjas Isoclinas* [13]

Las franjas isoclinas son el lugar geométrico de los puntos que tienen las direcciones, de las deformaciones principales, paralelas a la dirección de polarización.

¿Cómo obtener las direcciones de las deformaciones (o tensiones) principales?

Las direcciones de deformación principal se miden siempre con referencia a una línea establecida, eje o plano. Por tanto, el paso inicial en la determinación de la dirección de las deformaciones principales (o tensiones) será seleccionado en una referencia conveniente. En la mayoría de los casos, la dirección de referencia se sugiere inmediatamente, como un eje de simetría del elemento de ensayo o estructura; en otros casos, será suficiente una línea vertical u horizontal.

Cuando un haz plano polarizado de luz atraviesa un revestimiento fotoelástico en un elemento sujeto a tensión, se descompone en ondas propagándose a distintas velocidades a lo largo de la dirección de las deformaciones principales. Después de emerger del plástico, estas dos ondas se pondrán fuera de fase con otra y no se recombinarán en una única

vibración paralela a la que entra en el plástico. Sin embargo, en puntos donde la dirección de las tensiones principales es paralela al eje del filtro de polarización, el haz no se verá afectado y la vibración emergente será paralela a la vibración entrante. Un analizador con su eje perpendicular al de polarización producirá la extinción de las vibraciones en estos puntos.

Características de las isoclinas [17]:

- De color negro.
- Definidas menos nítidamente que las isocromáticas.
- A presión (tensión) constante, ellas varían cuando rotamos simultáneamente el polarizador y el analizador manteniéndolos cruzados a 90°.
- Con el polarizador y analizador mantenidos fijos ellos varían con la tensión.

2.4.3.2.- Análisis de Franjas Fotoelásticas

En fotoelasticidad automática son tres los métodos más comúnmente utilizados en el análisis de franjas: el método de análisis del contenido espectral, el método basado en las transformadas de Fourier y el método de variación de fase o phase-stepping. Para éste último existen distintas variantes, siendo el método de los seis pasos o seis imágenes de Patterson y Wang uno de los más empleados y el que se ha seguido para el análisis de franjas de este Trabajo. La combinación de estas seis imágenes da lugar a una única imagen que ha de ser desenvuelta (proceso de unwrapping) por medio de algoritmos específicos de procesado de imagen [3].

Método de Análisis de Contenido Espectral

En el análisis espectral, el contenido espectral de un punto espacial en una franja isocromática de color es evaluado mediante la medición de la intensidad de la luz polarizada sobre un ancho de banda estrecho en un número de longitudes de onda. Según Eann A. Patterson [3] para llevar a cabo esta medición de intensidad, se utiliza la siguiente expresión:

$$i_0 = \frac{\alpha^2}{2} \left[1 + \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda} \right] = \frac{\alpha^2}{2} \cos^2 \frac{\pi\delta}{\lambda} \quad (17)$$

De donde:

- a es la amplitud de onda.
- λ es la longitud de onda.
- δ es el retardo relativo.

El espectro definido de esta manera puede ser relacionado, únicamente, con la orden de franja. El número de anchos de banda analizados limita el orden de franja máximo que puede determinarse, de modo que una aproximación útil es que N mediciones permiten órdenes de franja menores que N al ser evaluado. Las isoclinas no pueden determinarse utilizando esta técnica. Las limitaciones del análisis espectral en términos de orden de franjas máximo en el análisis de campo completo y la falta de datos para el ángulo de isoclina son algunas de las desventajas de este método.

Método de Fourier

El análisis de Fourier requiere la captura y el procesamiento de un gran número de imágenes, con cambios incrementales en la orientación relativa de los ejes de polarización de un polariscopio para el ángulo de isoclinas [5].

Según referencia Patterson [3], Morimoto et al. [18] consideraron un método, en el cual la intensidad de salida, i_0 , es una función de β (posición angular del analizador), quitando las placas de cuarto de onda para trabajar con un polariscopio plano. La intensidad de la luz de salida es descrita por la ecuación:

$$i_0 = \frac{\alpha^2}{2} [1 - \cos(4)(\theta - \beta)] = \sin^2 \frac{\alpha}{2} = i(\beta) \quad (18)$$

De donde:

- a , es la amplitud de onda.
- β , es la posición angular del analizador.
- θ , es el ángulo de isoclina.
- $\alpha = (2\pi\delta)/\lambda$

y se puede expresar como una serie de Fourier ya que es una función periódica con un período $T = \pi/2$, es decir:

$$i(\beta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} i_n \cdot e^{jn\omega_0\beta} \quad , \text{de donde:} \quad i_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(\beta) e^{-jn\omega_0\beta} d\beta \quad (19)$$

Siendo la Transformada de Fourier:

$$i(w) = \int_{-\infty}^{\infty} i(\beta) e^{-jw\beta} d\beta \quad (20)$$

Donde:

- w , es la frecuencia, se corresponde con la siguiente expresión [4]:

$$w = -w_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{\pi/2} = 4 \quad (21)$$

Morimoto mostró que para la frecuencia $w = 0$, se obtienen las isocromas. Y que el ángulo de isoclina se obtiene a partir de la relación de la parte real e imaginaria de la transformada de Fourier:

$$\theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im} \left(-I_a \sin^2 \frac{\delta}{2} e^{i4\theta} \right)}{\text{Re} \left(-I_a \sin^2 \frac{\delta}{2} e^{i4\theta} \right)} \right] \quad (22)$$

La gran desventaja que este método presenta es que necesita de un gran número de capturas de imágenes, del orden de 90.

Además de este método, hay otros como el desarrollado por C. Quan, P.J. Bryanston-Cross y T.R. Judge, o el de Lesniak y Zickel [3], denominado “Polariscopio de Campo Gris”. El primero contiene algunas desventajas como son su complejidad, que no conduce directamente al ángulo de isoclina y que necesita ser complementado por el método de Morimoto, sin embargo, el segundo si conduce al ángulo de isoclina aunque también tiene que ser complementado por el “Método de Variación de Fase o Phase-Stepping”.

✚ Método de Variación de Fase o Phase - Stepping [3]

La variación de fase se basa en la captura de imágenes con cambios incrementales en la orientación relativa de los ejes de polarización del polariscopio.

Para el método de cambio de fase o phase-stepping, la longitud de onda, λ , es generalmente constante, de modo que:

$$i_0 = \frac{a^2}{2} [1 + \text{sen}(2)(\beta - \emptyset) \cos \alpha - \sin(2)(\theta - \emptyset) \cos(2)(\beta - \emptyset) \sin \alpha] \quad (23)$$

De donde:

- a , es la amplitud de onda.
- β , es la posición angular del analizador.
- θ , es el ángulo de isoclina.
- \emptyset , es la posición angular de la lámina de cuarto de onda.
- $\alpha = (2\pi\delta)/\lambda$

y mediante la selección de las posiciones de los elementos ópticos de salida son generados, \emptyset Y β , una secuencia de ecuaciones simultáneas en amplitud, a , el retraso relativo, α , y el ángulo de isoclina, θ , y las correspondientes intensidades I_0 son medidas para cada punto considerado. Entonces las ecuaciones simultáneas pueden ser resueltas con el fin de encontrar el retraso relativo y el parámetro de isoclina.

La forma de la ecuación 23 implica que las soluciones siempre serán funciones periódicas de las coordenadas espaciales, y por lo tanto se necesitarán de procedimientos de desenvuelto (unwrapping) para generar un mapa continuo de orden de franja. En esencia, el cambio de fase (Phase - Stepping) obtiene el mismo resultado para orden de franja como Compensación de Tardy [4], y por lo tanto después de desenvolver (unwrapping), el mapa debe ser calibrado para producir un orden de franja absoluto. Sin embargo, es importante para la función periódica del retraso relativo ser obtenida a partir de un operador arco tangente o arco cotangente, de modo que hay discontinuidades identificables en la función espacial. Estas discontinuidades son esenciales en la localización de los extremos de los periodos y permitir desenvolver (unwrapping) para proceder con el mínimo de errores.

Hay algunas ventajas que se pueden obtener al usar funciones arco tangente, desde que los períodos empiezan en $\alpha = 0$, en lugar de $\alpha = \pi/4$ y esto reduce el número de operaciones necesarias a desenvolver en la mayoría de los patrones de franjas. Hay un número infinito de combinaciones de cambios de fase que se pueden emplear, pero sólo un número relativamente pequeño de datos pueden ser procesados fiablemente y con firmeza. La descripción del polariscopio empleado anteriormente asume la presencia de las placas de cuarto de onda, sin embargo, esto no es imprescindible en métodos phase-stepping y de hecho Ajovalasit et al. [4] han demostrado que su eliminación mejora la precisión de la medida del orden de franja. En este caso, la ecuación 23 se convierte:

$$i_0 = \frac{\alpha^2}{2} [1 - \cos(4)(\theta - \beta)] = \sin^2 \frac{\alpha}{2} = i(\beta) \quad (24)$$

Los métodos de variación de fase permiten determinar los parámetros de isocлина, así como el retardo relativo, utilizando un mínimo de tres imágenes, o cuatro imágenes si el efecto de la luz externa se incluye. Los parámetros de isoclinas están siempre indefinidos cuando el retraso relativo, α , es $0, \pi/2, 3\pi/2, \dots$. Esto ocurre porque para estos valores la ecuación 24 se reduce a:

$$i_0 = \frac{\alpha^2}{2} [1 + \sin(2)(\beta - \theta)] \quad (25)$$

La cual no contiene el parámetro de isocлина, θ , y por lo tanto no puede ser usada para obtener θ . Lo mismo ocurre en un polariscopio plano (véase Ecuación 24) y para cualquier orientación de los elementos ópticos de entrada. Esta es una gran desventaja del método phase-stepping y conduce a la interpolación o la sustitución de los datos a través de estas zonas no definidas.

2.4.3.3.- Procedimiento General

En esta sección se describe todo el procedimiento experimental concreto utilizado en este trabajo. En primer lugar se describe la calibración del polariscopio, siguiendo con el método empleado para el análisis de franjas y concluyendo con la metodología utilizada para la determinación de los factores de intensificación de tensiones.

✚ Calibración del Polariscopio [13]

En fotoelasticidad, antes de la realización de los ensayos, se llevó a cabo la calibración del polariscopio. Un problema que surge después del montaje del polariscopio es cómo establecer la orientación de los ejes de los polarizadores y las láminas cuarto de onda. Este proceso se denomina calibración del polariscopio. Los siguientes puntos establecen un procedimiento paso a paso para obtener la correcta calibración de los distintos elementos ópticos que componen el polariscopio:

1. Las direcciones de deformación principal se miden siempre con referencia a una línea establecida, eje o plano. Por tanto, el paso inicial en la determinación de la dirección de las deformaciones principales (o tensiones) será seleccionado en una referencia conveniente. En la mayoría de los casos, la dirección de referencia se sugiere inmediatamente, como un eje de simetría del elemento de ensayo o estructura; en otros casos, será suficiente una línea vertical u horizontal.
2. Cuando un haz de luz polarizada plana atraviesa un revestimiento fotoelástico en un elemento a tensión, se descompone en ondas propagándose a distintas velocidades a lo largo de la dirección de las deformaciones principales. Después de emerger del plástico, estas dos ondas se pondrán fuera de fase una de otra y no se recombinarán en una única vibración paralela a la que entra en el plástico. Sin embargo, en puntos donde la dirección de las tensiones principales es paralela al eje del polarizador, el haz no se verá afectado y la vibración emergente será paralela a la vibración entrante. Un analizador A con su eje perpendicular al polarizador P producirá la extinción de las vibraciones en estos puntos (Fig. 37).

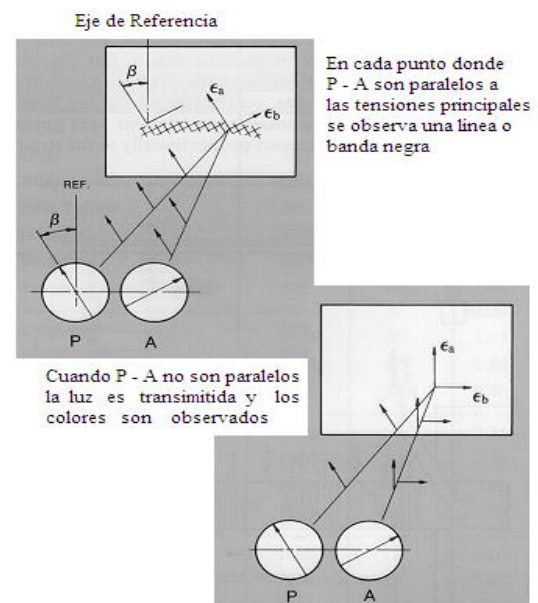


Figura 37.- Direcciones Principales Detectadas mediante Rotación de los Ejes del Polarizador/Analizador hasta conseguir la Extinción Total de la Luz en el Punto de Ensayo.

3. Observando el elemento tensionado a través de un polariscopio de reflexión (Fig. 38), aparecen líneas negras (o incluso áreas). Estas líneas se llaman *isoclinas* (definición en puntos posteriores). En cada punto de una isocлина, las direcciones de las deformaciones principales son paralelas a la dirección de polarización de A y P . Con respecto al eje de referencia elegido, la medida de las direcciones en un punto es simplemente efectuada por la rotación de A y P juntos hasta que aparece una isocлина negra en el punto donde se van a medir las direcciones. Cuando se requieren las direcciones de deformación sobre un área completa, las isoclinas se graban normalmente con fotografía o trazando directamente en el revestimiento.

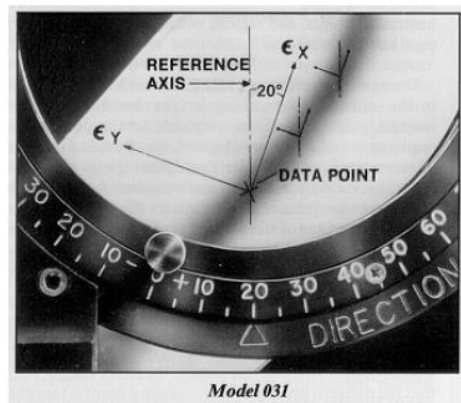


Figura 38.- Ejemplo de Determinación de Isoclinas con un Polariscopio de Reflexión Modelo 031

4. Si las isoclinas son estrechas y agudas, significa que las direcciones de ϵ_x , ϵ_y varían rápidamente de una localización a la siguiente. Sin embargo, cuando forman líneas negras amplias indican que las direcciones de ϵ_x , ϵ_y varían lentamente en esa región. Cuando esto ocurre, el contorno que rodea a la isocлина completamente se debería marcar (no meramente el centro). En el caso de un elemento a tracción con sección transversal constante, se verá una isocлина que cubre el área completamente cuando los ejes de polarización coinciden con los ejes de este elemento, ya que la dirección de ϵ_x es la misma en cada punto.
5. Al rotar el polarizador y el analizador se conectan entre sí (en incrementos angulares pequeños y uniformes) sobre el rango de 0 a 90°, la familia completa de isoclinas se generarán. Un ejemplo de este procedimiento se muestra fotográficamente en la figura 39, para un anillo sometido a compresión diametralmente.

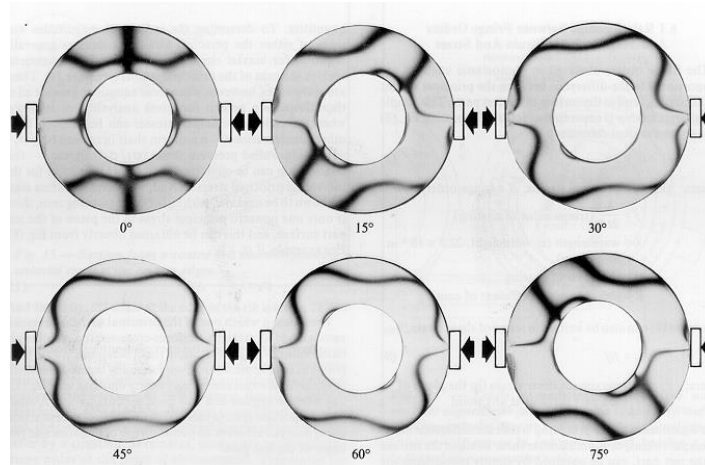


Figura 39.- Franjas Isoclinas Correspondientes a un Anillo Cargado Diametralmente con Incrementos de 15°

✚ Método Utilizado para el Análisis de Franjas

Como se ha mencionado anteriormente, *el método llevado a cabo en este trabajo es el de variación de fase (Phase - Stepping)*. El concepto de Phase-Stepping o cambio de fase para el análisis fotoelástico fue introducido por Hecker y Morche [4]. La disposición básica de polariscopio que ellos utilizaban era como la reflejada en la Fig. 18.

Patterson y Wang [3] [4], extendieron el trabajo de Hecker y Morche y usaron diferentes variaciones de rotación de los elementos ópticos para producir una modulación más alta sobre el campo.

Para el método de cambio de fase también existen distintas variantes, siendo el método de los seis pasos o seis imágenes de Patterson y Wang [3] el empleado concretamente en el presente Trabajo. Concretamente este método fue desarrollado para transmisión aunque también se puede implementar para reflexión. Este método se suele emplear con luz monocromática circularmente polarizada, obtenida a partir de la utilización de un polariscopio circular, para este caso un polariscopio en reflexión modelo 031 (explicado anteriormente). El método consiste en capturar seis imágenes en el que los ángulos de los elementos de salida del polariscopio circular (segunda lámina cuarto de onda y analizador) se rotan para generar saltos de fase entre las distintas imágenes [2], aunque en este tipo polariscopio, los elementos ópticos están conectados por un cable y un sistema de equipos con el fin de facilitar el análisis manual. Esta disposición hace imposible la variación de fase con los elementos ópticos de salida debido a que no se pueden girar de

forma independiente, por tanto una alternativa a este método se describe en la Tabla 6 y La Figura 40, especialmente para el Modelo 031 [3].

