



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TEMA: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO
EXPERIMENTAL PARA ANÁLISIS DE ESFUERZOS
MECÁNICOS UTILIZANDO LA MÁQUINA DE ENSAYOS
MTS, EN MATERIALES ISÓTROPAS, TRANSPARENTES Y
CONTINUOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE IMÁGENES
FOTOELÁSTICAS”**

**AUTORES: ALVEAR RUEDA, ERICK PATRICIO
HARO VALLADARES, ANGELO ALEXANDER**

DIRECTOR: ING. IBARRA JACOME, OSWALDO ALEXANDER.

MGs

SANGOLQUÍ

2016



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISIS DE ESFUERZOS MECÁNICOS UTILIZANDO LA MÁQUINA DE ENSAYOS MTS, EN MATERIALES ISÓTROPAS, TRANSPARENTES Y CONTINUOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE IMÁGENES FOTOELÁSTICAS" realizado por los señores ALVEAR RUEDA ERICK PATRICIO y HARO VALLADARES ANGELO ALEXANDER, ha sido realizado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los señores ALVEAR RUEDA ERICK PATRICIO y HARO VALLADARES ANGELO ALEXANDER para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 08 de Junio del 2016

Ing. Alexander Ibarra MGs



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA


AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, ALVEAR RUEDA ERICK PATRICIO, con cédula de identidad N° 1718773870 y HARO VALLADARES ANGELO ALEXANDER, con cédula N° 1717099921, declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISIS DE ESFUERZOS MECÁNICOS UTILIZANDO LA MÁQUINA DE ENSAYOS MTS, EN MATERIALES ISÓTROPAS, TRANSPARENTES Y CONTINUOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE IMÁGENES FOTOELÁSTICAS" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaraos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 08 de Junio del 2016


Alvear Erick
1718773870


Haro Angelo
1717099921



**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, ALVEAR RUEDA ERICK PATRICIO, con cédula de identidad N° 1718773870 y HARO VALLADARES ANGELO ALEXANDER, con cédula N° 1717099921, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISIS DE ESFUERZOS MECÁNICOS UTILIZANDO LA MÁQUINA DE ENSAYOS MTS, EN MATERIALES ISÓTROPAS, TRANSPARENTES Y CONTINUOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE IMÁGENES FOTOELÁSTICAS" cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 08 de Junio del 2016



Alvear Erick
1718773870



Haro Angelo
1717099921

DEDICATORIA

De Erick Alvear

A mis Padres que con su amor infinito me guiaron hasta este punto, mis hermanos quienes siempre fueron mi ejemplo a seguir y a un par de pequeños ángeles que unieron nuevamente a mi familia.

De Angelo Haro

A toda mi familia por brindarme su apoyo incondicional, principalmente a mis padres quienes me enseñaron que la educación es la mejor herencia, a mis hermanos y sobrino, por ser el pilar de mi fuerza y voluntad, y a mi amiga, compañera y novia Lizbeth.

AGRADECIMIENTO

A los ingenieros Alexander Ibarra y Lenin Abatta por ofrecernos la oportunidad de desarrollar este tema bajo su tutela, al Ingeniero José Pérez por su ayuda en lo referente a mecánica de materiales y por facilitarnos elementos fundamentales para el desarrollo de esta tesis, al Ingeniero Francisco Navas por instruirnos en el manejo de la máquina de ensayos MTS y la máquina de torsión Avery y a todas las personas que de alguna manera contribuyeron al desarrollo de este proyecto

Agradecimientos personales de Erick Alvear

A mis compañeros de quienes muchas veces fui alumno, a mis amigos que nunca dejaron de estar presentes y sobre todo a Sarita Jaramillo que convirtió estos 5 años en una aventura inolvidable L.U.S.E.

Agradecimientos Angelo Haro

A mis profesores, quienes me formaron no solo como profesional, sino también como persona, a mis amigos con quienes compartí momentos inolvidables.

ÍNDICE

CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Definición del problema	1
1.3. Justificación	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. General	3
1.4.2. Específicos	3
1.5. Alcance del proyecto	3
CAPÍTULO 2	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Estudio de la luz y su comportamiento	5

2.1.1. Longitud de onda y espectro visible	5
2.2. Polarización de la luz	6
2.2.1. Polarización lineal	7
2.2.2. Polarización Circular	7
2.2.3. Polariscopio.....	8
2.3. Refracción	9
2.3.1. Índice de refracción	9
2.4. Birrefringencia	10
2.5. Visión y procesamiento de imágenes.....	12
2.5.1. Visión por computador	13
2.5.2. Procesamiento digital de imágenes.....	13
2.5.3. Tipos de imágenes para el procesamiento digital	13
2.6. Fotoelasticidad	15
2.6.1. Teoría Fotoelástica.....	16
2.6.2. Ventajas y desventajas de análisis fotoelastico.....	18
2.6.3. Características del material fotoelástico	19
2.6.4. Análisis de franjas fotoelásticas	20
2.6.5. Identificación de las Franjas	21
2.6.6. La fotoelasticidad y el procesamiento digital de imágenes.....	22
2.7. Comportamiento mecánico de los materiales.....	22
2.7.1. Tipos de cargas.....	23
2.7.2. Máquina universal de ensayos MTS TK/T5002.....	26
2.7.3. Tensiones Residuales	29
2.8. Característica del material fotoelástico.....	29
2.9. Análisis de elementos finitos	30
2.9.1. Geometría del elemento	32

2.10. Software CAE.....	33
CAPÍTULO 3	35
DISEÑO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DEL EQUIPO	35
3.1. Introducción.....	35
3.2. Selección de material para equipo mecánico	35
3.3. Selección del diseño para el equipo mecánico.....	36
3.3.1. Diseño 1 del equipo mecánico	37
3.3.2. Diseño 2 del equipo mecánico	37
3.3.3. Diseño 3 del equipo mecánico	38
3.4. Selección del material fotoelástico	42
3.5. Selección de la cámara de video.....	43
3.6. Paneles polarizados	44
3.7. Selección de la fuente de luz.....	45
3.8. Acondicionamiento de la celda de carga.....	46
3.9. Diseño e implementación del Software	46
3.9.1. Diagramas de flujo	47
3.10. Diseño y construcción de probetas	53
CAPÍTULO 4.....	55
PRUEBAS Y RESULTADOS	55
4.1. Análisis teórico	55
4.1.1. Ensayo de tracción.....	55
4.1.2. Ensayo de compresión	57
4.1.3. Ensayo de flexión	59
4.1.4. Ensayo de torsión.....	62
4.2. Montaje y parámetros de los ensayos fotoelásticos	63

4.2.1	Ensayo de Fotoelasticidad	63
4.2.2	Ensayo de tracción	64
4.2.3	Ensayo de compresión	64
4.2.4	Ensayo de flexión	65
4.2.5	Ensayo de torsión.....	66
4.3.	Cálculo de elemento finito	67
4.4.	Resultados de pruebas a tracción	71
4.4.1	Probeta 1	71
4.4.2	Probeta 2.....	73
4.4.3	Probeta 3.....	74
4.4.4	Probeta 4.....	76
4.4.5	Probeta 5.....	77
4.4.6	Probeta 6.....	79
4.5.	Resultados de pruebas a compresión	81
4.5.1	Probeta 1	81
4.5.2	Probeta 2.....	82
4.6.	Resultados de pruebas a flexión	83
4.6.1	Probeta 1	83
4.6.2	Probeta 2.....	85
4.7.	Resultados de pruebas a torsión.....	87
4.7.1	Probeta 1	87
4.7.2	Probeta 2.....	88
4.8.	Análisis de resultados	90
4.8.1	Distribución de esfuerzos tracción.....	90
4.8.2	Distribución de esfuerzos compresión.....	95
4.8.3	Distribución de esfuerzos flexión.....	97

4.8.4	Distribución de esfuerzos torsión	99
4.9.	Esfuerzos Aproximados.....	99
4.9.1	Ensayo de tracción.....	100
4.9.2	Ensayo de compresión	101
4.9.3	Ensayo de flexión	101
4.9.4	Ensayo de torsión.....	102
CAPÍTULO 5	.....	103
ANÁLISIS DE COSTOS	.....	103
5.1.	Costos Directos	103
5.1.1	Costo de materia prima	103
5.1.2	Costos mano de obra directa	104
5.2.	Costos Indirectos.....	104
5.3.	Costo total	105
5.4.	Equipos similares del mercado.....	105
CAPÍTULO 6	.....	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	108
6.1.	Conclusiones.....	108
6.2.	Recomendaciones.....	109
CAPÍTULO 7	.....	110
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Evaluación de material	36
Tabla 2: Tabla de selección del diseño mecánico	40
Tabla 3: Selección material fotoelástico	42
Tabla 4: Características principales cámara de video	44
Tabla 5: Temperatura en la probeta	45
Tabla 6: Selección fuente luminosa.....	46
Tabla 7: Características del acrílico.....	53
Tabla 8: Resultados análisis teórico probeta 1 tracción	56
Tabla 9: Resultados análisis teórico probeta 2 tracción	56
Tabla 10: Resultados análisis teórico probeta 3 tracción	56
Tabla 11: Resultados análisis teórico probeta 4 tracción	57
Tabla 12: Resultados análisis teórico probeta 5 tracción	57
Tabla 13: Resultados análisis teórico probeta 6 tracción	57
Tabla 14: Resultados análisis teórico probeta 1 compresión	58
Tabla 15: Resultados análisis teórico probeta 2 compresión	58
Tabla 16: Resultados análisis teórico probeta 1 flexión.....	61
Tabla 17: Resultados análisis teórico probeta 1 flexión.....	62
Tabla 18: <i>Parámetros primera carga probeta 1 tracción</i>	71
Tabla 19: Parámetros segunda carga probeta 1 tracción.....	71
Tabla 20: Parámetros primera carga probeta 2 tracción	73
Tabla 21: Parámetros segunda carga probeta 2 tracción.....	73
Tabla 22: Parámetros primera carga probeta 3 tracción	74
Tabla 23: Parámetros segunda carga probeta 3 tracción.....	75
Tabla 24: Parámetros primera carga probeta 4 tracción	76
Tabla 25: Parámetros segunda carga probeta 4 tracción.....	76
Tabla 26: Parámetros primera carga probeta 5 tracción	77
Tabla 27: Parámetros segunda carga probeta 5 tracción.....	78
Tabla 28: Parámetros primera carga probeta 6 tracción	79
Tabla 29: Parámetros segunda carga probeta 6 tracción.....	80