Esta Tabla 6, mostrada a continuación, muestra las distintas posiciones de la segunda lámina cuarto de onda ($\lambda/4$) y del analizador, así como la intensidad de la luz para cada una de las imágenes:

Nº de Imagen	Ángulo de la Lámina de Cuarto de Onda ϕ (rad)	Ángulo del Analizador β (rad)	Intensidad de Luz
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	$\pi/4$	$\pi/2$	$j_6 = j_m + j_v \cos \delta$

Tabla 6.- Posiciones en el Método de Variación de Fase con un Polariscopio de Reflexión Modelo 031

De donde:

- j_1, j_2, \dots, j_n : medidas de las intensidades de luz en la variación de fase 1, 2, ..., n, en reflexión.
- j_m : término para la luz externa para polarización en reflexión.
- j_v : intensidad de luz observada cuando los ejes, de un polariscopio en reflexión, son paralelos.
- δ : retardo relativo (rad).
- θ : ángulo de isoclinas (rad).

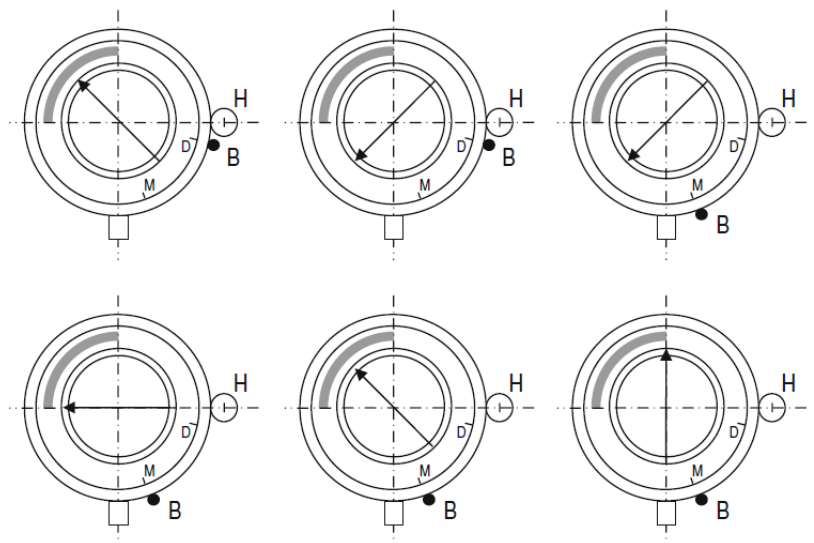


Figura 40.- Diagrama Esquemático de los Elementos Ópticos de Salida del Polariscopio modelo 031, Mostrando las Posiciones necesarias para las Seis Variaciones basadas en la Figura mostrada en el Manual del Polariscopio. El Arco Gris representa la Escala Roja del instrumento con 0° en la Posición de “las 9 en Punto” y -90° “a las 12 en Punto”

Una vez obtenidas estas imágenes habrá que combinarlas y procesarlas con el software adecuado para obtener los parámetros fundamentales que se necesitan.

El primer paso del procesado de las imágenes es determinar el mapa de isoclinas (ec. 25), que representan el ángulo que forman las direcciones de las tensiones principales con respecto a una dirección fija de referencia:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{j_1 - j_2}{j_5 - j_3} \right] \quad (26)$$

El siguiente paso consiste en obtener, a partir del mapa de isoclinas, el mapa de isocromas (ec. 26), que representan el retardo relativo en cada uno de los puntos del modelo:

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{j_5 - j_3}{(j_6 - j_4) \cdot \cos 2\theta} \right] \quad (27)$$

A continuación, a partir del retardo relativo se determina el orden de franja (ec. 27) en cada uno de los puntos del modelo:

$$N = \frac{\delta}{2\pi} \quad (28)$$

Sin embargo, como el mapa isocromático presenta una serie de saltos abruptos ($-\pi/2$ y $\pi/2$) debido a la aplicación de la función inversa de la tangente, para la obtención de un mapa de retardo continuo es necesario el desenvolvimiento de la fase, conocido como unwrapping.

Metodología Empleada para la Determinación del Orden de Franja mediante Matlab y Puesta a Punto de la Técnica

En el presente trabajo se ha empleado el software *COPA* y elaborado por Siegmann et al. [19], disponible de forma gratuita en la página web www.experimentalstress.com. El software se basa en un potente algoritmo que actúa procesando áreas para llevar a cabo la demodulación del mapa de isoclinas y utiliza distintos mapas de calidad para guiar el proceso de unwrapping.

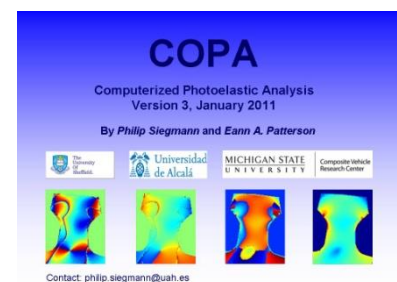
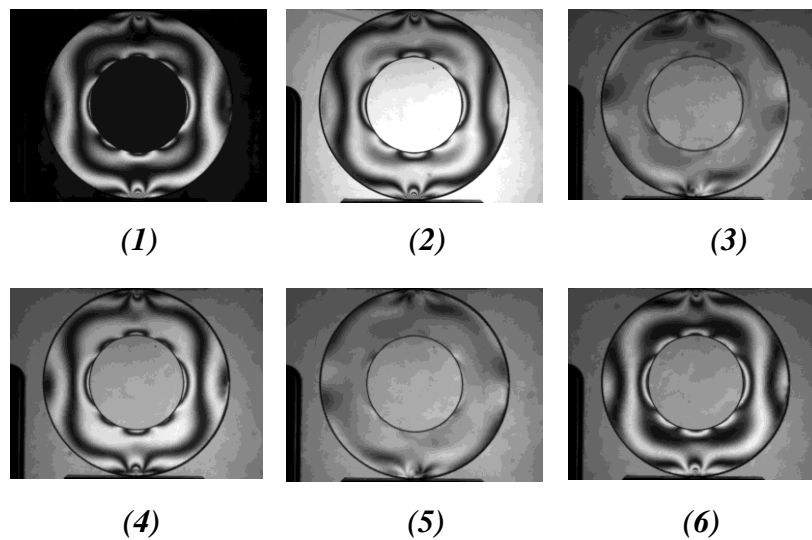


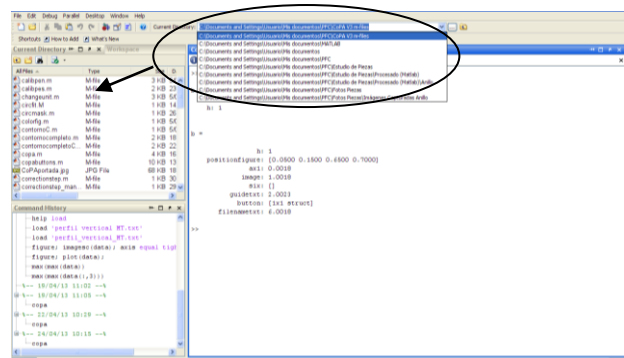
Figura 41.- Logotipo del Software COPA

La metodología seguida para el cálculo del orden de franja de los elementos estudiados se explica, paso a paso, a continuación y se va a hacer con un ejemplo realizado experimentalmente para la puesta a punto de la técnica, el cual fue una probeta con forma de anillo, de policarbonato sometida a compresión, siendo una pieza de geometría fácil y conocida y por tanto, teóricamente conocidos los resultados a obtener, lo cual es muy útil para comprobar si se está llevando a cabo el procedimiento correctamente.

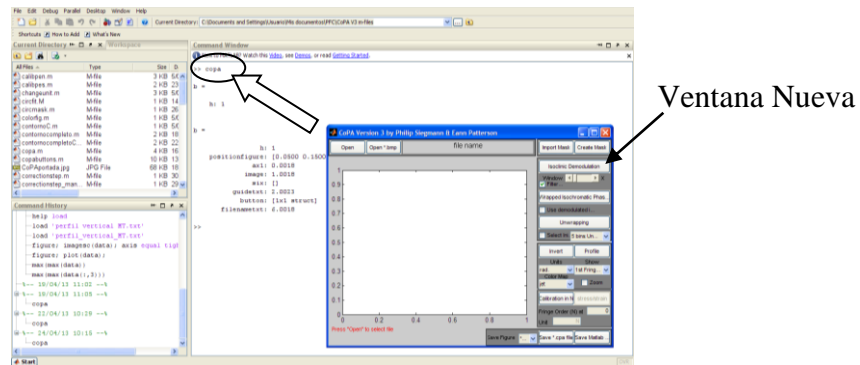
1. **Capturar las 6 imágenes correspondientes** al método de Phase – Stepping, es decir, con las distintas posiciones explicadas en la tabla 6 y figura 40.



2. Abrir Matlab, y en **“Dirección de Directorio”** (parte superior), elegir la carpeta donde estén guardados los archivos COPA, para poder trabajar con él.



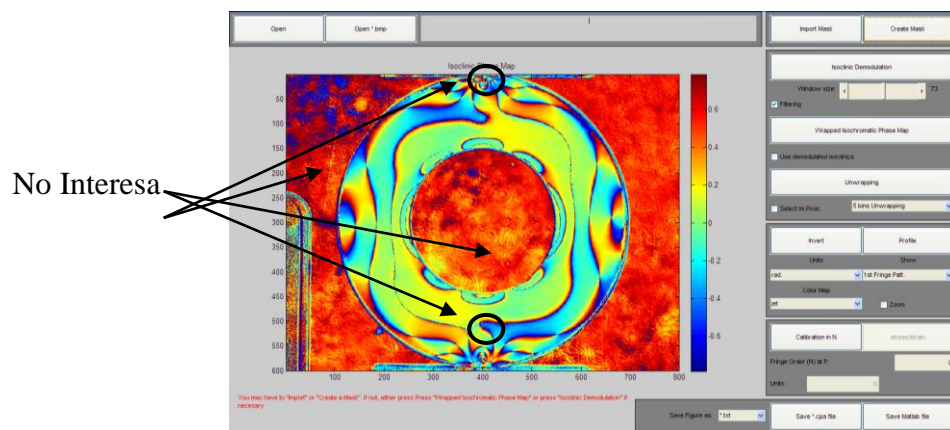
3. Ejecutar **“COPA”**, poniendo el nombre literal en la ventana de comandos de Matlab y pulsar *enter* para acceder, lo cual abrirá una nueva ventana, que será con la que se va a trabajar.



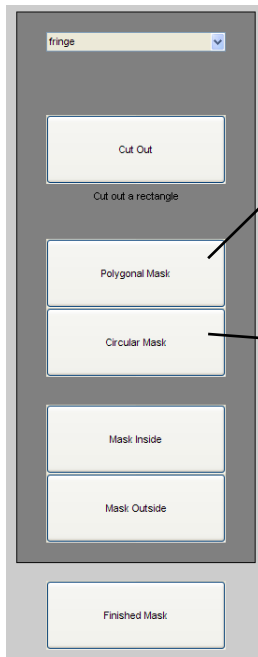
4. Se buscan, se seleccionan y se abren las seis imágenes anteriormente obtenidas por el método de Phase – Stepping mediante “Open.bmp”.

5. La combinación de estas seis imágenes da lugar a una única imagen, el cual corresponde al **MAPA DE ISOCLINAS** que ha de ser desenvuelta por medio de algoritmos específicos de procesamiento de imágenes [19]. Para llevar a cabo este proceso de desenvuelto (unwrapping) antes hay que hacer lo siguiente:

5.1. Crear una máscara sobre grieta y partes no útiles (opción “**Create Mask**”).



- **Sobre grieta:** ya que en las zonas próximas a esta suele haber acumulación de franjas que más tarde pueden inducir a la aparición de ruido.
- **Sobre zonas no útiles:** ya que solo interesa la parte física del elemento, ni la parte exterior ni parte interior (en caso de tenerla).



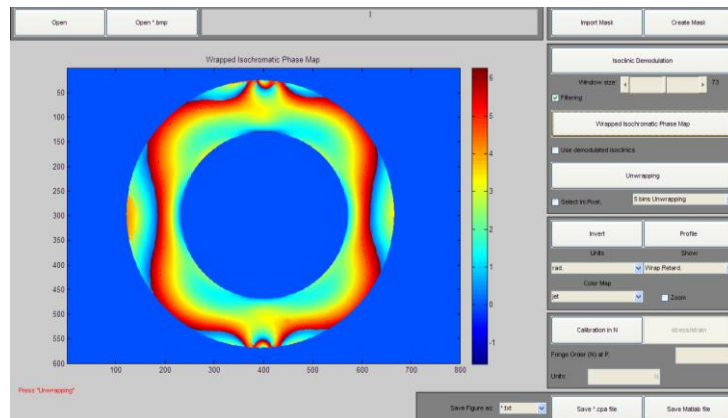
Para eliminar partes con formas poligonales

En esta opción permite crear cualquiera tipo de geometría para después eliminar su interior (Mask Inside) o su exterior (Mask Outside)

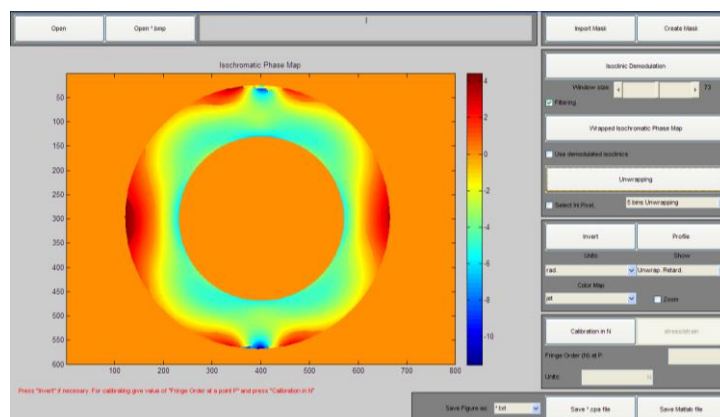
Para eliminar partes circulares

En esta opción permite elegir 3 puntos cualesquiera, siempre teniendo en cuenta que estos puntos delimitarán por donde se quiere cortar para después eliminar su interior (Mask Inside) o su exterior (Mask Outside)

5.2. Obtenida la parte concreta que se quiere estudiar, seleccionar la opción **“*Wrapped Isochromatic Phase Map*”**. Con esto se crea el **MAPA DE ISOCROMAS envuelto**.



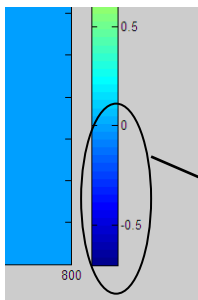
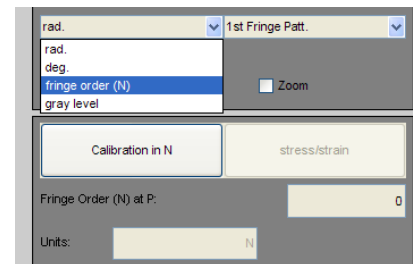
5.3. Seguidamente seleccionar la opción **“*Unwrapping*”**. Con esto se crea el **MAPA DE ISOCROMAS desenvuelto**.



NOTA: En la escala de valores, la zona roja es a la que le corresponde los mayores valores, sin embargo, en algunos casos, el elemento no se corresponde con la escala ya que la zona donde deberían estar los mayores valores son las zonas de aplicación de cargas, y estas son azules, por lo que hay que invertir estos valores. Y esto se hará, con la opción **“Invert”**, lo que provocará que los valores del elemento si se correspondan con los de la escala.

6. Hecho esto, si la escala tiene valores negativos, habrá que calibrar, ya que estos valores no son útiles, y esto se hará con la opción **“Calibration in N”** y haciendo lo siguiente:

6.1. En **“Units”** abrir el menú que se despliega y elegir **“Fringe Order (N)”**.

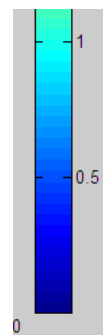
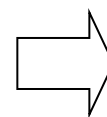
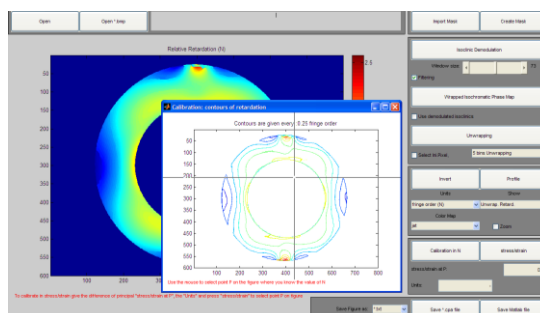


6.2. Interpolando, identificar el valor de la parte negativa de la escala.

En este caso el valor sería 0,75 de valor negativo

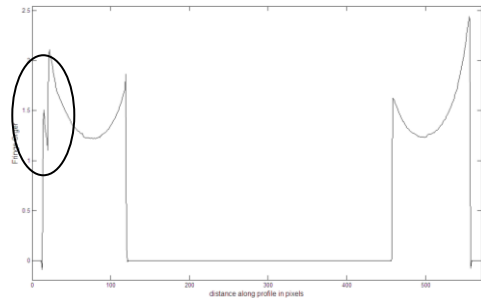
6.3. Este valor se inserta en la opción **“Fringe Order (N) at P”**. De esta manera se le está diciendo al programa que contrarreste este valor, para que el mínimo sea 0 (que es lo se busca).