Tabla 30: Parámetros primera carga probeta 1 compresión	81
Tabla 31: Parámetros segunda carga probeta 1 compresión	81
Tabla 32: Parámetros primera carga probeta 2 compresión	82
Tabla 33: Parámetros segunda carga probeta 2 compresión	83
Tabla 34: Parámetros primera carga probeta 1 flexión.....	84
Tabla 35: Parámetros segunda carga probeta 1 flexión	84
Tabla 36: Parámetros primera carga probeta 2 flexión.....	85
<i>Tabla 37:</i> Parámetros segunda carga probeta 2 flexión	86
<i>Tabla 38:</i> Parámetros segunda carga probeta 1 torsión.....	87
Tabla 39: Parámetros segunda carga probeta 1 torsión.....	87
Tabla 40: Parámetros primera carga probeta 2 torsión	88
Tabla 41: Parámetros primera carga probeta 2 torsión	89
Tabla 42: Comparación de resultados a tracción Fotoelasticidad vs Simulación	100
Tabla 43: Comparación de resultados a tracción Fotoelasticidad vs Análisis teórico.....	100
Tabla 44: Comparación fotoelasticidad vs simulación.	101
Tabla 45: Comparación fotoelasticidad vs análisis teórico	101
Tabla 46: Comparación fotoelasticidad vs análisis teórico	101
Tabla 47: Comparación fotoelasticidad vs análisis teórico	101
Tabla 48: Costos materia prima.....	103
Tabla 49: Costo mano de obra directa	104
Tabla 50: Costo mano de obra indirecta.....	104
Tabla 51: Costos operativos	105
Tabla 52: Costos totales	105
Tabla 53: Comparación de costos	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Espectro de luz.....	6
Figura 2 Luz sin polarizar	6
Figura 3 Polarización lineal	7

Figura 4 Luz mediante doble filtración.....	7
Figura 5 Polarización Circular.....	8
Figura 6 Polariscopio.....	8
Figura 7 Refracción	9
Figura 8 Onda electromagnética	10
Figura 9 Imagen RGB.....	14
Figura 10 Imagen Binarizada.....	15
Figura 11 Imagen escala de grises.....	15
Figura 12 Imagen Fotoelástica a tracción.....	20
Figura 13 Imagen fotoelástica de una probeta sometida.....	21
Figura 14 Tabla factor de franja ASTM D-4093	22
Figura 15 Probeta a tensión Fuente (Beer, 2010)	23
Figura 16 Curva esfuerzo vs deformación.....	24
Figura 17 Probeta a compresión Fuente (Beer, 2010)	25
Figura 18 Probeta a torsión Fuente (Hibbeler, 2011)	25
Figura 19 Probeta a flexión Fuente (Beer, 2010).....	26
Figura 20 Máquina de ensayos MTS.....	27
Figura 21 Mordaza de sujeción para	28
Figura 22 Apoyos y carga puntual	28
Figura 23 Máquina de torsión marca Avery	29
Figura 24 Geometría del elemento (Shigley, 2008, p 937)	33
Figura 25 Simulación CAE	34
Figura 26 Diseño propuesto 1	37
Figura 27 Diseño propuesto 2	38
Figura 28 Gabinete con cámara de video.....	38
Figura 29 Guías de la cámara de video.....	39
Figura 30 Gabinete con fuente de luz.....	40
Figura 31 MTS con gabinete frontal	40
Figura 32 Guías de cámara implementadas.....	41
Figura 33 Equipo polarizador implementado	41
Figura 34 Equipo analizador.....	41
Figura 35 Equipo polarizador y analizador	42

Figura 36 Filtros polarizadores	44
Figura 37 HMI Fotoelasticidad.....	47
Figura 38 Diagrama de flujo, declaración de variables.....	48
Figura 39 Diagrama de flujo encender cámara.....	48
Figura 40 Diagrama de flujo capturar imagen	49
Figura 41 Diagrama de flujo zoom.....	50
Figura 42 Diagrama de flujo guardar imagen	50
Figura 43 Diagrama de flujo evaluar punto.....	51
Figura 44 Diagrama de flujo reconocer color.....	53
Figura 45 Modelo de probetas.....	54
Figura 46 Círculo de Morh tracción pura	56
Figura 47 Círculo de Morh compresión.....	58
Figura 48 Círculo de Morh flector puro	59
Figura 49 Representación gráfica ensayo a flexión.....	60
Figura 50 Diagramas fuerza cortante y momento flector	60
Figura 51 Representación gráfica ensayo a flexión.....	60
Figura 52 Diagramas fuerza cortante y momento flector	61
Figura 53 Representación gráfica ensayo a flexión.....	61
Figura 54 Diagramas fuerza cortante y momento flector	61
Figura 55 Diagramas fuerza cortante y momento flector	62
Figura 56 Montaje ensayo tracción.....	64
Figura 57 Montaje ensayo compresión.....	65
Figura 58 Montaje ensayo flexión.....	66
Figura 59 Montaje ensayo torsión	66
Figura 60 Elemento finito.....	67
Figura 61 Deformación elemento finito	70
Figura 62 Probeta 1 tracción a 300 N.....	71
Figura 63 Probeta 1 tracción a 550N.....	72
Figura 64 Simulación probeta 1 tracción 300N y 550N	72
Figura 65 Probeta 2 tracción a 300N.....	73
Figura 66 Probeta 2 tracción a 900 N.....	73
Figura 67 Simulación probeta 2 tracción a 900N.....	74

Figura 68 Probeta 3 tracción a 400N.....	74
Figura 69 Probeta 3 a 750N	75
Figura 70 Simulación probeta 3 tracción a 400N y 750N	75
Figura 71 Probeta 4 tracción a 800 N.....	76
Figura 72 Probeta 4 tracción a 900N.....	76
Figura 73 Simulación Probeta 4 tracción a 800N y 900N	77
Figura 74 probeta 5 tracción a 800N	77
Figura 75 Zoom probeta 5 tracción a 800N	78
Figura 76 Probeta 6 tracción a 1100N.....	78
Figura 77 Simulación probeta 5 tracción a 1100N.....	79
Figura 78 Probeta 6 tracción a 900N.....	79
Figura 79 Probeta 6 tracción a 1100N.....	80
Figura 80:Simulación probeta 6 tracción a 900N y 1100N	80
Figura 81 Probeta 1 compresión a 300N.....	81
Figura 82 Probeta 1 compresión a 800N.....	81
Figura 83 Simulación probeta 1 compresión a 300N y 800N	82
Figura 84 Probeta 2 compresión a 300N.....	82
Figura 85 Probeta 2 compresión a 500N.....	83
Figura 86 Simulación probeta 1 compresión a 300N y 500N	83
Figura 87 Probeta 1 flexión a 400N	84
Figura 88 Probeta 1 flexión a 500N.....	84
Figura 89 Simulación probeta 1 flexión a 500N.....	85
Figura 90 Probeta 2 flexión a 600N	85
Figura 91 Probeta 2 flexión a 700N	86
Figura 92 Simulación probeta 2 flexión	86
Figura 93 Probeta 1 torsión a 2000Nmm.....	87
Figura 94 Probeta 1 torsión a 4000Nmm.....	88
Figura 95 Simulaciones probeta 1 torsión	88
Figura 96 Probeta 2 torsión a 2000Nmm.....	89
Figura 97 Probeta 2 torsión a 4000Nmm.....	89
Figura 98 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación.....	91
Figura 99 Probeta 2 fotoelasticidad vs simulación.....	91

Figura 100 Probeta 3 fotoelasticidad vs simulación.....	92
Figura 101 Probeta 4 fotoelasticidad vs simulación.....	93
Figura 102 Probeta 5 fotoelasticidad vs simulación.....	94
Figura 103 Probeta 5 fotoelasticidad vs simulación.....	95
Figura 104 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación.....	95
Figura 105 Probeta 2 fotoelasticidad vs simulación.....	96
Figura 106 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación.....	97
Figura 107 Probeta 2 fotoelasticidad vs simulación.....	98
Figura 108 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación.....	99
Figura 109 Probeta 2 fotoelasticidad vs simulación.....	99
Figura 110 Equipo fotoelástico marca edibo.	106

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	9
Ecuación 2.....	10
Ecuación 3.....	10
Ecuación 4.....	11
Ecuación 5.....	11
Ecuación 6.....	11
Ecuación 7.....	12
Ecuación 8.....	12
Ecuación 9.....	16
Ecuación 10.....	16
Ecuación 11.....	17
Ecuación 12.....	17
Ecuación 13.....	17
Ecuación 14.....	17
Ecuación 15.....	17
Ecuación 16.....	23
Ecuación 17.....	45
Ecuación 18.....	55
Ecuación 19.....	57

Ecuación 20.....	68
Ecuación 21.....	69

RESUMEN

La fotoelasticidad es un fenómeno producido en ciertos materiales los cuales varían sus propiedades ópticas cuando se someten a esfuerzos mecánicos, este fenómeno es visible al exponer estos materiales a una fuente de luz polarizada dando como resultado la formación de franjas de colores las cuales representan un determinado nivel de esfuerzos, dichas franjas nunca se cruzan ni se mezclan y siguen siempre la misma secuencia.

En este trabajo se presenta a la fotoelasticidad como un método experimental para el análisis de esfuerzos en materiales isótropos y transparentes; mediante la construcción de un equipo experimental, el diseño de un software y el procesamiento digital de imágenes se consiguió obtener las imágenes fotoelásticas de la distribución de esfuerzos, la carga aplicada a las probetas y un valor aproximado de esfuerzos en un punto específico; además utilizando la máquina universal de ensayos MTS se analizaron en ensayos de tracción, compresión, flexión y torsión 12 probetas de acrílico diseñadas y construidas con diferentes concentradores de esfuerzos, finalmente se compararon los resultados obtenidos mediante fotoelasticidad con los análisis teóricos y simulación en software CAE el cual está basado en el método de análisis de elementos finitos.

Palabras Clave:

FOTOELASTICIDAD

BIRREFRINGENCIA

POLARIZACIÓN DE LUZ,

ESFUERZOS MECÁNICOS

ABSTRACT

Photoelasticity is a phenomenon produced on certain materials which vary its optical properties when they are under mechanical stress, this phenomenon become visible when the material is exposed to polarized light resulting in the formation of colored strips which represent a particular level of mechanical stress, this strips never mix or cross between themselves and always follow the same sequence.

In this thesis photoelasticity is presented as an experimental method for mechanical stress analysis in isotropic and transparent materials; trough the construction of an equipment, the design of a software and digital image processing, photoelastic images of the stress distribution, the load applied and an approximate value of mechanical stress were obtained, also using the universal tests machine MTS twelve acrylic specimens were analysed on traction, compression, bending and torsion, finally the photoelasticity results were compared with the ones obtained with theoretical analysis and software simulation which is based on the method of finite element analysis.