6.4. Seleccionar **“Calibration in N”** y se abrirá una ventana nueva en la que aparecerá nuestra elemento visto con líneas, en la cual hay que seleccionar la más negativa (zona más azul oscura), y veremos como la escala y el elemento se ajustan, siendo el valor mínimo el 0.



7. Por último, ya se pueden obtener los perfiles, para obtener el valor del Orden de Franja, seleccionando “Profile”. Esto dará opción a pasar una línea por la zona exacta de donde se quiere obtener el perfil.

Se tienen que evitar en el procesado que aparezcan estos saltos bruscos en los perfiles



2.4.3.4.- Corrección de Errores

Una vez realizado todo lo anteriormente expuesto, y de realizar la puesta a punto de la técnica con el anillo de policarbonato a compresión se realizan una serie de comprobaciones, contradicciones, y observaciones, las cuales provocan poder corregir posibles errores, conseguir una utilización correcta de los equipos de trabajo, etc. Las observaciones más importantes que se han obtenido son:

- El polariscopio tiene que estar lo más inmóvil posible, ya que se tiene que tomar 6 imágenes distintas, las cuales se obtienen moviendo el analizador y la lámina de cuarto de onda, por lo que hay que conseguir una sujeción segura. De ahí que, en este caso, se requiera un trípode expresamente para esta herramienta.
- El polariscopio tiene que estar perpendicular a la pieza a estudio y a la cámara a su vez, es decir, la cámara, el polariscopio y la pieza deben guardar una perfecta posición horizontal entre ellos, guardando relación de altura también.
- La posición de la cámara puede variar entre estudio y estudio si lo requiere, para una mejor visión y toma de imágenes, siempre procurando que cuando se encuentre esta correcta posición cumpla la observación anterior.
- La cámara no se puede desplazar ni mover a la hora de capturar imágenes, es decir, cuando se empieza un estudio hay que posicionar la cámara de tal manera que tenga la misma situación desde el principio hasta el final del estudio, ya que si no es así, no se consiguen obtener unas buenas capturas de imágenes debido a

que varía el sistema de referencia, lo que provocará que el software COPA utilizado para el procesado de las imágenes no las acepte.

- Las expresiones de la tabla 6 son las mismas expresiones que las utilizadas en transmisión para el método de Variación de Fase descritas también por Patterson y Wang [3]. De cualquier manera, la numeración de estas expresiones es diferente para facilitar la obtención de datos. A esta conclusión se ha llegado gracias a dos razones:
 - Al intentar procesarlas, con el orden primeramente indicado por la tabla 6, no se lleva a cabo de manera correcta por el software.
 - Debido a la razón anterior, se procedió a comparar el orden de las imágenes obtenidas en reflexión con el de transmisión, confirmando que, efectivamente, no se obtiene el orden correcto, y por tanto hay que reordenarlas de la siguiente manera:

Reflexión (orden incorrecto)	Transmisión (orden correcto)
Imagen nº 1	Imagen nº 3
Imagen nº 2	Imagen nº 5
Imagen nº 3	Imagen nº 4
Imagen nº 4	Imagen nº 2
Imagen nº 5	Imagen nº 6
Imagen nº 6	Imagen nº 1

Tabla 7.- Reordenación de las Imágenes Obtenidas por Reflexión

2.5.- Análisis Numérico

El método numérico usado en este trabajo ha sido el Análisis mediante Elementos Finitos, mediante el cual se va simular los mismos elementos, que experimentalmente se han ensayado, imponiendo las mismas condiciones para una mejor aproximación de los resultados.

El Método de Elementos Finitos (MEF) o Finite Element Method (FEM) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.

El FEM permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

El método de los elementos finitos como formulación matemática es relativamente nuevo; aunque su estructura básica es conocida desde hace bastante tiempo, en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo debido a los avances informáticos. Han sido precisamente estos avances informáticos los que han puesto a disposición de los usuarios gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos.

2.5.1.- Metodología Teórica [11]

Utilizando los elementos finitos, se puede analizar cualquier forma, utilizar métodos diferentes para idealizar la geometría y obtener resultados con la precisión deseada.

Independientemente de la complejidad del trabajo o del campo de aplicación, los pasos fundamentales en cualquier proyecto o estudio en el que se utilice FEM son siempre los mismos, ya sea un análisis estructural, térmico o acústico.

Los pasos para realizar un análisis mediante Elementos Finitos son:

1. Construcción del modelo matemático (creación de la geometría)

El análisis empieza con la representación de la geometría como modelo tridimensional generado mediante un programa de diseño asistido por ordenador (DAO). Esta geometría debe ser apta para obtener una malla de elementos finitos correcta y razonablemente pequeña.

Este requisito de mallado tiene implicaciones muy importantes. Se debe asegurar que la geometría DAO es apta para ser mallada y que la malla obtenida proporcione la solución correcta de los datos de interés, como desplazamientos, tensiones, distribución de temperatura, etc.



Figura 42.- Ejemplo de Modelo Tridimensional creado por un software de Diseño Asistido por Ordenador

A menudo, pero no siempre, esta necesidad de mallado requiere modificaciones en la geometría DAO. Estas modificaciones pueden ser la eliminación de operaciones, la idealización y/o la limpieza. La limpieza resulta necesaria a veces porque la geometría convertible en malla debe cumplir unos requisitos de alta calidad muy superiores a los del modelo sólido. Para la limpieza se suelen utilizar las herramientas de control de calidad de la aplicación DAO para comprobar si hay problemas, como entidades múltiples, que el modelo de DAO pudiera tolerar, pero que harían muy difícil o imposible generar la malla.

Una vez preparada la geometría con la que se puede generar la malla, se definen las propiedades de los materiales, cargas, sujeciones, soportes y restricciones, y se proporciona información sobre el tipo de análisis que deseamos realizar.

2. Construcción del modelo de Elementos Finitos

En este paso, se divide el modelo matemático (geometría) en elementos finitos mediante un proceso de individualización, más conocido como generación de “malla”. La individualización se manifiesta visualmente como la generación de la malla de la geometría. Sin embargo, también se individualizan las cargas y soportes y, cuando se ha generado la malla de modelo, se aplican nodos a las cargas y soportes individualizados de la malla de elementos finitos.

Con un método de elementos finitos, el mallado realiza dos tareas. Primero, sustituye un modelo continuo por uno discreto. Por tanto, el mallado reduce el problema a uno, con un número finito de elementos desconocidos que se puede resolver con una técnica numérica de aproximación. Segundo, representa la solución deseada (por ejemplo los desplazamientos) con un ensamblaje de funciones polinómicas simples definidas individualmente para los elementos.



Figura 43.- Ejemplo de Modelo Tridimensional con el Mallado aplicado

La aplicación utilizada en este estudio (SolidWorks) permite utilizar elementos sólidos tetraédricos para el mallado de geometría sólida y elementos planos triangulares para el mallado de geometría de superficie (sin volumen).

Hay disponibles cinco tipos de elementos: elementos sólidos tetraédricos de primer y segundo orden, elementos planos triangulares de primer y segundo orden y elementos de viga de dos nodos.

Los dos tipos aptos para ser usados en nuestro estudio por la naturaleza de la geometría y el objetivo de nuestro análisis son los elementos tetraédricos sólidos de primer orden y los de segundo orden [11].

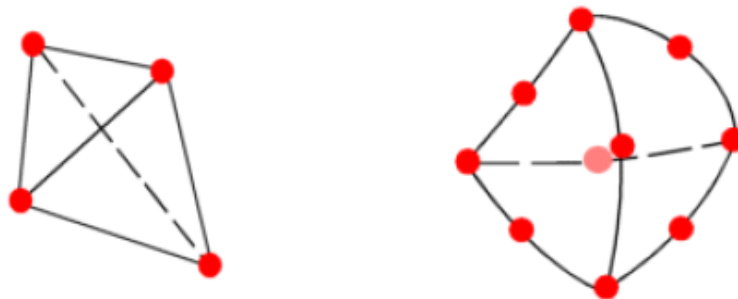


Figura 44.- Elemento tetraédrico de primer orden (izquierda) y de segundo orden derecha) [11]

3. Resolución del modelo de Elementos Finitos

Después de crear el modelo de elementos finitos, se utiliza un módulo de cálculo, provisto en la aplicación de Elementos Finitos para producir los datos de interés deseados. Es la parte con menos interacción del usuario al ser el núcleo de la aplicación la que realiza los cálculos pero sí es decisión del usuario la elección, dentro de la aplicación, del módulo de cálculo a utilizar ya que se suelen disponer diferentes opciones según el algoritmo de cálculo utilizado para la obtención de los resultados del estudio.

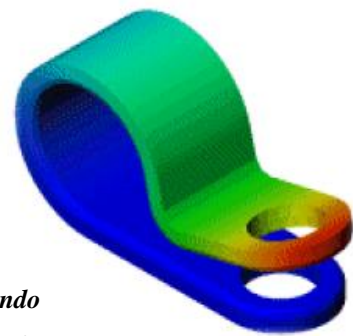


Figura 45.- Ejemplo de Modelo Tridimensional Mostrando el Resultado del Análisis de Deformaciones

4. Análisis de Resultados

El análisis proporciona unos datos de resultados muy precisos, que se pueden presentar en diversos formatos según la finalidad del estudio. Una interpretación correcta de los resultados requiere que se tenga en cuenta las suposiciones, simplificaciones y errores introducidos en los primeros tres pasos: construcción del modelo matemático, construcción del modelo de elementos finitos y resolución del modelo de elementos finitos.

2.5.1.1.- Aplicación Empleada

El software elegido para la realización del análisis numérico, y por tanto, para realizar las simulaciones, es SolidWorks® (versión 2016).

SolidWorks® es un programa de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft® Windows®, intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar sus ideas de forma rápida sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas.

Las principales características que hace de SolidWorks® una herramienta versátil y precisa es su capacidad de ser asociativo, variacional y paramétrico de forma bidireccional con todas sus aplicaciones. Además utiliza el Gestor de diseño (FeatureManager) que facilita enormemente la modificación rápida de operaciones tridimensionales y de croquis de operación sin tener que rehacer los diseños ya plasmados en el resto de sus documentos asociados.

Junto con las herramientas de diseño de Pieza, Ensamblajes y Dibujo, SolidWorks® incluye Herramientas de Productividad, de Gestión de Proyectos, de Presentación y de Análisis y Simulación que lo hacen uno de los estándares de diseño mecánico más competitivo del mercado.

2.5.1.2.- Procedimiento General y Formación de la Técnica

Antes de realizar las simulaciones de los ensayos, se han realizado dos pruebas para una mejor familiarización de la aplicación. Estas dos pruebas se realizaron con dos probetas MT: una con una entalla horizontal centrada y otra con la misma entalla girada 45°. Para tener una breve idea del procedimiento que se ha seguido para la realización de estas simulaciones, se va a explicar los pasos seguidos, resumidamente, para estas dos probetas de prueba:

1) Croquis y extrusión:

Se realiza el croquis de la pieza sobre un plano, dándole las medidas reales y se extruye para darle la espesor requerido.

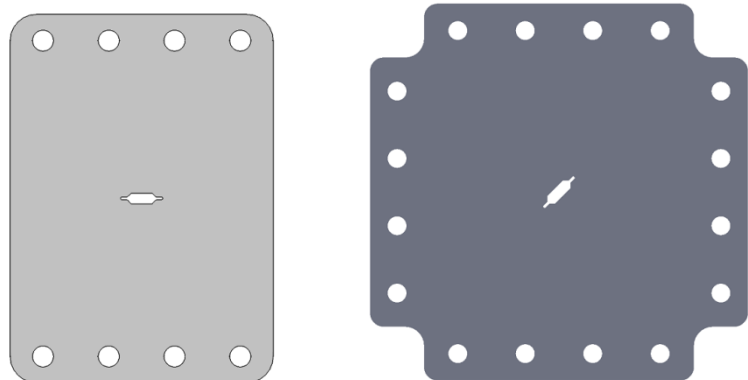


Figura 46.- Vistas de Alzado de las Piezas con Entalla Horizontal y Entalla Girada

2) Estudio o Simulación:

2.1.) *Definición del Material*

En la opción “Pieza” se define el tipo de material que se necesita, en este caso, Policarbonato, el cual se tendrá que definir como un material nuevo, ya que este es un tipo de material que no existe en la base de datos de SolidWorks.

2.2.) *Sujeciones*

El siguiente paso es definir los apoyos o partes de la pieza que se quieren sujetar, ciñéndose a los ensayos reales, es decir, intentando realizar las sujeciones simuladas lo más fieles posibles al ensayo real.

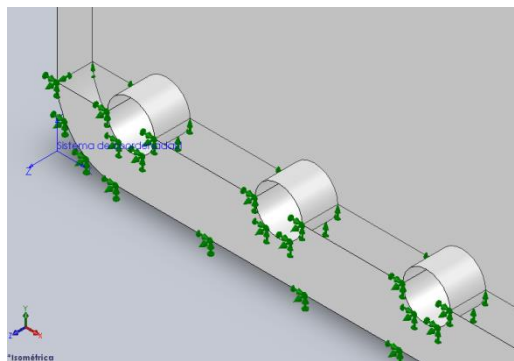


Figura 47.- Sujeciones en las caras inferiores, al igual que en el laboratorio, debido al tipo de mordazas utilizadas

2.3.) *Cargas*

Al igual que para los apoyos, hay que definir las fuerzas que entran en juego, de igual manera, siendo lo más fiel posible a lo realmente realizado.

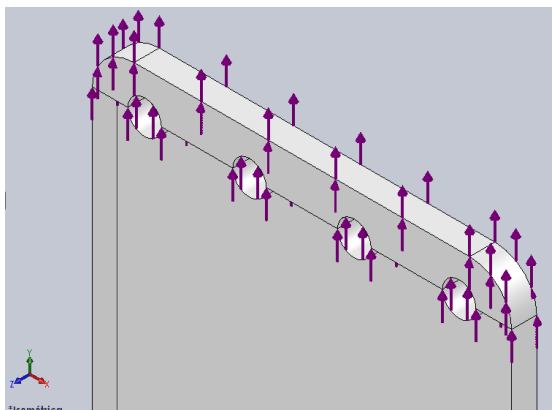


Figura 48.- Cargas en las caras Superiores, igual que en el laboratorio, debido al tipo de mordazas utilizadas

2.4.) Mallado

El último paso antes de realizar el estudio, es crear una malla en la pieza, dividiéndola en pequeñas partes infinitesimales y así poder realizar un estudio más detallado. Si se observa la malla, de la figura 49, en las partes cercanas a las entallas, se verá como hay una concentración mayor de malla, lo cual se ha realizado para tener aún un mayor detalle, ya que se conoce que en esas zonas concretamente será donde se creen las mayores tensiones.

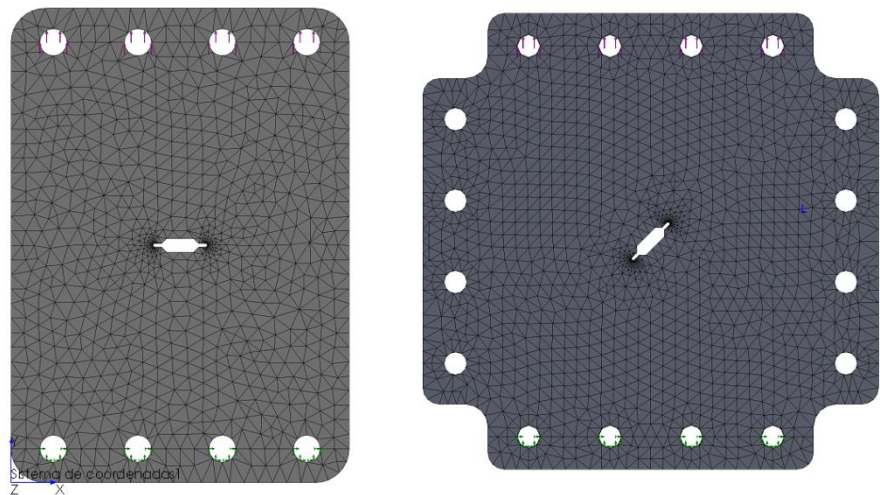


Figura 49.- Mallado de las piezas, con una malla más concentrada en la zona de la entalla

2.5.) Realización del Estudio

2.6.) Resultados

Al realizar el estudio se obtendrán una serie de resultados, como pueden ser: deformaciones, tensiones, desplazamientos, etc. Además, se puede obtener muchas más opciones según convenga:

- Distintas Maneras de mostrar los resultados: continuo, discreto, etc.
- Obtener máximos valores: ya sean de tensiones, desplazamientos, etc.

- Obtener cualquier tipo de valor en cualquiera punto que se quiera de la pieza.