Keywords:

PHOTOELASTICITY

BIREFRINGENCE

POLARIZED LIGHT

MECHANICAL STRESS

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Introducción

El laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, brinda a los estudiantes las herramientas necesarias para complementar sus estudios teóricos de una manera práctica mediante el desarrollo de diversos ensayos destructivos y no destructivos que pueden ser: ensayo de tracción, compresión, flexión, torsión, fatiga, etc. Una de las máquinas utilizadas en el laboratorio es la máquina universal de ensayos MTS en donde se pueden realizar las pruebas antes mencionadas.

En el mundo actual se están dando grandes avances tecnológicos con la implementación de sistemas electrónicos e informáticos, por lo que los métodos tradicionales de análisis de materiales son cada vez menos utilizados debido a que están expuestos a errores no controlados causados por la manipulación directa con el laboratorista. Por lo que se ha propuesto la implementación de un nuevo ensayo para el laboratorio de Mecánica de Materiales que consiste en el análisis de la distribución de esfuerzos mediante la técnica experimental de la fotoelasticidad.

El ensayo de fotoelasticidad consiste en aprovechar el fenómeno que se produce cuando un rayo de luz polarizada viaja a través de un material transparente, generando una variación de colores de acuerdo al esfuerzo al que es sometido cada segmento del material.

Mediante el análisis de las imágenes fotoelásticas y técnicas de procesamiento de imágenes se puede realizar la interpretación de esfuerzos de acuerdo a los colores generados en el material, obteniendo de esta manera un método experimental moderno de análisis de distribución de esfuerzos en materiales transparentes.

1.2. Definición del problema

En la actualidad en el laboratorio de mecánica de materiales los ensayos realizados son los tradicionales, los cuales siempre han brindado buenos

resultados y han complementado satisfactoriamente los estudios teóricos revisados en clase, sin embargo la tecnología utilizada no es de las más actuales, por lo que para mantener el nivel de competitividad de la universidad, es necesario la implementación de métodos actuales como es el análisis no destructivo de esfuerzos mediante la fotoelasticidad en el laboratorio de mecánica de materiales.

1.3. Justificación

La importancia de este trabajo consiste en desarrollar un equipo que permita describir cualitativamente los esfuerzos inducidos en un elemento mecánico utilizando un método no tradicional como es el análisis fotoelástico. La ventaja que presenta este método frente al análisis teórico es la facilidad con la que se pueden analizar las zonas críticas de piezas con geometrías complejas, en comparación con un análisis teórico matemático.

Las técnicas de análisis experimental de esfuerzos se aplican extensamente en el establecimiento de criterios de diseño, mejoramiento de la confiabilidad de un producto, o en la reducción del peso y el costo de los mismos, características que deben aprender los estudiantes de ingeniería mecánica y mecatrónica en el diseño de elementos a lo largo de su formación académica para poder implementar este conocimiento en el ámbito laboral.

Esto va de la mano con uno de los principales pilares del actual gobierno de la República del Ecuador que se centra en el cambio de la matriz productiva del país la cual es uno de los objetivos del plan de desarrollo del buen vivir, (objetivo 10), enfocado en impulsar la transformación de la matriz productiva donde se cita textualmente " La transformación de la matriz productiva supone una interacción con la frontera científico-técnica, en la que se producen cambios estructurales que direccionan las formas tradicionales del proceso y la estructura productiva actual, hacia nuevas formas de producir que promueven la diversificación productiva en nuevos sectores ...".

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Diseñar y construir un equipo que permita realizar ensayos de fotoelasticidad utilizando la máquina de ensayos MTS, mediante técnicas de análisis de imágenes por computador, interpretar de manera cualitativa los esfuerzos a los que está sometida la pieza analizada y compararlos con resultados obtenidos mediante simulación y análisis teórico.

1.4.2. Específicos

- Diseñar y construir la estructura capaz de acoplarse a la máquina de ensayos MTS que albergará los paneles polarizados, cámara de video, y la fuente de luz fija.
- Acondicionar e implementar la celda de carga.
- Diseñar un software para la adquisición de imágenes e interpretación cualitativa de esfuerzos existentes en la pieza analizada.
- Diseño y construcción de 12 probetas.
- Realizar los ensayos fotoelástico de las probetas.
- Realizar el estudio estático de esfuerzos mediante software de simulación CAE de las probetas diseñadas.
- Comparar los resultados obtenidos en el ensayo fotoelástico con los resultados de la simulación y los resultados teóricos – prácticos.

1.5. Alcance del proyecto

El proyecto de grado propuesto tendrá en el siguiente alcance:

- Software de análisis y adquisición de datos HMI (interpretación de datos, carga aplicada, imágenes fotoelásticas).
- Cámara de visión (Estructura que albergue los paneles polarizados y la cámara de video).
- Análisis fotoelástico de 10 probetas del polímero con distintos concentradores de esfuerzos, para los ensayos de tracción, compresión y flexión.

- Análisis fotoelástico de 2 probetas para el ensayo de torsión.
- Análisis por software de las 12 probetas.
- Planos del proyecto.
- Manual de funcionamiento del equipo.
- Información del desarrollo del proyecto de investigación en digital e impreso.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Estudio de la luz y su comportamiento

El estudio de la luz siempre ha sido uno de los fenómenos de interés para la humanidad, desde el año 300 A.C con el trabajo de Euclides sobre los principios de la óptica, pasando por Isaac Newton con sus aportaciones sobre el estudio de la luz. Posteriormente con los estudios de James Clerk Maxwell y Heinrich Hertz se demuestra que se puede suponer a la luz como una onda electromagnética que posee componentes eléctricas y magnéticas que se propagan en el espacio y el tiempo, dando como vector de campo eléctrico a la ecuación $E = A \cos(k.x.\omega.t)$, que es ortogonal a la dirección de propagación, donde:

- $A = \textit{Amplitud}$
- $\omega = \textit{Pulsación}$
- $k = \textit{Número de ondas}$
- $t = \textit{Tiempo}$

Una de los estudios más importantes para este trabajo es la denominada teoría ondulatoria, en la cual se demostró que, en un espectro la longitud de onda está relacionada con el color que se observa.

2.1.1. Longitud de onda y espectro visible

Se conoce como longitud de onda a la distancia que existe en una onda en un determinado tiempo; el espectro visible es la región donde el ojo humano es capaz de percibir el espectro electromagnético, esta región de longitud de onda está comprendida usualmente entre 390 y 750 nm

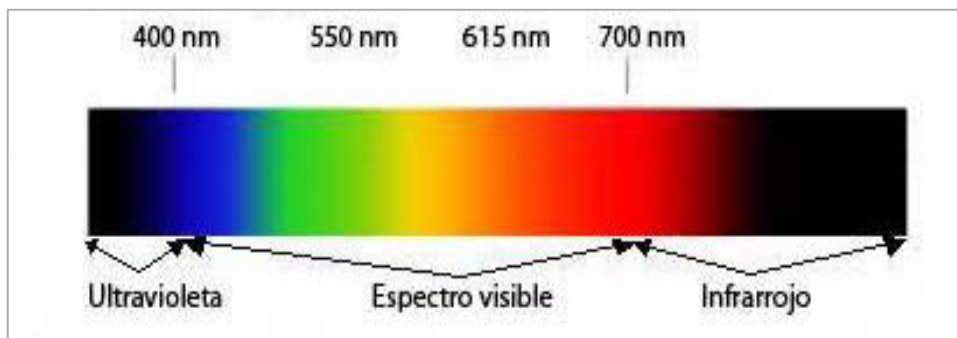


Figura 1 Espectro de luz

2.2. Polarización de la luz

Como se mencionó, la luz se puede tratar como un conjunto de ondas electromagnéticas (con componente eléctrico y componente magnético en planos ortogonales) las cuales se propagan en todas las direcciones. En un haz de luz las ondas electromagnéticas oscilan en direcciones ortogonales al eje de propagación como se muestra en la siguiente imagen.

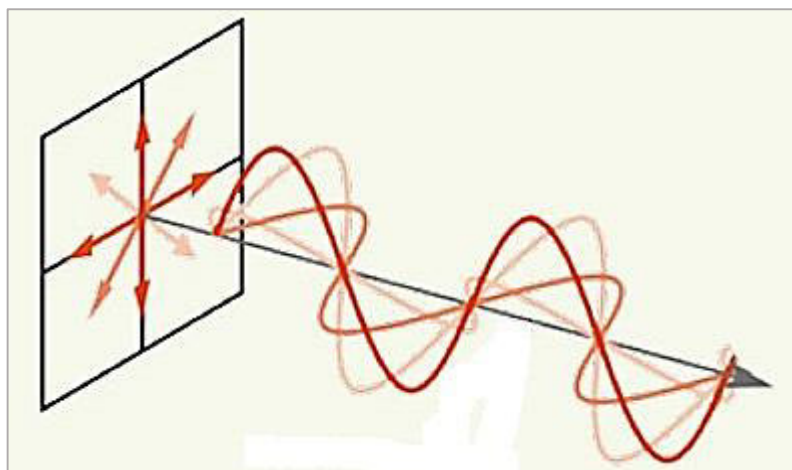


Figura 2 Luz sin polarizar

La polarización de la luz consiste en filtrar este haz de luz de tal modo que al atravesar este filtro (llamado polarizador) se obtenga un haz con características específicas, existen varios tipos de polarización entre los cuales los más conocidos se encuentran la polarización lineal y la polarización circular.

2.2.1. Polarización lineal

Es el método más sencillo de polarización, su funcionamiento consiste en hacer pasar la luz a través de un polarizador lineal obteniéndose así un haz de luz polarizado linealmente, es decir que oscila en una sola dirección ortogonal al eje de desplazamiento

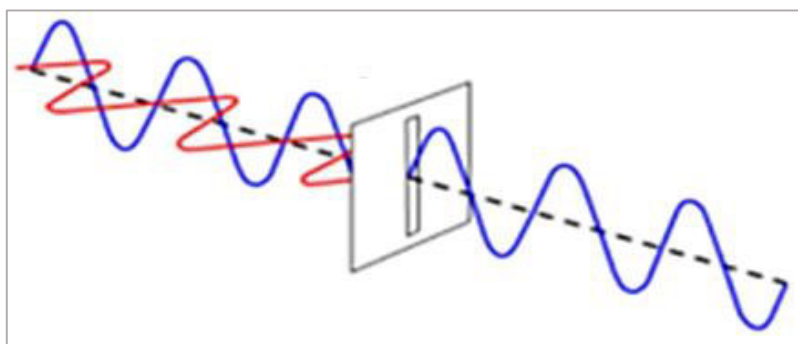


Figura 3 Polarización lineal

La característica principal de este tipo de polarización es que si colocamos otro polarizador llamado normalmente (Analizador), la luz que atraviesa este segundo polarizador varía linealmente según el ángulo de su eje de polarización.