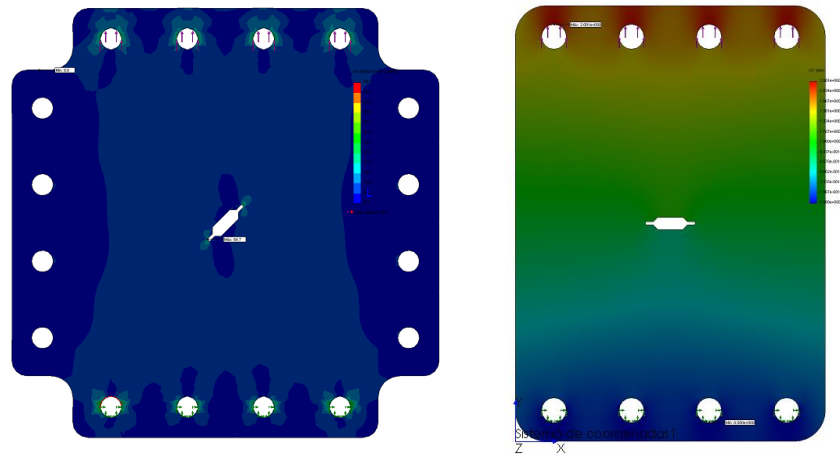


Figura 50.- Resultados: a) Representación discreta de Tensiones, b) Representación continua de Deformaciones

2.6.- Resultados

En esta sección se van a exponer los resultados obtenidos en el presente Trabajo, mostrando primero los resultados numéricos, después los experimentales y por último hacer una comparativa entre ambos para contrastar. Esta comparativa se va realizar cualitativamente de dos maneras:

- Contrastando gráficamente de manera teórico-experimental, es decir, FEM – Fotoelasticidad en reflexión, un perfil característico en cada probeta de un ensayo concreto, para una mejor apreciación y detalle de dicha comparativa.
- Gráfica de perfiles del resto de ensayos realizados para los distintos niveles de carga para observar de mejor manera las similitudes y comportamiento entre dichos ensayos.

2.6.1.- Resultados Experimentales

Los resultados experimentales de las cuatro probetas estudiadas son los siguientes. Se han realizado varios ensayos (con distintas cargas), por lo que no se van a describir todos los procedimientos para la obtención de estos de resultados de todas las probetas sino que se describirá una, la cual servirá como ejemplo, y así evitar resultados redundantes.

Disco sometido a Compresión

El primer modelo con el que se trabajó fue el disco sometido a compresión, empleado para la calibración del polariscopio. Con esta probeta se han realizado cinco ensayos: 100 N, 150 N, 200 N, 250 N, 300 N. Las seis imágenes capturadas que se muestran a continuación son referentes al ensayo de 100 N.

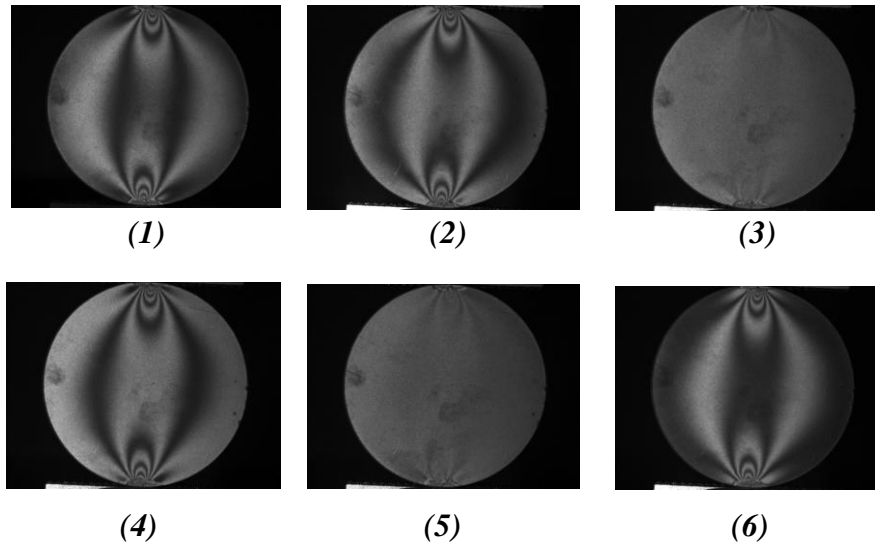


Figura 51.- Imágenes obtenidas mediante el proceso de phase-stepping para una carga de 100 N

Mediante el procesado de las imágenes anteriores se obtuvo el mapa de franjas isocromático desenvuelto (Figura 54), en la figura también se muestran los perfiles a lo largo de los ejes, vertical y horizontal, del disco.

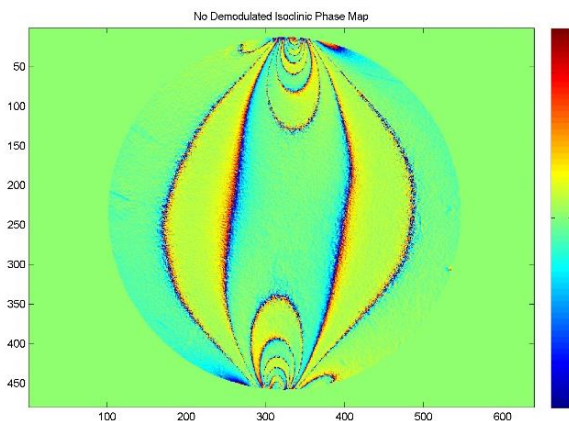


Figura 52.- Mapa de Isoclinas (disco)

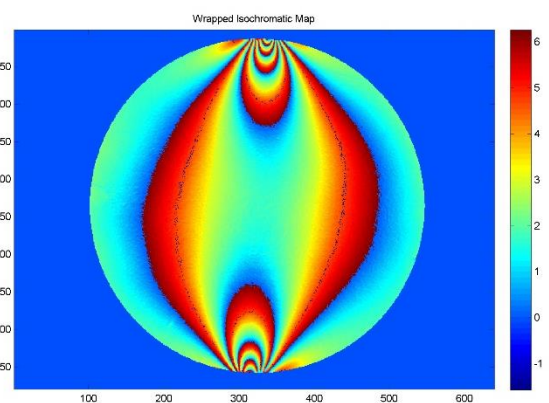


Figura 53.- Mapa de Isocromas (disco)

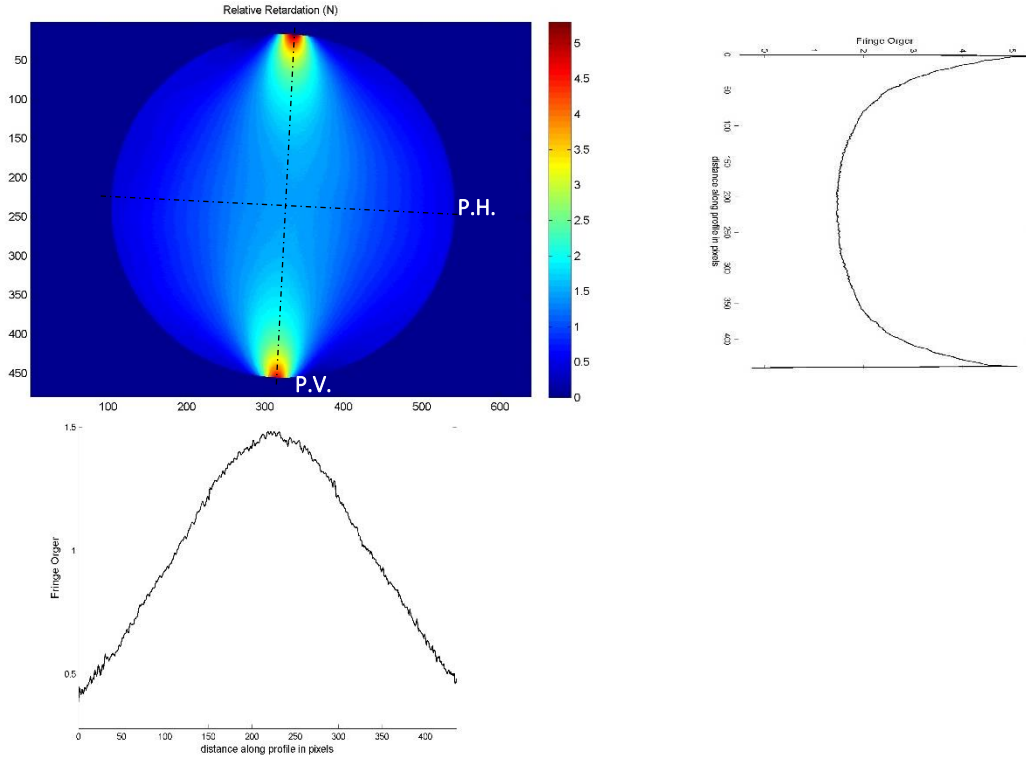


Figura 54.- Mapa Isocromático desenvuelto y perfiles en los ejes x e y (disco)

Probeta con Cambio de Sección a Tracción

El segundo modelo con el que se trabajó fue una probeta con cambio de sección. Con esta probeta se han realizado siete ensayos: 150 N, 200 N, 250 N, 300 N, 350 N, 400 N y 450 N. Las seis imágenes capturadas que se muestran a continuación son referentes al ensayo de 150 N.

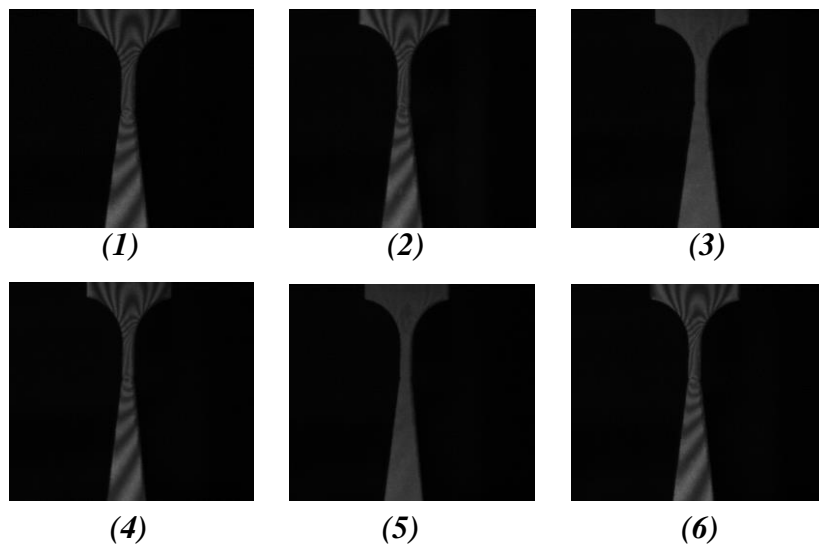


Figura 55.- Imágenes obtenidas mediante el proceso de phase-stepping para una carga de 150 N

De igual manera que para el disco, mediante el procesado de las imágenes anteriores se obtuvo el mapa de franjas isocromático desenvuelto (Figura 58), en la figura también se muestran los perfiles a lo largo del eje vertical.

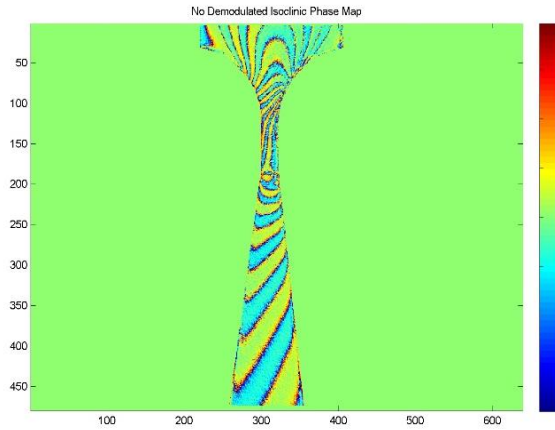


Figura 56.- Mapa de Isoclinas (cambio de sección)

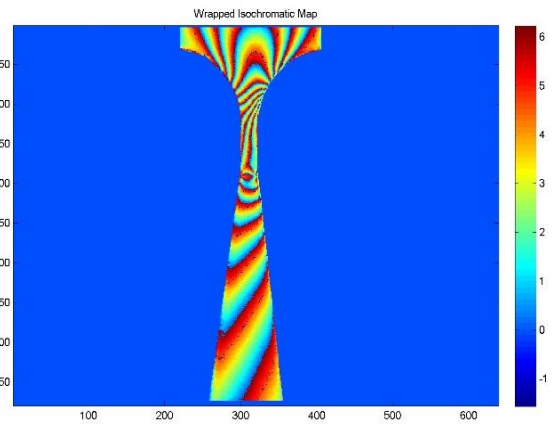


Figura 57.- Mapa de Isocromas (cambio de sección)

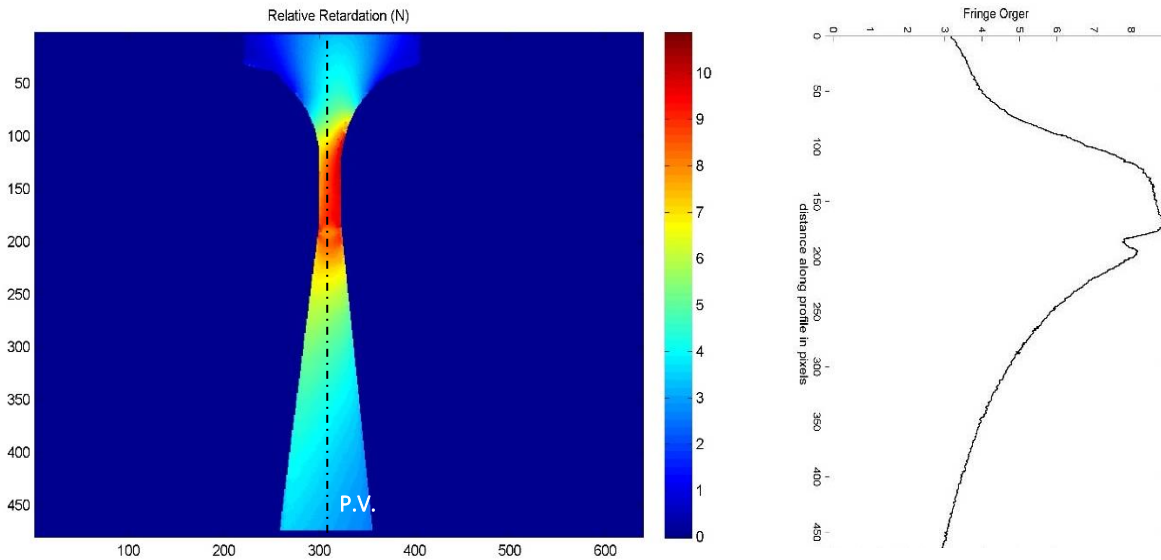


Figura 58.- Mapa Isocromático desenvuelto y perfil en el eje y (cambio de sección)

Probeta MT con Taladro sometida a Tracción

El tercer modelo con el que se trabajó fue una probeta MT con taladro. Con esta probeta se han realizado seis ensayos: 500 N, 1000 N, 1500 N, 2000 N, 2500 N y 3000 N. Las seis imágenes capturadas que se muestran a continuación son referentes al ensayo de 1000 N (figura 59).

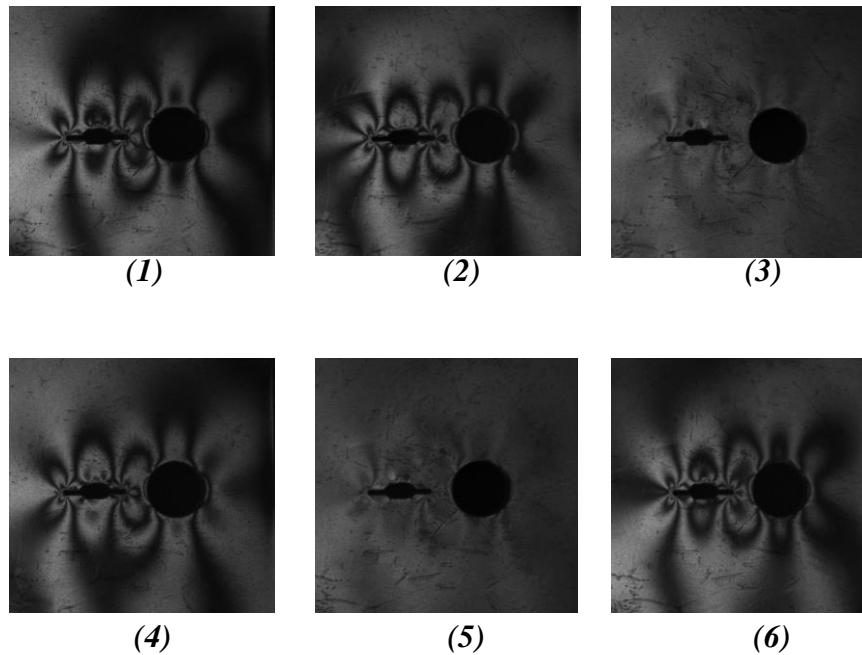


Figura 59.- Imágenes obtenidas mediante el proceso de phase-stepping para una carga de 1000 N

Mediante el procesado de las imágenes anteriores se obtuvo el mapa de franjas isocromático desenvuelto (Figura 62), en la figura también se muestran algunos de los perfiles más característicos de este ensayo.

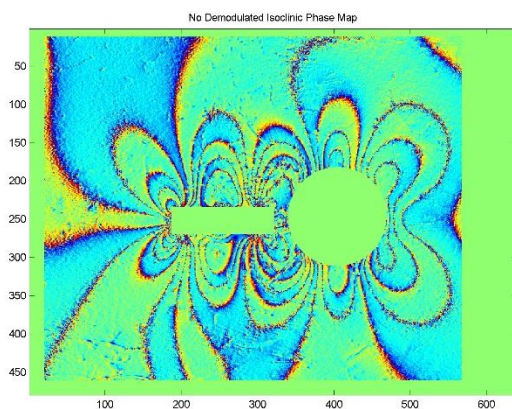


Figura 60.- Mapa de Isoclinas (MT con taladro)

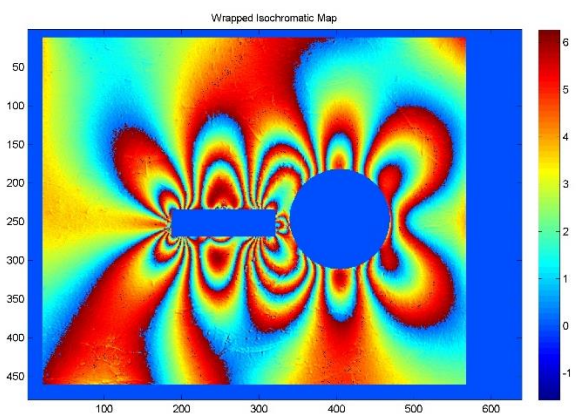


Figura 61.- Mapa de Isocromas (MT con taladro)

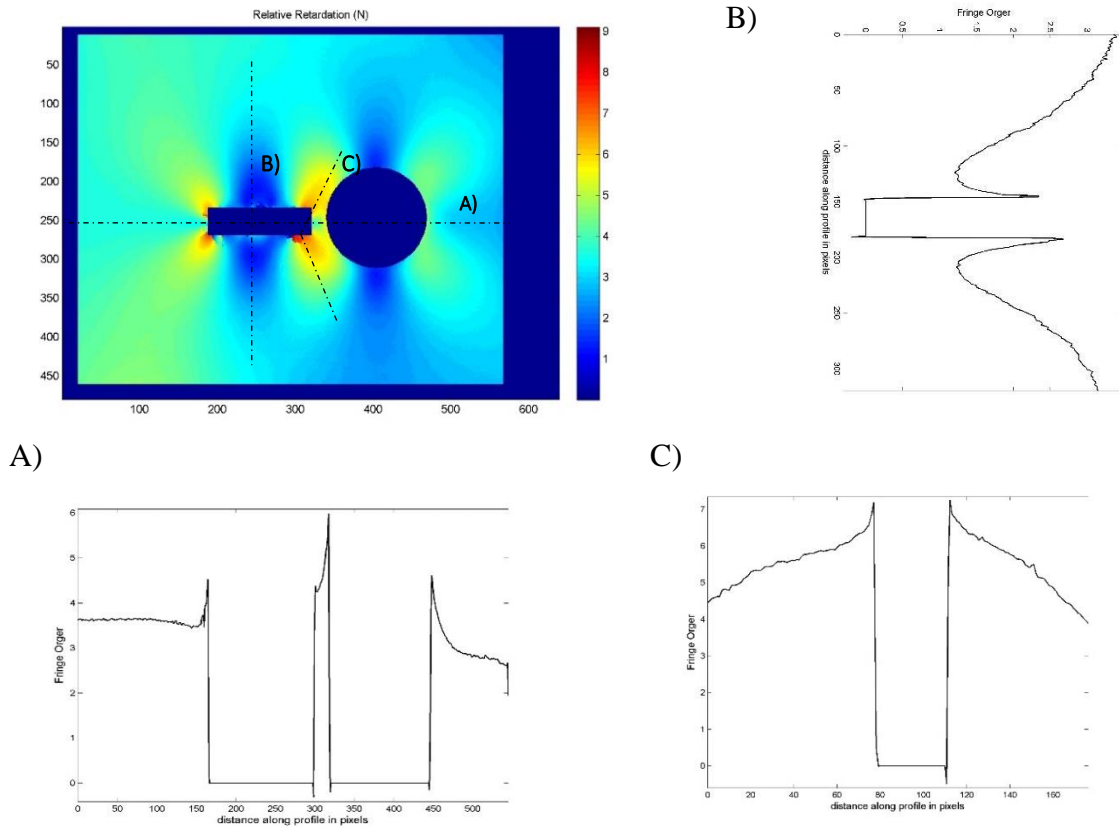


Figura 62.- Mapa Isocromático desenvuelto y perfiles en los ejes x e y (MT con taladro)

Probeta Rectangular con Talado Central a Tracción

El cuarto y último modelo con el que se trabajó fue una probeta rectangular con un taladro centrado. Con esta probeta se han realizado siete ensayos: 500 N, 750 N, 1000 N, 1250 N, 1500 N, 1750 N y 2000 N.

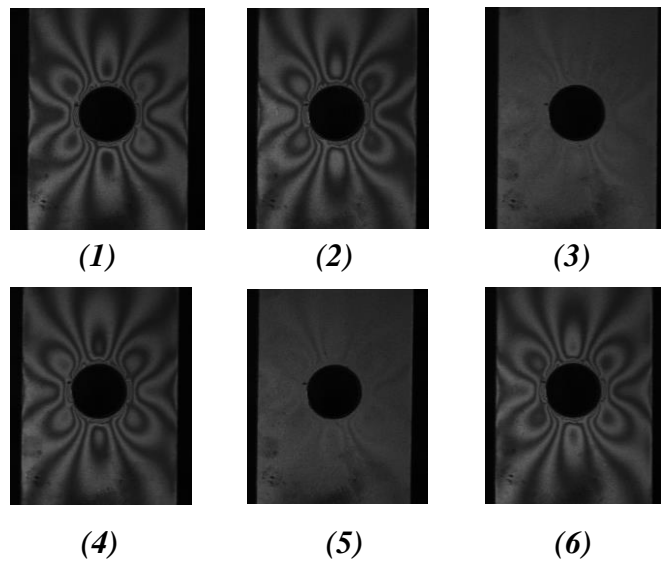


Figura 63.- Imágenes obtenidas mediante el proceso de phase-stepping para una carga de 1000 N

Mediante el procesado de las imágenes anteriores se obtuvo el mapa de franjas isocromático desenvuelto (Figura 66), en la figura también se muestran algunos de los perfiles más característicos de este ensayo.

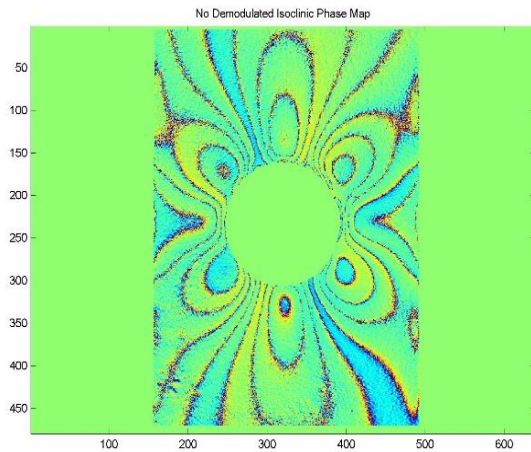


Figura 64.- Mapa de Isoclinas (taladro centrado)

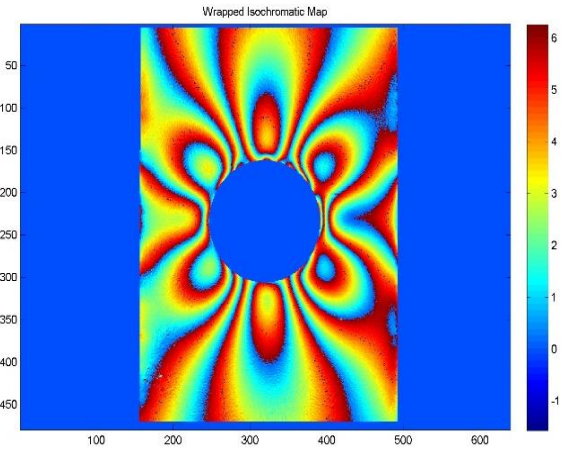
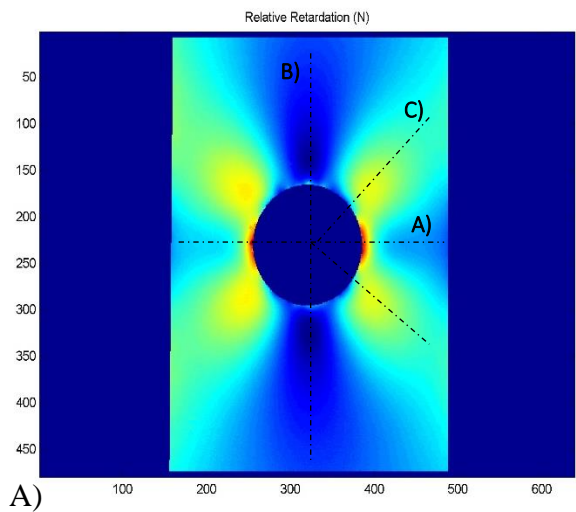
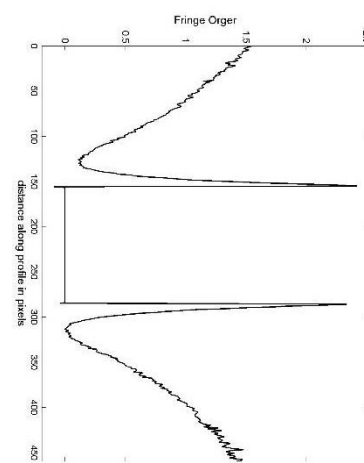


Figura 65.- Mapa de Isocromas (taladro centrado)



A)

B)



C)

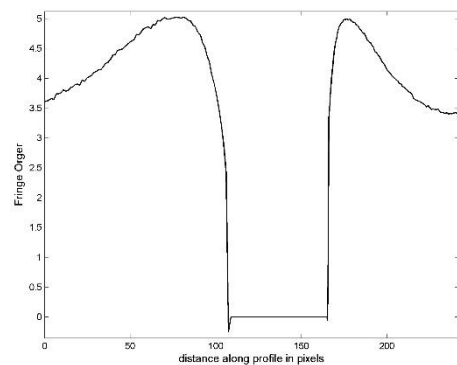
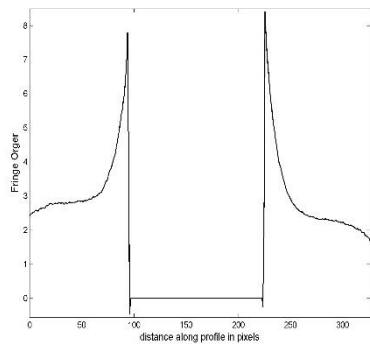


Figura 66.- Mapa Isocromático desenvuelto y perfiles en los ejes x e y (taladro centrado)

De todos estos perfiles obtenidos anteriormente es de donde se obtienen los valores experimentales de orden de franja, los cuales serán necesarios para una comparativa con los valores teóricos.

2.6.2.- Resultados Numéricos

Los resultados numéricos se han obtenido mediante la técnica de elementos finitos (FEM) y esta técnica se ha aplicado mediante el programa de diseño mecánico “SolidWorks”. Mediante este software se han obtenido la diferencia de tensiones principales y con ella, y mediante la Ley Tenso-Óptica, se puede conseguir el parámetro de orden de franja de la simulación de ese modelo, obteniendo así los siguientes resultados:

Disco sometido a Compresión

A continuación, se muestra una tabla con los valores de orden de franja teóricos calculados mediante la Ley Tenso-Óptica a lo largo de un perfil longitudinal por el eje de simetría. Para obtener estos valores de orden de franja se ha necesitado conocer la diferencia de tensiones principales, las cuales se han obtenido mediante una expresión numérica concreta [4] para una disco sometido a compresión (ec. 29):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{4PR}{\pi t} \cdot \frac{R^2 - (x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2 + R^2)^2 - 4y^2R^2} \quad (29)$$

De esta expresión se sabe:

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

Como aclaración destacar que esta expresión anterior (ecuación 29) no se ha utilizado como sustituto al FEM sino que ha sido una opción alternativa para una mejora de los resultados obtenidos, concretamente en esta probeta, debido a que el FEM ofrecía muy poca resolución de puntos en la zona del concentrador de tensiones, aun teniendo un control de mallado muy minucioso, lo que provocaba una pendiente muy elevada en el perfil obtenido mediante FEM y por tanto se producía una notoria diferencia con respecto al perfil experimental. De esta manera, con la ecuación 29 y gracias a sus variables (x,y -

coordenadas) se pueden obtener una mayor resolución de puntos a lo largo de cualquier perfil deseado y por tanto se obtienen unos perfiles mucho más fieles y rigurosos si cabe (figura 67).

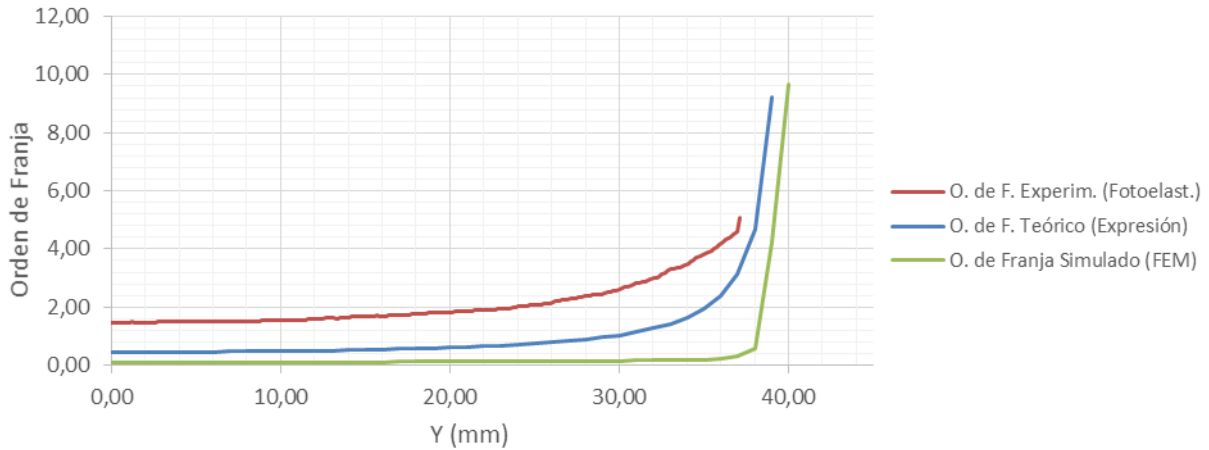


Figura 67.- Comparativa gráfica de los perfiles obtenidos a lo largo del radio del disco de manera numérica, simulada y experimental

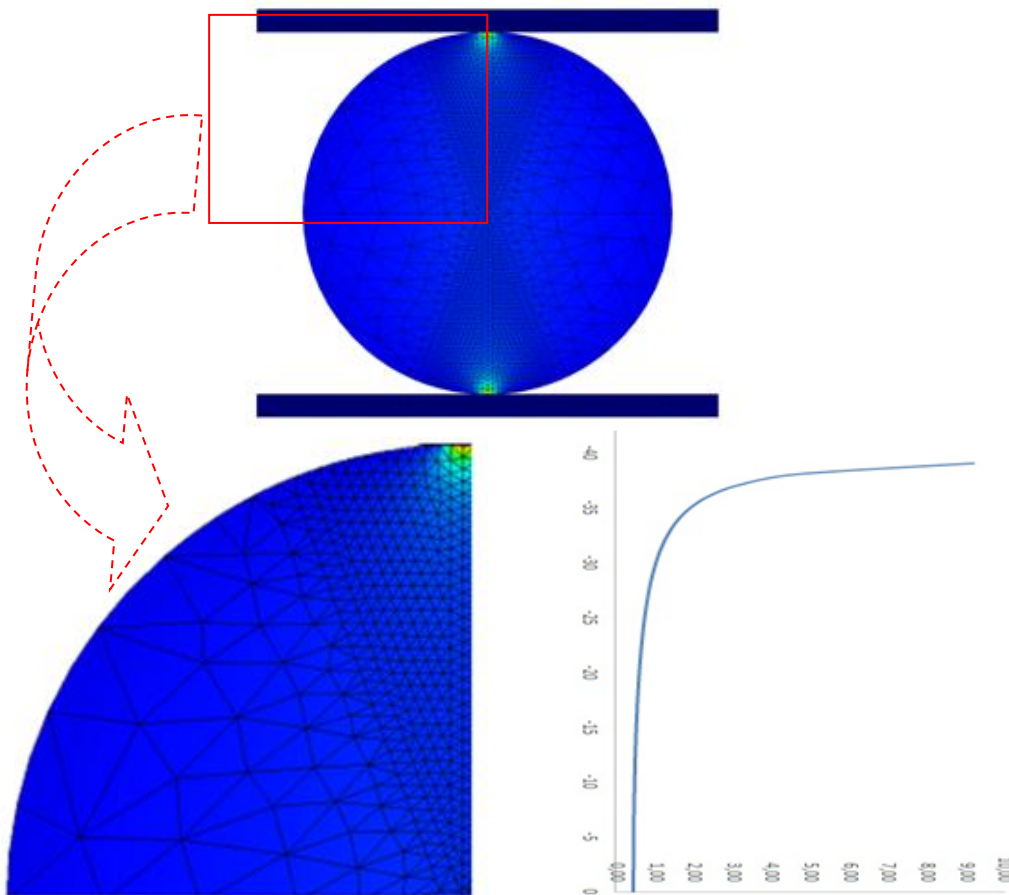


Figura 68.- Simulación mediante SolidWorks de la diferencia de tensiones principales del disco con un control de malla en la zona de interés

Figura 69.- Orden de Franja Simulado obtenido en el perfil vertical obtenido en la mitad del elemento (debido a su simetría)

Como aclaración, comentar que la figura 68 no es la representación gráfica de la distribución de orden de franja en el disco, es decir, esa imagen no es un mapa isocromático desenvuelto (aunque se le parezca mucho) ya que SolidWorks no permite visualizar este parámetro, sino que es la distribución de la diferencia de tensiones principales del elemento. Esto pasará igual con el resto de probetas.