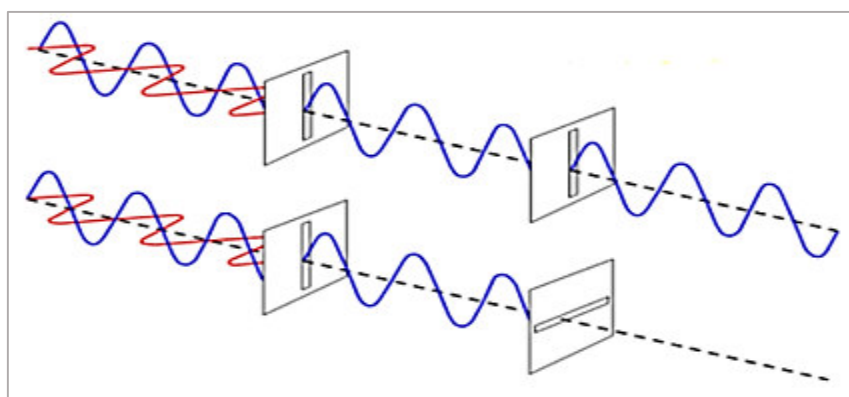


Figura 4 Luz mediante doble filtración

2.2.2. Polarización Circular

Es una variante de la polarización lineal, en donde después de que el haz de luz atraviesa el polarizador lineal, se la hace pasar a través de una lámina

de cuarto de onda, la cual tiene la propiedad de desfasar la componente magnética de la eléctrica provocando así la polarización circular.

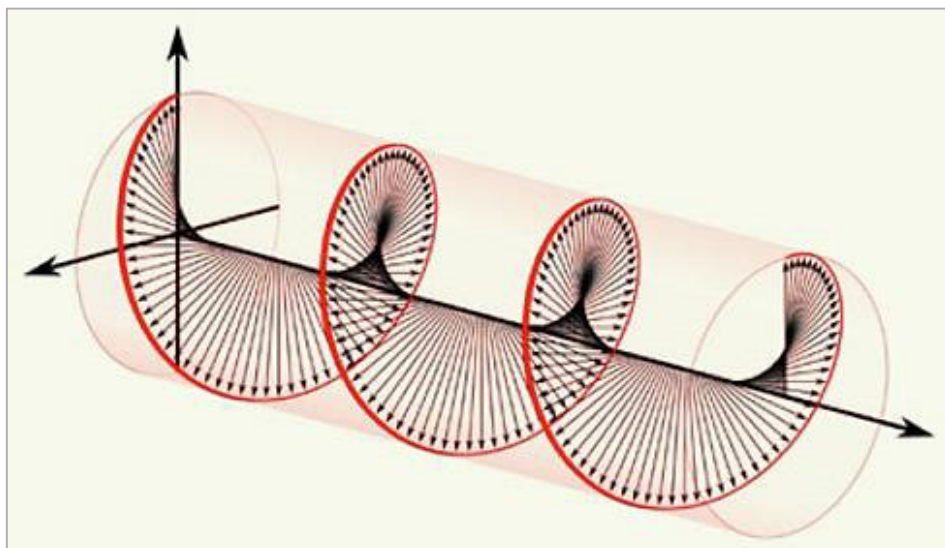


Figura 5 Polarización Circular

2.2.3. Polariscopio

Se conoce como polariscopio al equipo conformado por una fuente de luz, un polarizador, un analizador y en ocasiones también por láminas de cuarto de onda, es utilizado principalmente en laboratorios para realizar análisis de fotoelasticidad entre otros estudios.

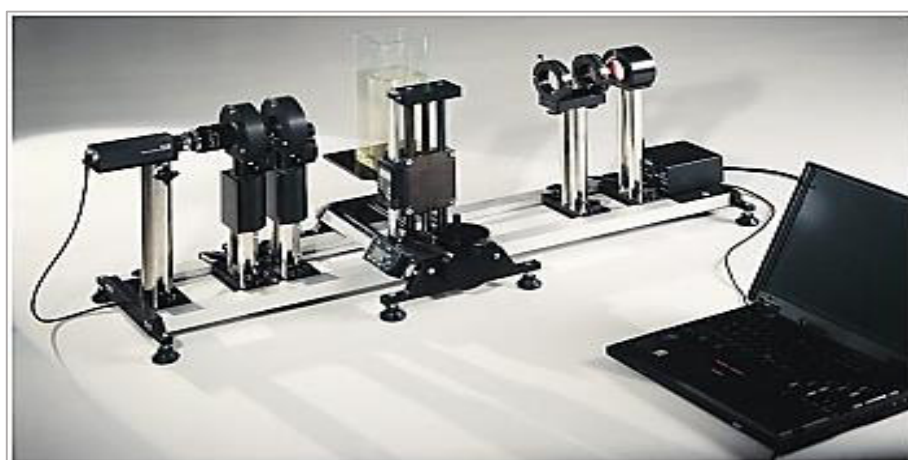


Figura 6 Polariscopio

2.3. Refracción

En la física se conoce a la refracción al cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro, la refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda. Este fenómeno se representa matemáticamente a través de la ley de Snell en la cual se afirma que la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es igual a la razón entre la velocidad de la onda en el primer medio y la velocidad de la onda en el segundo medio.

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2 \quad \text{Ecuación 1}$$

- n_1 = Índice de refracción del primer medio.
- θ_1 = Ángulo de incidencia.
- n_2 = Índice de refracción del segundo medio.
- θ_2 = Ángulo de refracción.

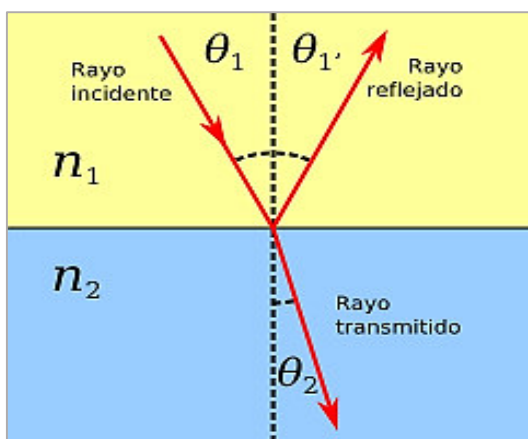


Figura 7 Refracción

2.3.1. Índice de refracción

Índice de refracción se define como la razón que existe entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un medio.

$$n = \frac{c}{v}$$

Ecuación 2

- $n =$ Índice Refracción
- $c =$ Velocidad de luz en el vacío
- $v =$ Velocidad de la luz en el medio

2.4. Birrefringencia

La birrefringencia o también doble refracción es una propiedad que poseen ciertos materiales como la calcita, que al ser atravesada por un haz de luz, ésta se descompone en dos rayos linealmente polarizados y ortogonales entre sí que se propagan a diferentes velocidades, además de producirse un desfase entre la componente eléctrica de ambas.

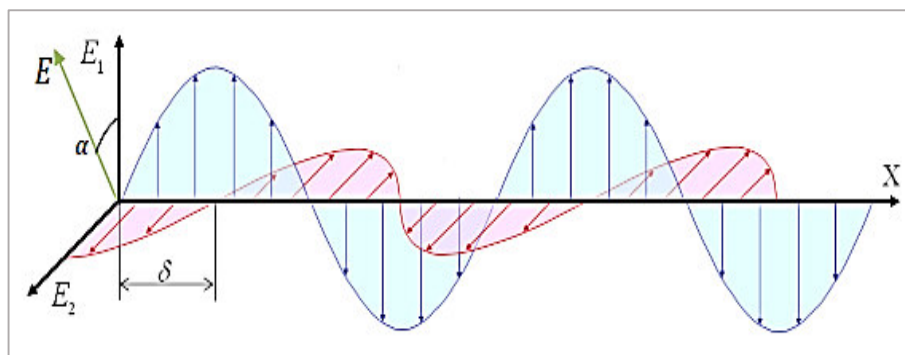


Figura 8 Onda electromagnética

Si tenemos un modelo de material birrefringente de espesor e , la onda que viaja según el eje E_1 , tardará un tiempo t_1 y la onda que viaja según el eje E_2 tardará un tiempo t_2 en recorrer dicho espesor.

$$t_1 = \frac{e}{v_1} ; t_2 = \frac{e}{v_2}$$

Ecuación 3

- $t =$ Tiempo.
- $e =$ Espesor.
- $v =$ Velocidad de la luz en el medio.

Si el medio fuera el vacío, la ecuación sería:

Ecuación 4

$$ct_1 = c \frac{e}{v_1} ; ct_2 = c \frac{e}{v_2}$$

- $t = \text{Tiempo.}$
- $e = \text{Espesor.}$
- $v = \text{Velocidad de la luz en el medio.}$
- $c = \text{Velocidad de la luz en el vacío.}$

Comparando los desplazamientos en el material y en el vacío, existirá un retraso longitudinal dado por el espesor.

$$\delta_1 = ct_1 - e = c \left(\frac{e}{v_1} \right) - e$$

$$\delta_2 = ct_2 - e = c \left(\frac{e}{v_2} \right) - e$$

Ecuación 5

- $\delta = \text{Retrazo longitudinal.}$
- $t = \text{Tiempo.}$
- $e = \text{Espesor.}$
- $v = \text{Velocidad de la luz en el medio..}$
- $c = \text{Velocidad de la luz en el vacío.}$

Utilizando la *ecuación 2* de la refracción, podemos reemplazarla en las expresiones anteriores, tomando en cuenta que el índice de refracción en el vacío es unitario, ya que la velocidad del medio es la velocidad de la luz. Esto nos da como resultado:

$$\delta_1 = ct_1 - e = c \left(\frac{e}{v_1} \right) - e = e(n_1 - n)$$

$$\delta_2 = ct_2 - e = c \left(\frac{e}{v_2} \right) - e = e(n_2 - n)$$

Ecuación 6

- $\delta = \text{Retrazo longitudinal.}$
- $t = \text{Tiempo.}$

- $e = \text{Espesor.}$
- $v = \text{Velocidad de la luz en el medio.}$
- $c = \text{Velocidad de la luz en el vacío.}$
- $n = \text{Índice de refracción.}$

El retraso relativo (desfase) entre las dos será:

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = \left(\frac{c \cdot e}{v_2}\right) - \left(\frac{c \cdot e}{v_1}\right) = e(n_2 - n_1) \quad \text{Ecuación 7}$$

- $\delta = \text{Retrazo longitudinal.}$
- $t = \text{Tiempo.}$
- $e = \text{Espesor.}$
- $v = \text{Velocidad de la luz en el medio.}$
- $c = \text{Velocidad de la luz en el vacío.}$
- $n = \text{Índice de refracción.}$

Utilizando las relaciones existentes entre el movimiento sinusoidal y el circular obtenemos la expresión en función del desplazamiento angular.