Probeta con Cambio de Sección a Tracción

De igual manera para esta segunda probeta se va a mostrar tanto la distribución de las tensiones principales como el perfil de orden de franja obtenido a lo largo del eje transversal de simetría, concretamente de un ensayo de 150 N (figura 70), resaltando donde se encuentra la zona de mayor concentración de tensiones, la cual es el estrechamiento o cuello.

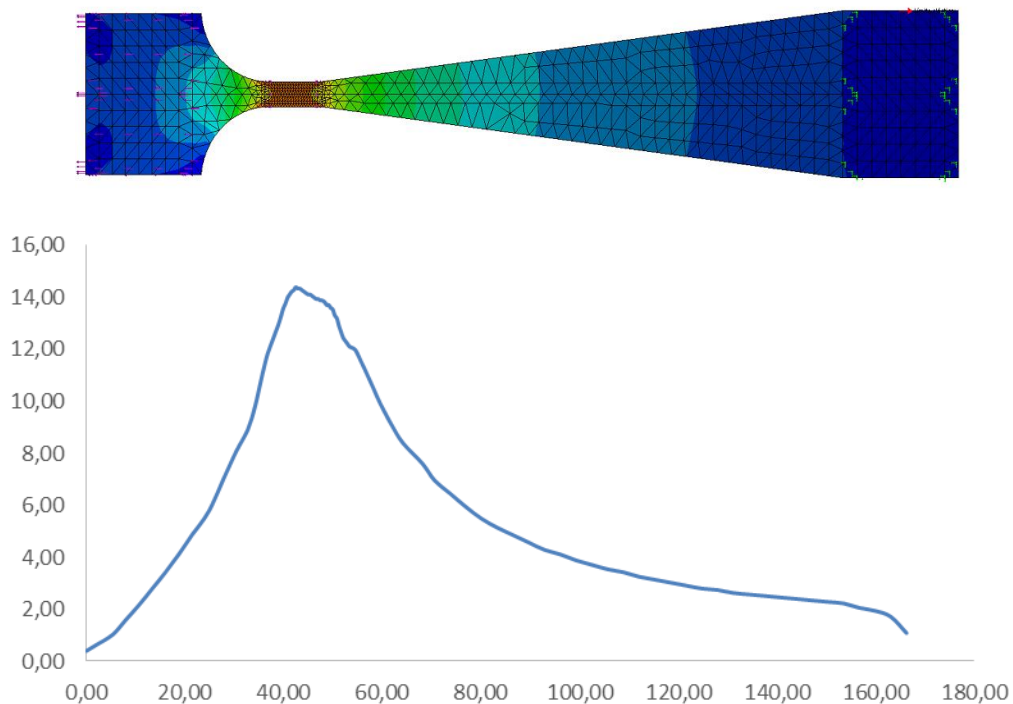


Figura 70.- Distribución de la diferencia de tensiones principales mediante SolidWorks de la probeta de cambio de sección (arriba) y el perfil de orden de franja simulado (abajo) obtenido transversalmente a lo largo del eje de simetría

Probeta MT con Taladro sometida a Tracción

Para esta tercera probeta se ha escogido el ensayo de 500 N para mostrar los valores con los que se ha conseguido obtener el orden de franja teórico (figura 71). Este elemento debido tanto a la entalla como a la proximidad del taladro a esta, no se tiene una zona concreta de mayor interés sino que todo el concentrador de tensión es objeto de estudio.

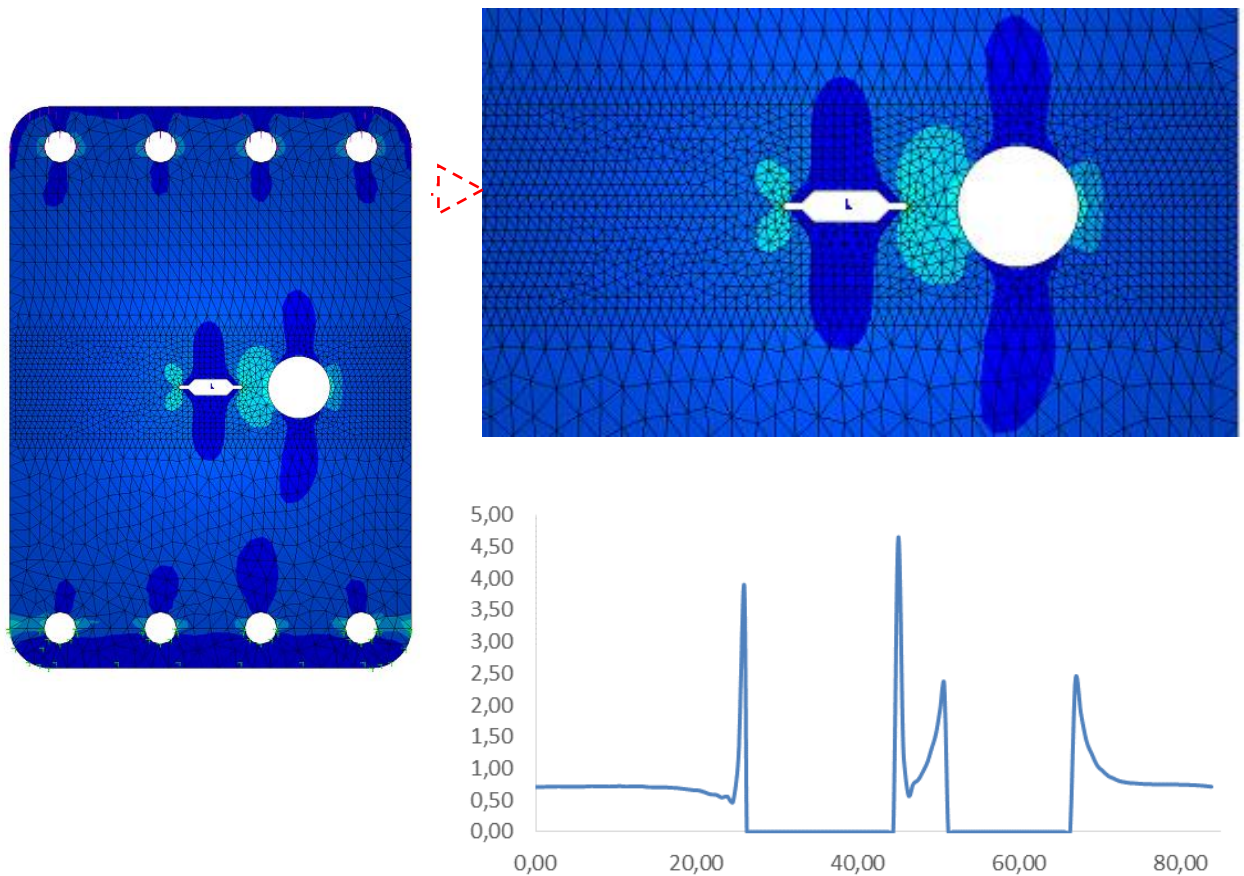


Figura 71.- Distribución de la diferencia de tensiones principales (con detalle del concentrador de tensiones) mediante SolidWorks de la probeta MT (izquierda) y el perfil de orden de franja teórico (derecha abajo) obtenido transversalmente a lo largo del eje de simetría

Probeta Rectangular con Taladro Central a Tracción

En esta última probeta, se procede a realizar lo mismo que para las anteriores. Se muestra la distribución de la diferencia de tensiones principales obtenidas mediante elementos finitos, haciendo un detalle de la zona más importante desde el punto de vista tensional y haciendo un perfil de orden de franja, debajo de este detalle, para apreciar de

mejor manera el comportamiento de este a lo largo de la sección transversal por su eje de simetría. Como se puede observar, tanto el detalle como el perfil de orden de franja son solamente la mitad de la probeta, ya que debido a su simetría también habrá una simetría gráfica, por lo que bastará con visualizar esta mitad.

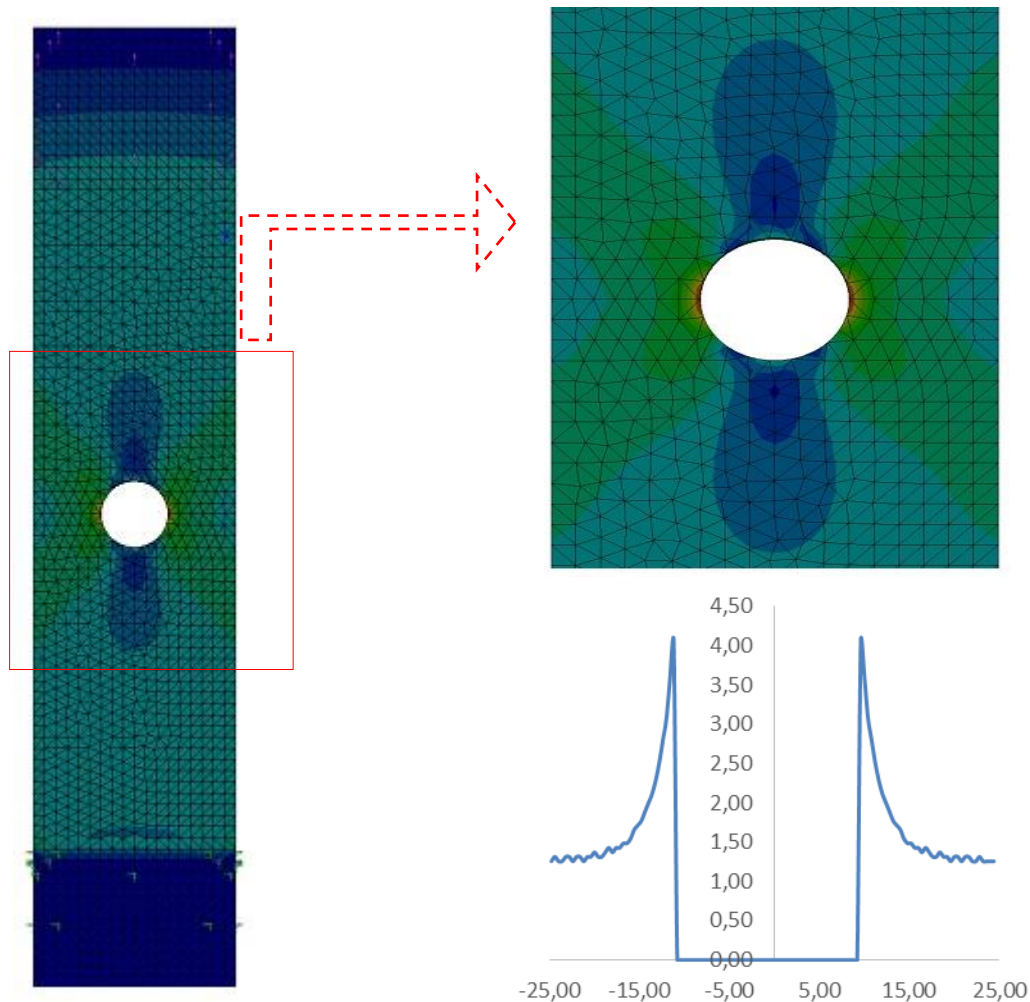


Figura 72.- Distribución de la diferencia de tensiones principales (con detalle del concentrador de tensiones) mediante SolidWorks de la probeta con taladro (izquierda) y el perfil de orden de franja teórico (derecha abajo) obtenido transversalmente a lo largo del eje de simetría

2.6.3.- Discusión de Resultados

En este último punto de este bloque se va a abordar una comparativa entre los resultados FEM y experimentales, para poder cuantificar las diferencias y concluir si la técnica de fotoelasticidad en reflexión es válida o no para el estudio de elementos mecánicos. Esto se va a realizar mediante dos comparativas gráficas FEM-Experimentación, las cuales son:

- Perfiles de orden de franja obtenidos en un ensayo concreto de cada probeta para un mejor detalle de la comparativa y comportamiento de ambos (figuras 73, 76, 79 y 82).
- Perfiles obtenidos en el resto de ensayos, para una visualización general de dichos ensayos y así no hacer redundante este punto (figuras 74, 76, 78, 80).

Disco sometido a Compresión

Como se ha mostrado anteriormente de manera numérica (figura 69) en el disco se ha trazado un perfil longitudinal por su eje de simetría, por el cual se han obtenido los siguientes perfiles para el ensayo de 100 N, tomando como origen el centro del disco:

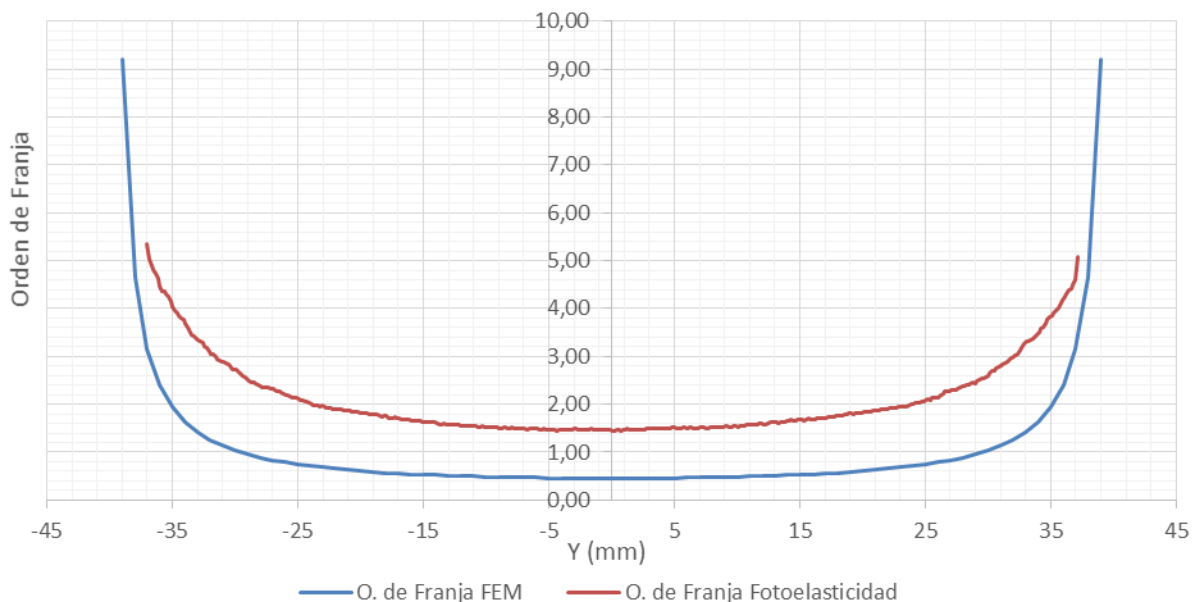


Figura 73.- Comparativa FEM- Fotoelasticidad en reflexión de los perfiles trazados en un ensayo de 100 N en un disco sometido a compresión

Como se puede observar en esta gráfica se obtienen perfiles con un comportamiento muy fiel el uno del otro aunque hay que puntualizar:

- debido a la aplicación de la máscara a la hora de procesar la imágenes experimentalmente no se obtienen los valores máximos que se consiguen obtener mediante FEM, algo completamente lógico ya que con la máscara se eliminan zonas de ruido y conflicto pero a la vez se elimina parte de la probeta, quedando la zona de estudio experimental reducida en unos milímetros.

- Ambos perfiles tienen un comportamiento muy parecido, como se ha dicho anteriormente, pero existe una diferencia entre los valores del perfil obtenido mediante FEM y fotoelasticidad en reflexión, la cual puede ser producida por una falta de resolución y por las propias variables de la experimentación ya que lo más lógico es que en las zonas sin problemas tensionales (como es la zona del centro del disco) los valores de orden de franja sean más próximos a los valores obtenidos mediante FEM, es decir, más próximos a cero. Por esta misma razón, en la mayoría de los casos con las demás probetas el orden de franja experimental será algo mayor que el calculado por FEM.

A continuación se va a ilustrar un gráfico similar al anterior pero en el que van a estar incluidos más niveles de carga, concretamente se van a incluir los perfiles obtenidos para los ensayos de 200, 250 y 300 N (no se han incluido más ensayos para no provocar confusión y no una aglomeración de líneas innecesaria en el gráfico, con lo que se provocaría una mala apreciación del comportamiento de estas).