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} e(n_2 - n_1) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- $\lambda = \text{Longitud de onda}$
- $\varphi = \text{Ángulo de desfase entre las componentes eléctricas, causado por la birrefringencia del medio}$

2.5. Visión y procesamiento de imágenes

La visión puede ser considerada como un proceso que permite a una persona obtener gran cantidad de información del ambiente, la cual a la vez ayuda a este a desenvolverse ya sea en la navegación o bien en la realización de tareas. El que este proceso se intente resolver de forma automática mediante computadoras, formula una de las tareas de investigación y desarrollo de mayor inversión en los últimos años.

2.5.1. Visión por computador

Erik Cuevas define a la visión por computadora como:

Todo intento enfocado al desarrollo de algoritmos que traten de lograr que una máquina simule hasta cierto grado el proceso de visión biológico. Un sistema de visión y procesamiento de imagen se compone de una serie de subsistemas que operan sobre una escena con el objetivo de interpretar alguna característica notable. Los subsistemas se dividen en nivel bajo, nivel medio y nivel alto.

En el bajo nivel, se encuentran procesos que se realizan sobre imágenes correspondientes de suavizado, umbralización, eliminación de ruidos, definición de bordes, etc. Los procesos que se desarrollan en esta etapa de procesamiento suelen conocerse en la comunidad de visión como pre-procesamiento. En el nivel medio, se definen procesos tales como la definición de límites y extracción de características. En el alto nivel se establecen relaciones semánticas entre los objetos de la descripción de la escena. (p.45)

2.5.2. Procesamiento digital de imágenes

Hasta hace poco tiempo el procesamiento digital de imágenes y la visión artificial eran herramientas poco utilizadas, esto debido a su alto costo de implementación y lo poco desarrollado que se encontraba el estudio de este tipo de sistemas. Hoy en día es más común encontrarse con este tipo de sistemas, ya que con el avance de la tecnología y la globalización del conocimiento, se ha reducido el costo de los equipos utilizados, el tiempo de implementación y se ha desarrollado software especializado que hace posible su aplicación sin necesidad de ser un experto en un lenguaje de programación específico. Aplicaciones de estos sistemas los podemos encontrar en sistemas de manufactura, control de calidad e incluso navegación de robots que simulan la visión humana.

2.5.3. Tipos de imágenes para el procesamiento digital

El equipo principal para el procesamiento digital de imágenes es una cámara digital, la cual transforma la imagen captada por la lente en una señal digital la cual puede ser procesada. Comúnmente una imagen digital está representada por un conjunto de matrices en donde cada elemento representa

un pixel de la imagen. Los principales tipos de imágenes utilizados para el procesamiento digital son los siguientes:

- **Imágenes de color RGB**

Una imagen de color RGB de sus siglas en ingles Red, Green, Blue (Rojo, Verde, Azul), esta digitalmente conformada por tres matrices las cuales representan el valor de intensidad de cada color en cada uno de los pixeles de la imagen.

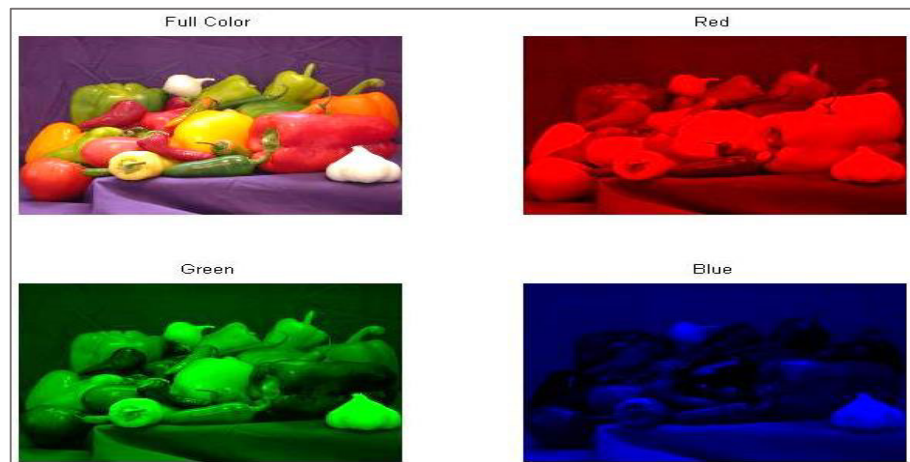


Figura 9 Imagen RGB

- **Imágenes binarias**

Una imagen binaria se representa con una matriz en donde solo existen dos valores posibles para cada pixel, el cero que representa el color negro y el uno el color blanco, hay que tener en cuenta que estos valores no son numéricos, sino lógicos.



Figura 10 Imagen Binarizada

- **Imágenes de intensidad o escala de grises.**

Una imagen a escala de grises está representada por una matriz en donde a cada pixel de una imagen a color, se le ha escalado a un valor equivalente en escala de gris que usualmente va de $[0, 255]$ en donde el valor más bajo representa el color negro el cual se degrada hasta llegar a su valor máximo representado por el color blanco.



Figura 11 Imagen escala de grises.

2.6. Fotoelasticidad

La fotoelasticidad es un método experimental utilizado para el análisis de esfuerzos, que utiliza las propiedades de la luz polarizada y la birrefringencia que presentan los materiales fotoelásticos cuando se someten a esfuerzos que se encuentran dentro del intervalo elástico de los materiales; los materiales como las resinas epóxicas, poliéster, poliuretanos son materiales

comúnmente utilizados para el diseño de probetas o modelos a escala en el estudio fotoelástico.

Al hacer pasar un rayo de luz polarizada a través de materiales transparentes sometidos a esfuerzos y visualizar este material por medio de un analizador (polarizador), el resultado es una gama de colores los cuales varían según las tensiones presentes en el cuerpo, estos colores pueden ser interpretados utilizando la teoría fotoelástica.

2.6.1. Teoría Fotoelástica

La teoría fotoelástica se encuentra fundamentada en la investigación de David Brewster quien descubrió la birrefringencia temporal y estableció que el cambio en el índice de refracción de un material es proporcional a la diferencia de las deformaciones principales, esta relación está dada por la siguiente expresión matemática:

$$n_1 - n_2 = K(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- K = Factor de proporcionalidad dependiente del material, del espesor del modelo y de la longitud de onda de la luz empleada
- n_1, n_2 = *índices de refracción en dirección 1 y 2 (misma dirección que los esfuerzos principales).*
- σ_1, σ_2 = *esfuerzos principales.*

Utilizando las ecuaciones de la birrefringencia y la relación propuesta por Brewster obtenemos una expresión de la siguiente manera.

$$\delta = e \cdot K(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Ecuación 10}$$

- δ = *Retrazo longitudinal.*
- e = *Espesor.*
- K = *Constante proporcional.*
- σ_1, σ_2 = *Esfuerzos principales.*

Realizando un cambio a unidades angulares:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) e \cdot K(\sigma_1 - \sigma_2)$$

Ecuación 11

- $\varphi =$ Retrazo angular.
- $e =$ Espesor.
- $\lambda =$ Longitud de onda.
- $K =$ Constante proporcional.
- $\sigma_1, \sigma_2 =$ Esfuerzos principales.

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\varphi \lambda}{2\pi K e}$$

Ecuación 12

- $\varphi =$ representa el desfase debido a la birrefringencia del medio en unidades angulares.
- $e =$ Espesor.
- $\lambda =$ Longitud de onda.
- $K =$ Constante proporcional.
- $\sigma_1, \sigma_2 =$ Esfuerzos principales.

Una forma más compacta de la ecuación anterior es la siguiente:

$$N = \frac{\varphi}{2\pi}$$

Ecuación 13

- $\varphi =$ representa el desfase debido a la birrefringencia del medio en unidades angulares.
- $N =$ Orden de franja.

$$f_\sigma = \frac{\lambda}{K}$$

Ecuación 14

- $\lambda =$ Longitud de onda.
- $K =$ Constante proporcional.
- $f_\sigma =$ Factor de franja.

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N f_\sigma}{e}$$

Ecuación 15

- $e = \text{Espesor}$.
- $N = \text{Orden de franja}$.
- $f_{\sigma} = \text{Factor de franja}$.
- $\sigma_1, \sigma_2 = \text{Esfuerzos principales}$.

El parámetro f_{σ} se denomina factor de franja del material, y es constante para cada longitud de onda. Como se puede observar en la ecuación podemos determinar la diferencia de tensiones, si somos capaces de determinar N (orden de franja) y el factor de franja, estos dos valores se obtienen experimentalmente.

2.6.2. Ventajas y desventajas de análisis fotoelástico

El análisis de esfuerzos mediante el método de fotoelasticidad presenta varias ventajas y desventajas que Donal y Murray (1998) describen.

- **Ventajas**
- Se obtiene un panorama total de la distribución de los esfuerzos a través de todo el elemento.
- Proporciona resultados cualitativos para ubicar los lugares de esfuerzos mínimos y máximos o para determinar los cambios en la distribución de esfuerzos originados por alteraciones menores en la forma del modelo, que conducen a la obtención de un diseño apropiado, es decir, proporciona una forma rápida de determinar concentración de esfuerzos.
- Permite determinar la diferencia de esfuerzos en cualquier punto, brinda una determinación aproximada de los esfuerzos en cuerpos irregulares, comparables con los resultados que se obtienen con técnicas precisas de extensometría eléctrica.

- **Desventajas**

- La fotoelasticidad es un método indirecto que requiere para ciertos estudios, el empleo de modelos a escala y la subsiguiente interpretación de los resultados con el prototipo.
- La separación de los esfuerzos principales individuales en puntos internos del modelo se hace por medio de técnicas laboriosas y cuidadosamente desarrolladas.
- Para su correcta aplicación se tiene que seguir un procedimiento experimental desarrollado con cuidado, incluyendo la necesidad de preparar modelos libres de esfuerzos.

2.6.3. Características del material fotoelástico

Como se mencionó en la teoría fotoelástica, aunque existen varios materiales que pueden ser utilizados para fines fotoelásticos, no todos son aptos para este tipo de estudio, las características que deben tener estos materiales se listan a continuación:

- Ser transparentes a la luz empleada en el polariscopio.
- Ser suficientemente sensible a esfuerzos o deformaciones, lo cual viene indicado por el factor de franja, a menor valor de factor de franja el material es más sensible.
- El material debe exhibir características lineales con respecto a esfuerzo vs deformación.
- Debe poseer isotropía mecánica, isotropía óptica y ser homogéneo.
- El material no debe deformarse en el tiempo para cargas aplicadas constantes y además la recuperación debe ser lo más rápida posible.
- Debe exhibir alto módulo de elasticidad.
- La sensibilidad del material, no debe ser afectada por pequeños cambios de temperatura.
- El material no deberá perder sus características con el tiempo.
- El material debe presentar fácil maquinabilidad, ya que de lo contrario encarece y dificulta el proceso de preparación de los modelos,

además de que se puede producir distorsión en el espectro fotoelástico debido a esfuerzos residuales ocasionados por el maquinado.

- Debe estar libre de esfuerzos residuales, producidos principalmente por el proceso de conformado.
- Poseer birrefringencia.

2.6.4. Análisis de franjas fotoelásticas

Como se había mencionado anteriormente, al aplicar esfuerzos a ciertos materiales transparentes y observarlos a través de luz polarizada, se puede observar un mapa de colores; para continuar con el estudio fotoelástico es necesario profundizar más en el análisis de este mapa de colores.

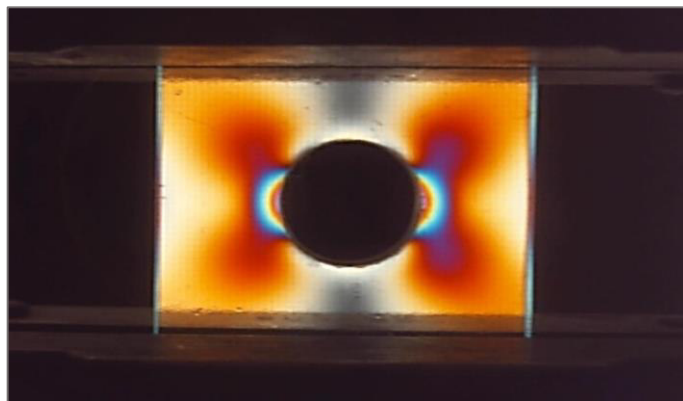


Figura 12 Imagen Fotoelástica a tracción

Si se observa con detenimiento la Figura 12 Imagen Fotoelástica a tracción de una probeta sometida a tracción, podemos observar que los colores generados tienen un orden específico y nunca se mezclan entre sí, esto se debe a que los colores generados en el material son proporcionales al esfuerzo presente en cada región.

Resumiendo las características que poseen los colores podemos decir:

- Se dividen en franjas continuas y ordenadas.
- Las franjas nunca cruzan ni combinan con otra.

- Siempre mantienen su lugar en la secuencia ordenada, es decir que al aparecer una nueva franja, las anteriores se desplazan sin perder su secuencia.
- La región de un color representa el mismo nivel de esfuerzo en toda su área.

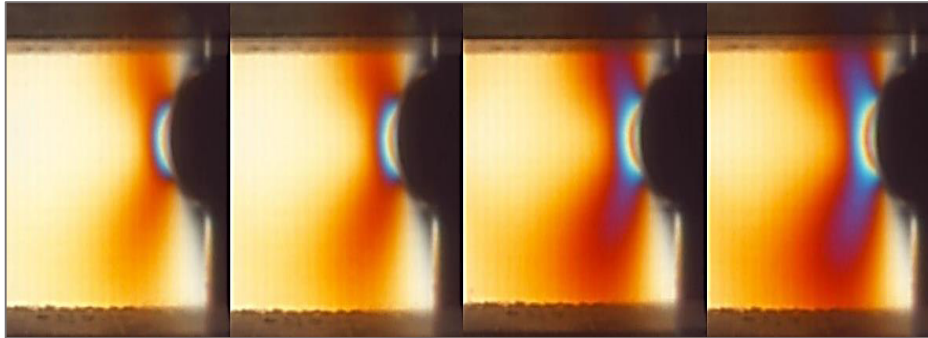


Figura 13 Imagen fotoelástica de una probeta sometida a varias cargas de tensión.

2.6.5. Identificación de las Franjas

Con ayuda de la *Ecuación 15* y mediante la identificación de las franjas en el material podemos estimar el valor del esfuerzo al que se encuentra sometido en cada región.

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \frac{f_\sigma}{e} N \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- σ_2, σ_1 = Esfuerzos principales.
- f_σ = factor de franja
- e = *Espesor del Material*
- N = *Orden de franja que se obtiene de la siguiente tabla.*

Color	Fringe Order,
Black	0
Gray	0.28
White	0.45
Yellow	0.60
Orange	0.79
Red	0.90
Tint of Passage 1 ^B	1.00
Blue	1.06
Blue-green	1.20
Green-Yellow	1.38
Orange	1.62
Red	1.81
Tint of Passage 2 ^B	2.00
Green	2.33
Green-Yellow	2.50
Pink	2.67
Tint of Passage 3 ^B	3.00
Green	3.10
Pink	3.60
Tint of Passage 4 ^B	4.00
Green	4.13

Figura 14 Tabla factor de franja ASTM D-4093

Como se puede observar en la Figura 14 Tabla factor de franja ASTM D-4093, el color negro representa ausencia de esfuerzos en el material, mientras que a partir de éste, los colores van cambiando de acuerdo al nivel de tensión existente en el material.

2.6.6. La fotoelasticidad y el procesamiento digital de imágenes

Al ser la fotoelasticidad un fenómeno apreciable a través de la visión, resulta evidente su compatibilidad con tecnologías como la visión artificial y el procesamiento de imágenes.

2.7. Comportamiento mecánico de los materiales

Al aplicar una carga a un material este tiende a cambiar su comportamiento dependiendo del tipo de carga que se le aplique y la intensidad de la misma, pudiendo provocar distintos comportamientos como deformación temporal, deformación permanente, fractura, entre otras. Una de las áreas que se encarga del estudio de estos fenómenos es la resistencia de materiales la cual

se define como una rama de la mecánica de materiales que estudia las relaciones entre las cargas externas aplicadas a un cuerpo deformable y la intensidad de las fuerzas internas que actúan dentro del cuerpo. Demostrando que las propiedades del material del que se construye una pieza afecta tanto a su elección como su diseño, ya que deben satisfacer las condiciones de resistencia y de rigidez.

2.7.1. Tipos de cargas

- **Tracción**

Se conoce como tracción al esfuerzo causado al someter a un elemento a dos fuerzas que tiendan a estirarlo.

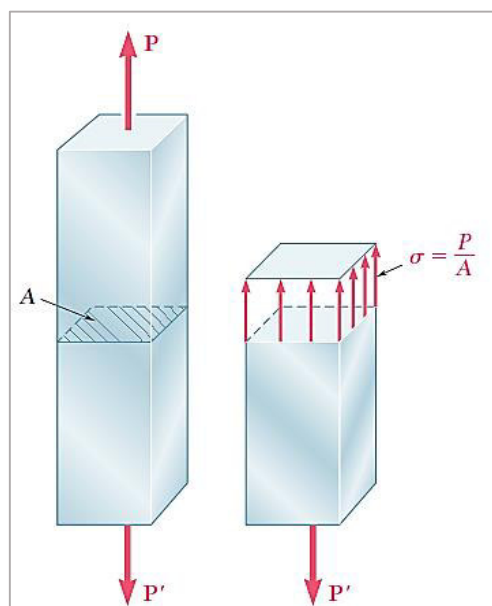


Figura 15 Probeta a tensión Fuente (Beer, 2010)

Para calcular el valor numérico de este esfuerzo se utiliza la fórmula.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ecuación 16

Donde:

- $\sigma =$ Esfuerzo
- $F =$ Fuerza Aplicada
- $A =$ Área transversal del material

Un cuerpo sometido a tracción puede deformarse elásticamente, es decir de forma no permanente siempre y cuando no supere su límite de fluencia en donde el cuerpo empieza a deformarse permanentemente hasta llegar a la rotura.

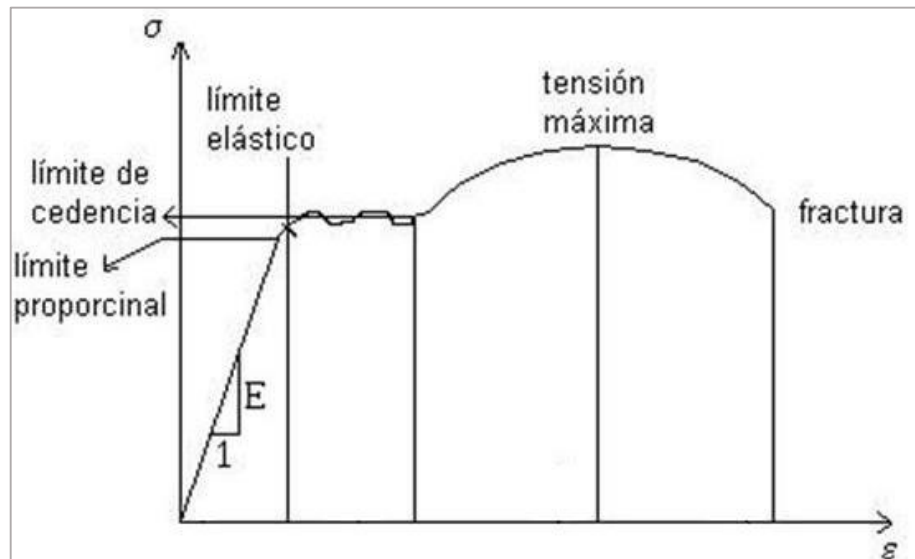


Figura 16 Curva esfuerzo vs deformación

- **Compresión**

El esfuerzo de compresión es el contrario del de tracción, es decir que el material es sometido a fuerzas de compresión. Los efectos de este tipo de esfuerzos son la reducción en la longitud del material y en algunos casos la rotura.

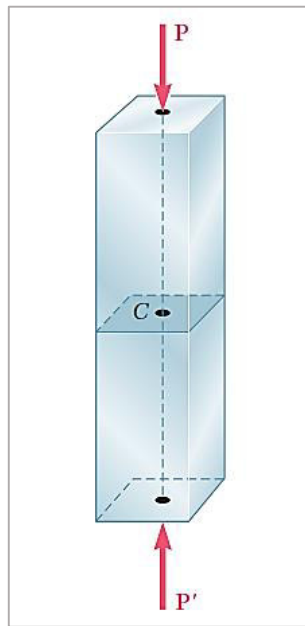


Figura 17 Probeta a compresión Fuente (Beer, 2010)

- **Torsión**

Se conoce como torsión al esfuerzo provocado al hacer girar el extremo de un elemento con respecto a su eje longitudinal, mientras su otro extremo se mantiene estático o girando en sentido contrario. El esfuerzo que este tipo de carga provoca en el material es de tipo cortante y distribuye linealmente a lo largo de su sección transversal.