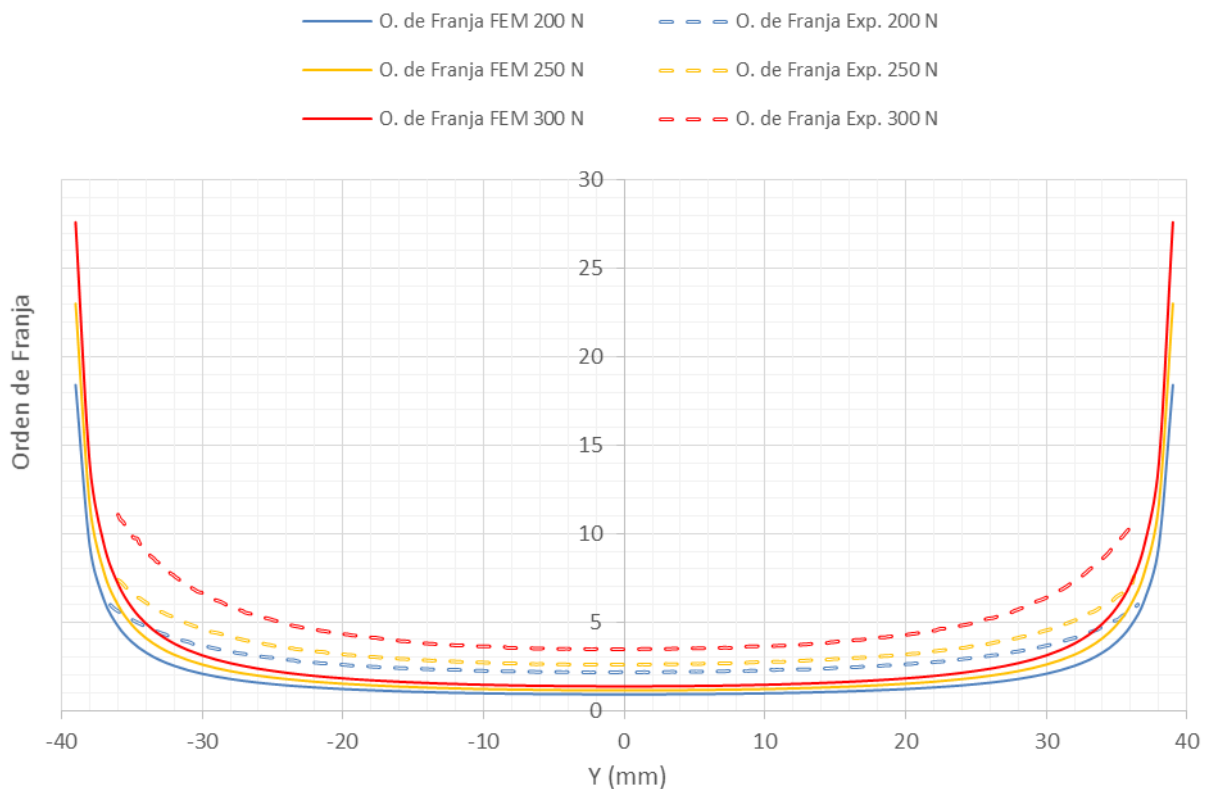


Figura 74.- Comparativa gráfica FEM – Fotoelasticidad en Reflexión de distintos niveles de carga (disco)

En este gráfico se puede observar varias cosas. Por un lado, como los perfiles obtenidos mediante FEM en la zona centro del disco son muy próximos a cero

independientemente de la carga aplicada y como los máximos en estos perfiles si aumentan de manera lineal con el aumento de la carga, haciéndolo de una manera muy coherente, ya que observando la figura 73, la cual muestra un ensayo de 100 N el máximo orden de franja está en torno a 9 y aquí se aprecia perfectamente como para un ensayo de 200 N (es decir el doble de carga) se tiene un orden de franja máximo obtenido mediante FEM en torno a 18. Por otro lado, destacar que en términos generales los perfiles obtenidos empíricamente tienen valores algo superiores que los obtenidos por FEM, algo lógico como se ha comentado anteriormente por la falta de una mejor resolución y las propias variables experimentales.

Pero en general se aprecia como los perfiles experimentales tienen un comportamiento bastante fiel a los perfiles mediante FEM, por lo que el disco tiene unos resultados bastante coherentes en todos sus ensayos aun con la diferencia encontrada en las partes con menos conflictos tensionales (parte central).

Probeta con Cambio de Sección a Tracción

Igual que para el disco en esta probeta también se ha elegido como perfil característico un perfil longitudinal por su eje de simetría, por el cual se han obtenido los siguientes perfiles para un ensayo de 150 N:

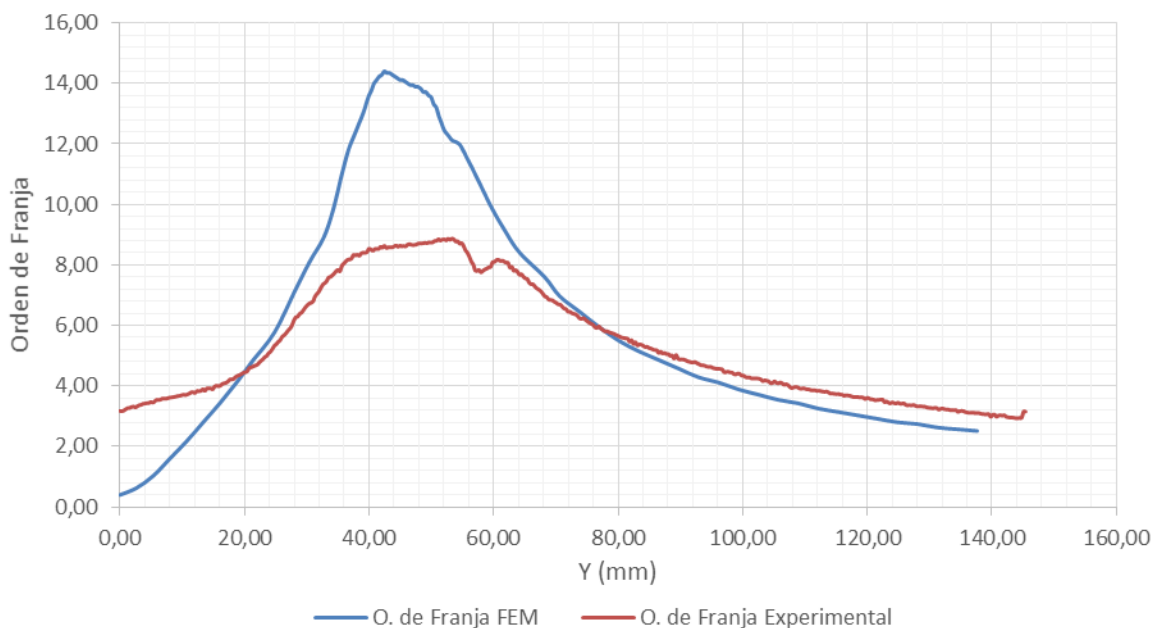


Figura 75.- Comparativa FEM- Fotoelasticidad en reflexión de los perfiles trazados en un ensayo de 150 N en una probeta con cambio de sección sometida a tracción

En esta gráfica se pueden observar claramente tres etapas:

- 1) Origen – 20 mm (aprox. zona anterior al estrechamiento o cuello): en esta zona sucede como sucedía anteriormente con el disco, es una zona con poco conflicto tensional, por lo que idealmente el valor del orden de franja debería estar próximo a cero, lo cual sucede con el perfil mediante FEM pero no de igual manera con el experimental. El experimental presenta, en esta región unos valores algo superiores, lo cual es debido, al igual que en el disco, a la propia experimentación o a la falta de una mejor resolución de los resultados.
- 2) 20 – 70 mm (aprox. cuello y parte del ensanchamiento): esta es la parte donde se encuentran las mayores concentraciones de tensiones, la parte más conflictiva. También es la parte más delicada desde el punto de vista experimental ya que como se puede observar en la gráfica 75, el perfil mediante FEM tiene unos máximos mucho mayores que el experimental ya que esta última tiene un punto en el que deja de crecer. Esto es debido a que esta zona es una de un área muy pequeña y en la que se producen una alta concentración de tensiones. Esto produce que a la hora de procesar estas imágenes se creen zonas de ruido y alteraciones manifestadas, en este caso, con un decrecimiento del orden de franja.
- 3) Resto de probeta (ensanchamiento): en la que se ve un perfecto comportamiento entre FEM y fotoelasticidad en reflexión. El perfil experimental se ciñe fielmente al comportamiento del perfil obtenido mediante FEM.

El siguiente gráfico muestra el comportamiento y similitud de los perfiles obtenidos (FEM - Fotoelasticidad en reflexión) para tres ensayos distintos, a los cuales les pertenecen las respectivas cargas de 200, 250, y 300 N. De nuevo, como para el elemento estudiado anteriormente, puntualizar que se han realizado más ensayos de los que en este gráfico se muestran, los cuales no han sido incluidos para no saturar de datos esta representación y obtener así una mejor visualización y percepción de dichos datos:

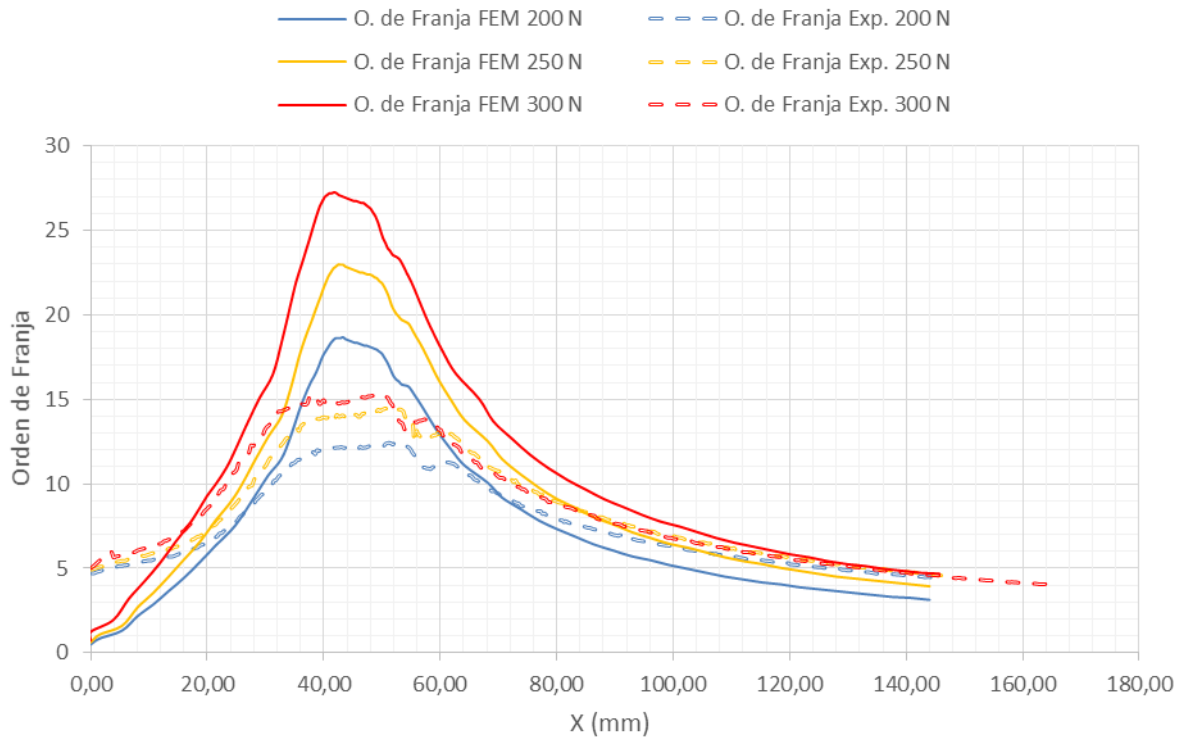


Figura 76.- Comparativa gráfica FEM – Fotoelasticidad en Reflexión de distintos niveles de carga (cambio de sección)

En este gráfico (figura 76) se aprecia un crecimiento lineal de todos los perfiles (numéricos y experimentales) en tanto en cuanto las cargas aumentan. Todos los perfiles mostrados en este gráfico anterior tienen el mismo comportamiento que el gráfico de la figura 75, es decir, los perfiles obtenidos mediante FEM tienen unos picos máximos mucho más pronunciados en la zona del estrechamiento que los perfiles experimentales debido a la gran concentración de tensiones en esta pequeña área.

Probeta MT con Taladro sometida a Tracción

Procediendo de la misma manera que para las probetas anteriores, se ha elegido un perfil característico para hacer la comparativa FEM-Fotoelasticidad, aunque, como se ha podido comprobar en los puntos 2.6.1 y 2.6.2 esta probeta no tiene solo un perfil característico, sino que al tener varios concentradores de tensión se obtiene varios perfiles para estudio. Aun así en este caso se ha elegido representar la comparativa de un perfil transversal a lo largo de su eje de simetría para un ensayo de 500 N. Para ello se ha tomado como origen de coordenadas un punto a 26 mm a la izquierda de la entalla, centrandó así el estudio en la zona de los concentradores de tensión:

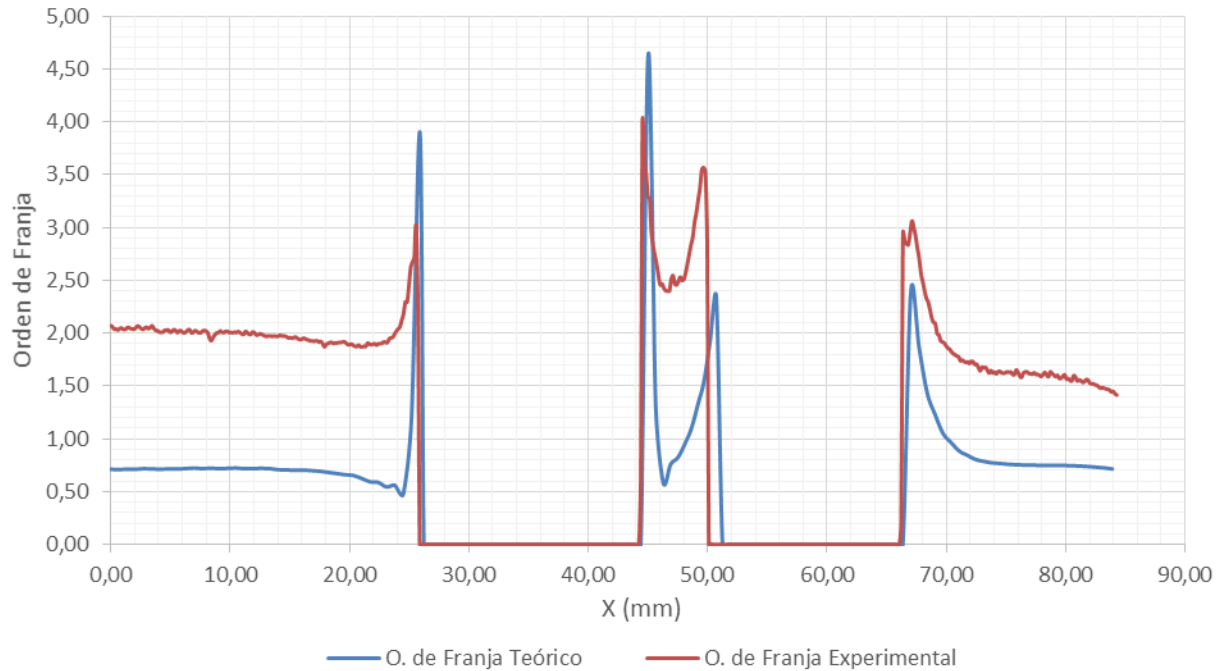


Figura 77.- Comparativa FEM- Fotoelasticidad en reflexión de los perfiles trazados en un ensayo de 500 N en una probeta MT con entalla sometida a tracción

De este gráfico se puede destacar algunos puntos:

- Por un lado, apreciar como en toda la longitud del perfil, los datos experimentales se mueven en unos valores mayores que los teóricos, lo cual sucede por las mismas razones que para las probetas anteriores.
- Por otro lado, algo muy importante, darse cuenta de cómo el taladro influye más en la entalla que al contrario, ya que, sobre todo numéricamente, se aprecia perfectamente como el pico derecho de la entalla (aproximadamente a 45 mm) es mucho más pronunciado que el pico izquierdo del taladro (a 26 mm). Con la parte experimental pasa igual aunque de forma más leve, lo cual tiene como explicación la máscara creada en el desenvuelto de imágenes en Matlab, es decir, entre la entalla y el taladro se crean unas concentraciones de tensión muy elevadas por lo que a la hora de crear la máscara en Matlab hay que hacerla con un gran tamaño, llegando a quitar parte de la propia probeta y por tanto parte de mapa de desenvuelto y con ello orden de franja.

Adicionalmente a estos puntos, se puede apreciar como el comportamiento entre las técnicas llevadas a cabo, aun siendo algo mayores los valores del perfil experimental que los del perfil obtenido por FEM, es muy coherente.