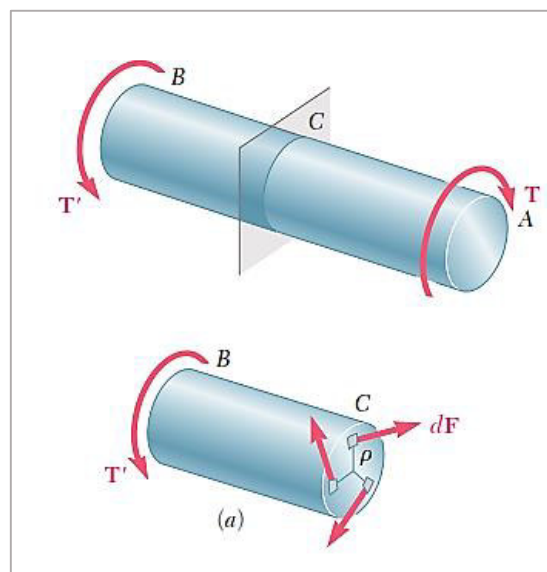


Figura 18 Probeta a torsión Fuente (Hibbeler, 2011)

- **Flexión**

Se denomina esfuerzo flector al esfuerzo provocado al aplicar una carga perpendicular al eje longitudinal de un elemento comúnmente de espesor constante, usualmente los elementos diseñados para soportar este tipo de cargas se los conoce como vigas y se los clasifica según su tipo de sujeción.

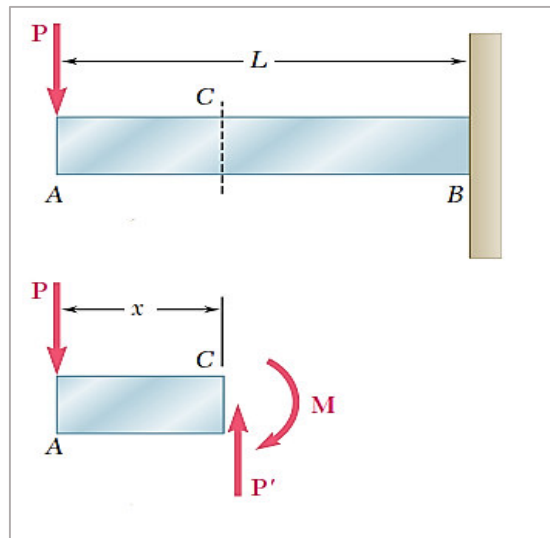


Figura 19 Probeta a flexión Fuente (Beer, 2010)

2.7.2. Máquina universal de ensayos MTS TK/T5002

La máquina MTS-TK/T5002 del laboratorio de resistencia de materiales del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, mecánicamente está constituida por una parte estructural la cual consta de un cabezal fijo, un cabezal móvil, dos tornillos sin fin, una barra guía con fines de carrera, poleas, bandas, y acoples con dos motores; gracias a estos elementos se pueden realizar ensayos mecánicos de tracción, compresión, flexión entre otros.



Figura 20 Máquina de ensayos MTS

Para poder realizar el ensayo de tracción en la máquina de ensayos MTS, se requiere del cabezal fijo localizado en la parte inferior de la base estructural y del cabezal móvil, el cual transmite la tracción a la probeta analizada. También se requiere de dos mordazas que son las encargadas de sujetar y mantener la probeta en la posición adecuada; por medio de una perilla ubicada en el panel de control de la máquina de ensayos MTS, se puede controlar la velocidad de la carga aplicada en la probeta. Para realizar el ensayo de compresión, lo único que varía es la dirección de donde se aplica la carga, esto se puede modificar por medio de un interruptor en el panel de control principal de la máquina de ensayos MTS.



Figura 21 Mordaza de sujeción para tracción y compresión

Para realizar el ensayo de flexión en la máquina MTS, es necesario retirar las mordazas de sujeción y colocar en el cabezal fijo los apoyos donde se encontrará asentada la probeta, y en el cabezal móvil es necesario colocar el elemento que permita aplicar la carga seleccionada, para este proyecto se seleccionó el tipo de carga puntual.

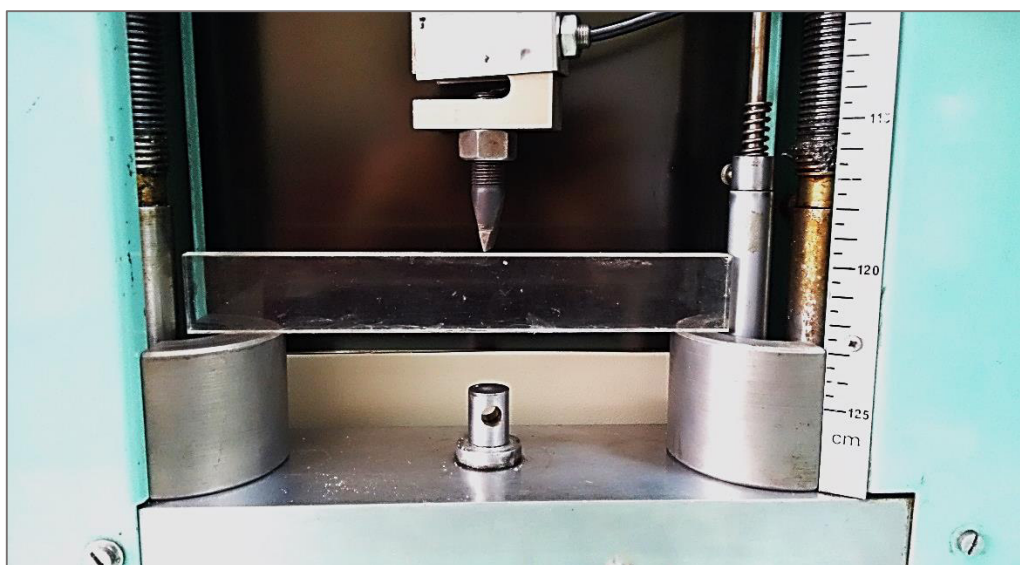


Figura 22 Apoyos y carga puntual

Debido a las características que presenta la máquina de ensayos universal MTS, no es posible realizar ensayos de torsión, por lo que para realizar este ensayo se utilizó la máquina de torsión pura marca Avery, que posee el laboratorio de mecánica de materiales.



Figura 23 Máquina de torsión marca Avery

2.7.3. Tensiones Residuales

Las tensiones residuales son aquellas que se producen debido a las interacciones entre el tiempo, la temperatura, la deformación y la microestructura, las cuales causan que en ciertas secciones representativas de una pieza las tensiones se mantengan aún después de haber retirado la carga. Las principales características que influyen en el desarrollo de tensiones residuales son la conductividad térmica, capacidad calorífica, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

2.8. Característica del material fotoelástico

Como se mencionó en la teoría fotoelástica, aunque existen varios materiales que pueden ser utilizados para fines fotoelásticos, no todos son aptos para este tipo de estudio, las características que deben tener estos materiales se presentan a continuación:

- Ser transparentes a la luz empleada en el polariscopio.

- Ser suficientemente sensible a esfuerzos o deformaciones, lo cual viene indicado por el factor de franja, a menor valor de factor de franja el material es más sensible.
- El material debe exhibir características lineales con respecto a esfuerzo vs deformación.
- Debe poseer isotropía mecánica, isotropía óptica y ser homogéneo.
- El material no debe deformarse en el tiempo para cargas aplicadas constantes y además la recuperación debe ser lo más parida posible.
- Debe exhibir alto módulo de elasticidad.
- La sensibilidad del material, no debe ser afectada por pequeños cambios de temperatura.
- El material no deberá perder sus características con el tiempo.
- El material debe presentar fácil maquinabilidad, ya que de lo contrario encarece y dificulta el proceso de preparación de los modelos, además de que se puede producir distorsión en el espectro fotoelástico debido a esfuerzos residuales ocasionados por el maquinado.
- Debe estar libre de esfuerzos residuales, producidos principalmente por el proceso de conformado.
- Poseer birrefringencia.

2.9. Análisis de elementos finitos

En el estudio de los elementos o componentes mecánicos, muchas veces es sencillo obtener la solución a las interrogantes que se presentan por medio de métodos básicos de mecánica de materiales; no obstante, los problemas ingenieriles presentan un mayor grado de dificultad, por lo que el diseñador se ve forzado a realizar distintos tipos de análisis; como pruebas experimentales, pequeños prototipos o métodos numéricos que hoy en día son utilizados en el análisis de elementos finitos para dar soluciones a los problemas ingenieriles.

El análisis de elementos finitos presenta una gran cantidad de aplicaciones tales como; análisis estáticos, dinámicos, lineales y no lineales, vibraciones,

fluidos, transferencia de calor, pero para este trabajo de grado, se limitará a los análisis mecánicos básicos.

Shigley; Diseño en ingeniería mecánica 2008.

Un componente mecánico real es una estructura elástica continua. El análisis de elementos finitos divide (“discretiza”), la estructura en pequeñas subestructuras (elementos) de tipo elástico, bien definidas pero finitas. Este método utiliza funciones polinomiales, en conjunto con operaciones matriciales, el comportamiento elástico continuo de cada elemento se desarrolla en términos del material y las propiedades geométricas del elemento.

Las cargas se pueden aplicar en la superficie del elemento o en los nodos del mismo. Estos nodos son las entidades fundamentales de gobierno del elemento, en la medida en que el nodo es donde se conecta un elemento con los otros, donde finalmente se establecen las propiedades elásticas de los mismos, donde se asignan las condiciones de frontera y donde, por último, se aplican las fuerzas (de contacto o cuerpo). Un nodo posee grados de libertad (dof, por sus siglas en inglés). Los grados de libertad son los movimientos independientes de rotación y traslación que pueden existir en un nodo. Como máximo, un nodo puede tener tres grados de libertad rotacionales y tres traslacionales. Una vez que cada nodo dentro de la estructura está definido localmente en forma matricial, entonces los elementos se ensamblan (unen) globalmente a través de sus nodos en común (dof) en una matriz global del sistema. Las cargas aplicadas y las condiciones de frontera se especifican entonces y mediante operaciones matriciales se determinan los valores de todos los grados de libertad de desplazamiento desconocidos. Una vez que se ha realizado este procedimiento, es algo simple hacer uso de estos desplazamientos para determinar las tensiones y esfuerzos por medio de las ecuaciones constitutivas de elasticidad. (p.935)

El método de análisis de elementos finitos es un método computacional que trabaja en el dominio de la estructura continua en valores discretos, es por eso que se debe tomar en cuenta los errores que pueden ingresar en el análisis, estos errores pueden ser:


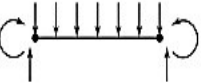
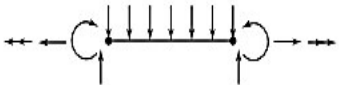
- Errores computacionales.
- Errores de conversión discreta.