En la siguiente imagen (figura 78) se procede a mostrar en una misma gráfica los perfiles numéricos y experimentales obtenidos en esta probeta en otros tres ensayos con una mayor carga, concretamente con 1, 1,5 y 2 KN:

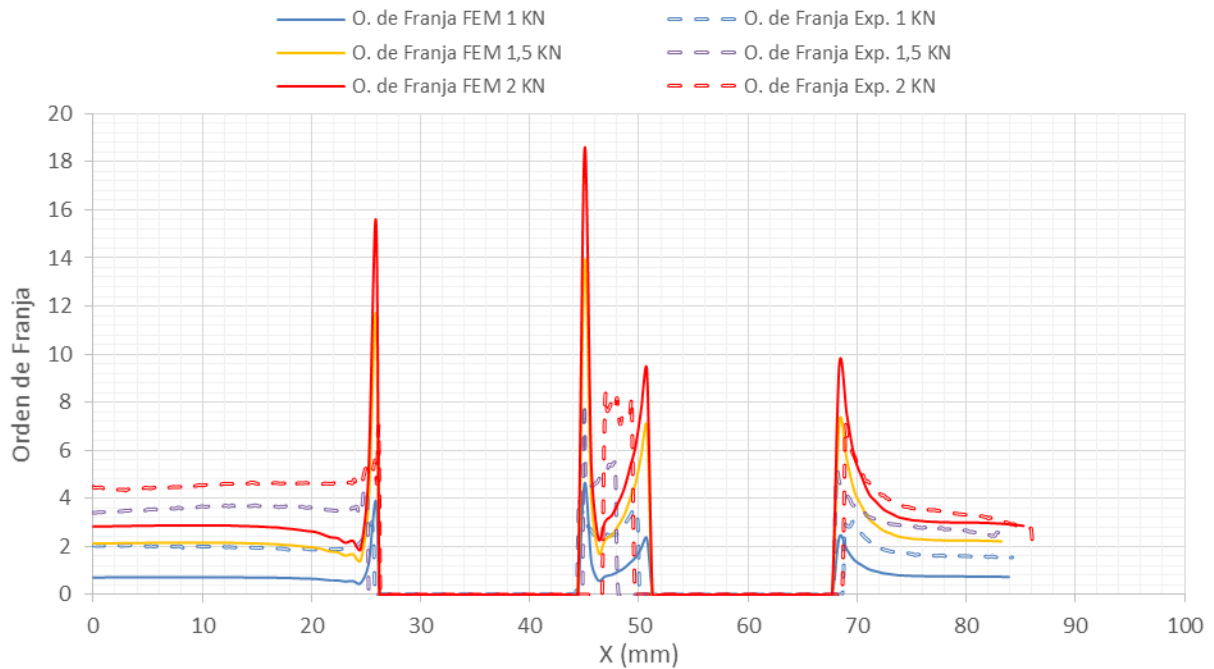


Figura 78.- Comparativa gráfica FEM – Fotoelasticidad en Reflexión de distintos niveles de carga (MT con taladro)

En esta figura se ven las mismas puntualizaciones que se han realizado para la figura 77, pudiendo resaltar en esta como los valores de estos perfiles ascienden directamente proporcional a la carga aplicada. También es de interés señalar como, principalmente, en la zona centro de la probeta, es decir, entre la entalla y el taladro (aprox. entre 45 mm y 52 mm) los perfiles experimentales se estrechan de manera considerable, debido a la máscara realizada en el procesado de las imágenes, ya que con ella se elimina parte del material a estudiar. Por último, puntualizar que a mayor carga aplicada, mayor es la diferencia entre el pico conseguido mediante FEM en la zona intermedia (entre entalla y taladro) y el experimental, debido a la misma razón que sucedía para el estrechamiento de la probeta de cambio de sección, es una zona de área pequeña en la que se producen elevadas concentraciones de tensiones, lo cual produce ruido y alteraciones experimentalmente.

Probeta Rectangular con Taladro Central a Tracción

Finalmente y siguiendo las pautas de los casos anteriores se ha elegido un perfil característico para hacer la comparativa FEM-Fotoelasticidad en reflexión para esta última probeta. Para este elemento también se ha elegido representar la comparativa de un perfil transversal a lo largo de su eje de simetría, concretamente para un ensayo de 500 N:

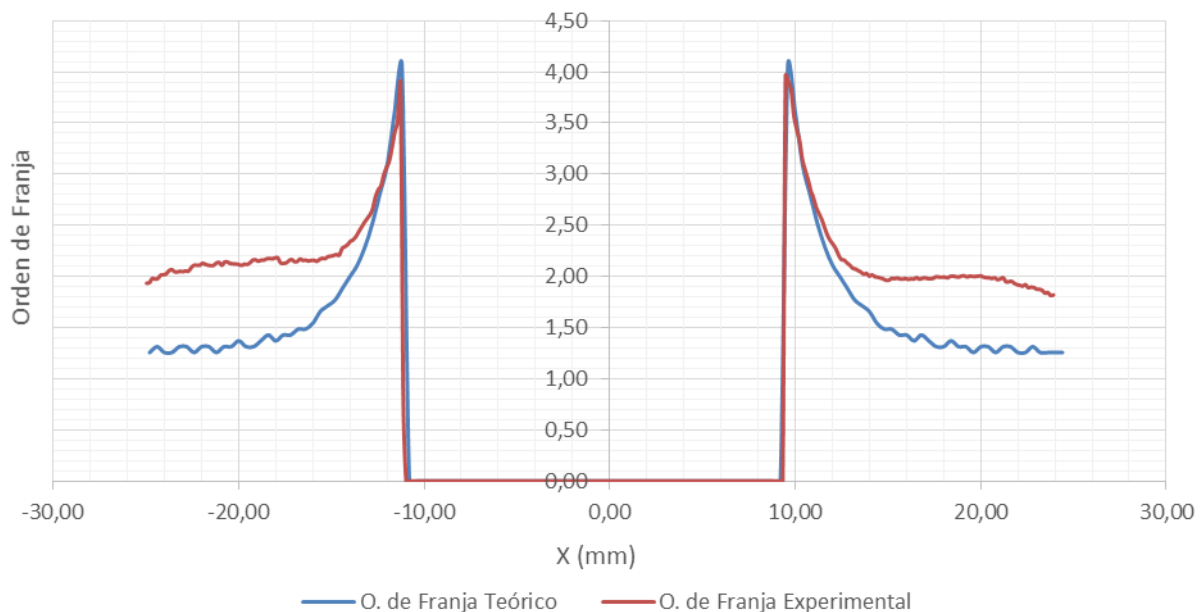


Figura 79.- Comparativa FEM-Fotoelasticidad en reflexión de los perfiles trazados en un ensayo de 500 N en una probeta rectangular con taladro centrado

En esta última representación de un ensayo simple (500 N) se aprecia de manera perfecta como para esta probeta se obtienen también una relación FEM-Fotoelasticidad bastante fiel y como, aunque en las zonas más alejadas del taladro los valores experimentales son algo mayores que los numéricos (al igual que pasaba en el resto de elementos estudiados), hay una gran correspondencia entre el orden de franja obtenido mediante la técnica de fotoelasticidad en reflexión y el obtenido mediante FEM, ya que el procesado de imágenes para este elemento ha provocado muchos menos problemas que para los casos anteriores.

Por último a continuación se muestra otro gráfico en el que se van a mostrar los perfiles obtenidos mediante las dos técnicas utilizadas en este trabajo para las cargas de 750 N, 1 KN y 1,25 KN:

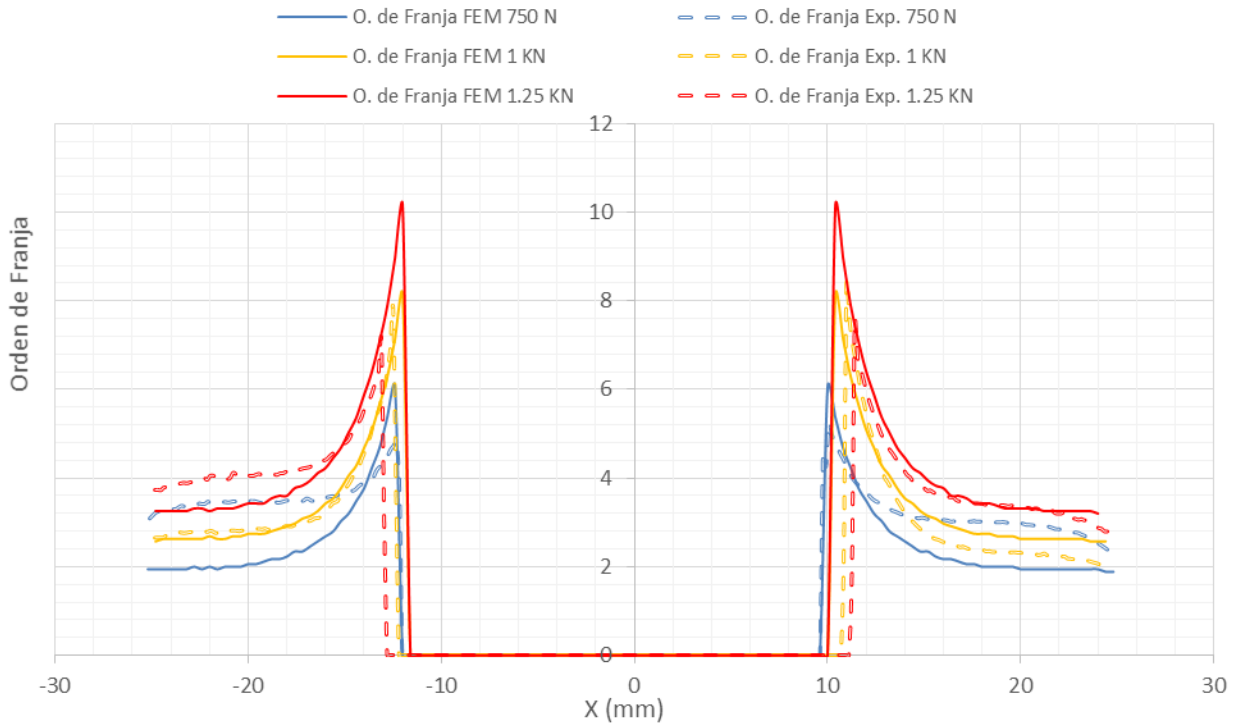


Figura 80.- Comparativa gráfica FEM – Fotoelasticidad en Reflexión de distintos niveles de carga (Probeta con taladro centrado)

Este gráfico tiene poco que puntualizar debido al correcto comportamiento que todos los perfiles presentan, incluso se puede observar claramente como el tamaño del taladro experimentalmente se hace algo mayor con el aumento de la carga, ya que al aumentar la carga aumenta la concentración de tensiones alrededor del taladro provocando más ruido y conflictos y teniendo que hacer la máscara unos milímetros mayor.

2.7.- Conclusiones

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo el estudio de elementos mecánicos mediante la técnica óptica de fotoelasticidad en reflexión, a partir de la determinación del valor de orden de franja de cada elemento de manera experimental y comparándolo con el mismo parámetro obtenido de manera numérica mediante Elementos Finitos, ya que este es el parámetro de estudio de la fotoelasticidad. Por consiguiente,

empíricamente se ha realizado un procesado de las imágenes capturadas, mediante el método de los seis pasos o seis imágenes (Phase-Stepping) de Patterson y Wang [3], el cual también implica el desenvolvimiento del mapa de fases isocromático, para poder obtener un mapa continuo del orden de franja, con la consecuente introducción de errores, que serán más o menos importantes en función de la geometría a analizar. De esta forma, en vista del gran resultado que presenta cada uno de los mapas de franjas isocromáticos obtenidos para los modelos empleados (figuras 54, 58, 62, 66), se puede establecer que se realizó un correcto procesado de las imágenes y, como consecuencia, una satisfactoria calibración del polariscopio.

Adicionalmente, de manera numérica se ha realizado una simulación de estos mismos ensayos experimentales mediante SolidWorks y concretamente mediante la técnica numérica de elementos finitos. Esta herramienta no permite la obtención del parámetro de orden de franja de una manera directa, por lo que hay que obtener la diferencia de tensiones principales para, mediante la Ley Tenso-Óptica [4], conseguir el parámetro deseado.

La comparativa entre ambas técnicas se ha llevado a cabo a través de una serie de perfiles y valores numéricos obtenidos en cuatro probetas de geometrías distintas sometidas a ensayos estáticos de tracción o compresión. Un disco, una probeta con geometría compleja con cambio de sección, otra MT con taladro descentrado y una última rectangular con taladro centrado.

Este TFG muestra un gran nivel de concordancia entre los valores obtenidos experimentalmente y los calculados de forma teórica, por lo que se pone de manifiesto el gran potencial de ambas técnicas, demostrando que son de gran aplicabilidad en fenómenos relacionados con la mecánica de la fractura.

3.- Trabajo Futuro

Aunque los resultados hayan sido, en términos generales, satisfactorios, la técnica de fotoelasticidad, concretamente en reflexión es una técnica novedosa y en auge de la cual aún no hay demasiada información y estudios realizados, por lo que a continuación se van a enunciar algunos puntos realizados en este presente trabajo los cuales pueden ser mejorados para así conseguir unos mejores resultados y una mejora de la técnica:

- Usar revestimiento birrefringente en lugar del aerosol plateado usado en este trabajo.
- Unas probetas fabricadas de manera más rigurosa ya que para esta ocasión tanto el disco como la probeta rectangular se obtuvieron de una manera no muy precisa por el propio alumno.
- Emplear mordazas y/o soportes específicos en la máquina de ensayo que permitirían mayor precisión de montaje.
- Una fuente de luz monocromática más potente, es decir, emplear una fuente de luz de mayor intensidad que permitiera la captura de mejores imágenes en situaciones de luz más restrictivas.
- Los cálculos numéricos puede perfeccionarse mediante el empleo de software específico que permitiera mayor control de la malla lo que produciría más resolución en los concentradores de tensiones. Software específico como Abaqus o ANSYS.



ANEXO I

(Simulaciones mediante Elementos Finitos)

4.- Anexo I

Conjuntamente con la presente memoria se adjuntan los archivos, en formato .SLDPRT, de SolidWorks (versión 2016) en los que se pueden comprobar la metodología desarrollada en la simulación, de los ensayos realizados, para la aplicación de la técnica de Elementos Finitos de las distintas probetas estudiadas.

Este Trabajo Fin de Grado intenta ser lo más explícito posible a la hora de escribir las dos técnicas que engloba: Elementos finitos y fotoelasticidad en reflexión, siendo esta última una técnica empírica, es decir, una técnica aplicada en el laboratorio, y por tanto no puede ser descrita de una manera mejor que con los datos, imágenes y recursos que esta presente memoria describe. Lo cual no sucede con elementos finitos, ya que al ser una técnica numérica aplicada mediante software es posible incluir archivos que ayuden a una mejor percepción del funcionamiento y aplicación de esta técnica. Siendo esta es la principal razón de este anexo.

Los ensayos realizados fueron:

<i>Disco</i>	<i>Cambio de Sección</i>	<i>MT con Entalla</i>	<i>Rectangular con Taladro Centrado</i>
100 N	150 N	500 N	500 N
150 N	200 N	1000 N	750 N
200 N	250 N	1500 N	1000 N
250 N	300 N	2000 N	1250 N
300 N	350 N	2500 N	1500 N
	400 N	3000 N	1750 N
	450 N		2000 N

Para no hacer redundantes los ensayos adjuntados en este anexo, ya que la única diferencia entre ellos es la carga aplicada, se va a adjuntar un ensayo de cada probeta estudiada.

5.- Referencias

- [1]. <http://proyectos-fin-carrera.com/definicion-proyecto-fincarrera.html>
- [2]. Vasco Olmo, José Manuel. “Estudio de Integridad Estructural de Elementos Mecánicos Mediante Técnicas Ópticas para la Medida de Tensiones y Deformaciones”.
- [3]. Patterson Eann A. (2002). “Digital Photoelasticity: Principles, Practice and Potencial”. *Strain*, 38: 27-39.
- [4]. Ramesh K (2000). “Digital Photoelasticity. Advanced Techniques and Applications”. Springer.
- [5]. E. Patterson & P. Brailly & M. Taroni (2006). “High Frequency Quantitative Photoelasticity Applied to Jet Engine Components”. *Strain*, 46: 661–668.
- [6]. Gary Cloud (2010). “Optical Methods in Experimental Mechanics. Part 42: Photoelasticity XIV - Reflection Photoelasticity”
- [7]. “Photoelasticity”. Chapter 4.
- [8]. Frocht M. (Ed. Wiley, 1998). “Photoelasticity”. 5ª Edición.
- [9]. Vishay Measurement Group (2005). “Introduction to Stress Analysis by the PhotoStress Method”.
- [10]. López Alba, Elías & Felipe Sesé, Luis & Vasco Olmo, José Manuel & Garrido Díaz, Francisco Alberto (2013). “Aplicaciones Industriales de Técnicas Ópticas de Campo Completo para la Medida de Tensiones y Deformaciones en Elementos de Máquinas”.
- [11]. Rafael Manuel Jiménez Rodríguez (2010). “Estudio y Simulación por Elementos Finitos del Comportamiento de Discos Cerámicos”.
- [12]. M. Born & E. Wolf (7ª Edición, 1999). “Principles of Optics”. Cambridge University.
- [13]. Alejandro (2008). “Introducción al Análisis Tensional con el Método PhotoStress”.
- [14]. A. Carnicero (2001). “Introducción al Método de los Elementos Finitos”.



- [15]. “Método de Análisis por Elementos Finitos y Descripción del Software Algor (Capítulo V)”.
- [16]. Jorge Rodríguez Valdez (2006). “Determinación de los Esfuerzos en Dientes de una Rueda Tipo Catarina por los Métodos de Fotoelástico y del Elemento Finito”.
- [17]. Luis Manuel Sánchez Morales (2006). “Laboratorio de Fotoelasticidad para los Estudiantes de Ingeniería Mecánica”.
- [18]. Morimoto, Y., Morimoto, Y. Jr. and Hayashi, T. (1993). “Separation of Isochromatics and Isoclinics using Fourier Transforms and its Accuracy”. Proceedings of the SEM Spring Conference, 1149–1158.
- [19]. Siegmann P, Backman D, Patterson EA (2005). “A Robust Approach to Demodulating and Unwrapping Phase-Stepped Photoelastic Data”. Society for Experimental Mechanics, 45 (3): 278-289.
- [20]. Quan, C., Bryanston-Cross, P. J. and Judge, T. R. (1993). “Photoelasticity Stress Analysis Using Carrier Fringe and FFT Techniques”. Optics and Lasers in Engineering 18, 79–108.