Los errores computacionales son los errores que se presentan en la programación del software de elementos finitos, al trabajar con variables flotantes y las formulaciones que existen en el código de programación. Los errores de conversión discreta son los errores que se presentan al intentar igualar la distribución de la geometría real, mediante el uso de un número finito de elementos que se adaptan a la geometría.

2.9.1. Geometría del elemento

Las geometrías de los elementos en el análisis de elementos finitos se encuentran diferenciadas por su aplicación específica, a estos elementos Shigley los categoriza de la siguiente manera:

- Elementos de línea.
- Elementos de superficie.
- Elementos sólidos.
- Elementos de propósito específico.

Tipo de elemento	Ninguno	Forma	Número de nodos	Aplicaciones
	Puntal		2	Barra con extremos articulados en tensión o compresión
Línea	Viga		2	Flexión
	Armazón		2	Axial, torsional o de flexión. Con o sin rigidez de carga.





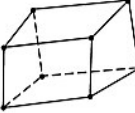
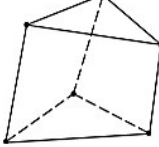
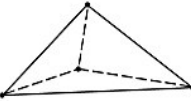

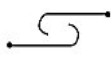

Tipo de elemento	Ninguno	Forma	Número de nodos	Aplicaciones
Superficie	Cuadrilátero de 4 nodos		4	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión
	Cuadrilátero de 8 nodos		8	Esfuerzo o deformación plana, placa plana o cascarón en flexión
	Triangular de 3 nodos		3	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión. Preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros
	Triangular de 6 nodos		6	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, placa plana o cascarón en flexión. Preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros
Sólido ¹	Hexagonal de 8 nodos (paralelepípedo o ladrillo)		8	Sólido, placa gruesa
	Pentagonal de 6 nodos (cuña)		6	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones
	Tetraedro de 4 nodos (tetra)		4	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones
Propósito especial	Brecha		2	Desplazamientos libres para espacios preestablecidos
	Gancho, conexión		2	Desplazamientos libres para espacios preestablecidos
	Rígido		Variable	Restricción rígida entre nodos

Figura 24 Geometría del elemento (Shigley, 2008, p 937)

2.10. Software CAE

Los softwares de ingeniería asistida por computadora (CAE) son programas utilizados para la simulación, validación y optimización de productos, procesos y equipos de manufactura. Utilizando el método de análisis de elementos finitos este software es capaz de analizar problemas de cálculo de esfuerzos estáticos, dinámicos y fatiga en elementos y ensamblajes mecánicos.

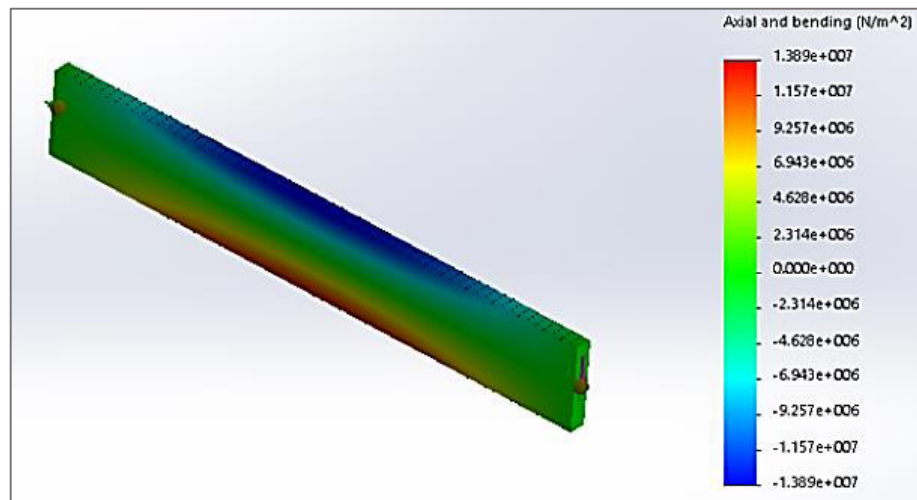


Figura 25 Simulación CAE

Como se puede observar en la imagen anterior, el análisis de fotoelasticidad presenta una gran similitud con los softwares de simulación y de elementos finitos, lo cual convierte a las simulaciones en el recurso perfecto para la comprobación de resultados en lo que a distribución de esfuerzos concierne.

CAPÍTULO 3

DISEÑO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DEL EQUIPO

3.1. Introducción

En este capítulo se describe el procedimiento desarrollado previo a la construcción de los componentes mecánicos, evaluando sus posibilidades y seleccionando la que mejores características presente. Los principales aspectos tomados en cuenta para el diseño fueron el peso, ergonomía, robustez, estética y facilidad en el mantenimiento.

3.2. Selección de material para equipo mecánico

Como se mencionó en la introducción, tomando en cuenta los criterios de diseño se plantearon cinco posibles materiales para el diseño mecánico del equipo que albergará los paneles polarizadores, la fuente de luz y la cámara digital, los materiales seleccionados fueron: chapa metálica, madera, PLA(polímero), aluminio y acrílico. Previo a esta selección se procedió a realizar la evaluación de cada uno de los materiales, bajo distintos parámetros, los cuales fueron calificados del 1 al 5, en todos los parámetros el valor de 1 representaría una característica desfavorable y el valor de 5 una característica favorable; los parámetros de evaluación de materiales son:

Precio: Este ítem es importante debido a que el equipo debe tener un precio acorde a la función que va a desempeñar. Para este parámetro 5 representa el material menos costoso y 1 el más costoso, no se detallan precios debido a que estos materiales se venden de diferente manera, ya sea por dimensiones, peso o forma geométrica.

Costo de manufactura: Este ítem fue considerado tomando en cuenta los equipos disponibles en el laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, ya que algunos materiales requieren largas jornadas de manufactura en comparación con otros, Para este parámetro 5 se refiere a manufactura sin necesidad de maquinaria especializada ni conocimientos específicos (Por ejemplo el uso de dobladora,

taladro, entenalla , entre otros), el valor de 1 se refiere a manufactura con máquinas especializadas y conocimientos elevados (Por ejemplo la impresión 3D o maquinado CNC).

Peso: El peso es un criterio importante ya que este equipo será un accesorio desmontable para la máquina de ensayos MTS, por ende los operarios deberán manipularla con facilidad. Para este parámetro en valor de 5 representa el material con menor peso mientras que por el contrario el 1 representa el material de mayor peso.

Estética: La estética es importante ya que este es un parámetro muchas veces decisivo cuando se lo compara con equipos orientados al mismo objetivo y de similares características.

Robustez: La robustez es uno de los criterios más importantes ya que este accesorio será montado y desmontado en la máquina de ensayos MTS, esto puede causar algún tipo desgaste o ralladura debido a su manipulación.

*Tabla 1:
Evaluación de material*

	Precio	Costo	Estética	Peso	Robustez	Total
Chapa	5	5	3	1	5	19
Madera	3	5	4	3	3	18
PLA	3	1	5	5	1	15
Aluminio	1	5	3	3	3	15
Acrílico	5	3	1	5	1	15

3.3. Selección del diseño para el equipo mecánico

En esta etapa se realizaron tres diseños mediante software CAD, el principal objetivo de los diseños es no modificar la máquina de ensayos MTS sino adaptarse como si fuese un módulo adicional de la máquina. Los diseños serán descritos a continuación para posteriormente evaluarlos por medio de una tabla de criterios de selección.

3.3.1. Diseño 1 del equipo mecánico

En este diseño se pretende construir varios módulos que se adapten y formen un solo equipo, cada módulo cumple una función específica, por ejemplo un módulo se encarga de la adquisición de las imágenes, otro módulo de la generación de luz, y los otros dos albergan los paneles polarizadores.

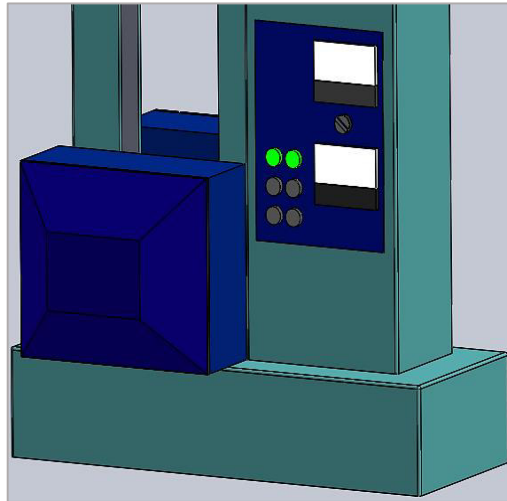


Figura 26 Diseño propuesto 1

El principal inconveniente que presenta este diseño, es que limita el tamaño de la probeta al tamaño de la caja.

3.3.2. Diseño 2 del equipo mecánico

Este diseño se conforma por dos módulos, el uno alberga la fuente de luz y el polarizador, mientras que en el otro se encuentran el analizador y la cámara digital. Además se adicionaron dos soportes traseros que brindan estabilidad al momento de realizar el ensayo.

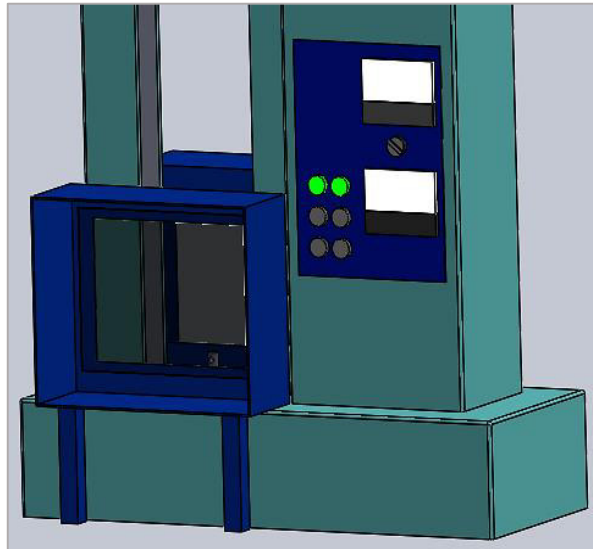


Figura 27 Diseño propuesto 2

Una de las desventajas de este diseño es que el ancho de los módulos no es estético, pero fue necesario para poder colocar los soportes traseros.

3.3.3. Diseño 3 del equipo mecánico

Este diseño es de similares características al anterior pero con un ancho más adecuado del gabinete para facilitar el trabajo, este diseño compensa la ausencia de los soportes traseros por medio de imanes ubicados en la parte frontal del equipo. Además cuenta con un deslizador interno que permite desplazar la cámara digital a la altura que se requiera.

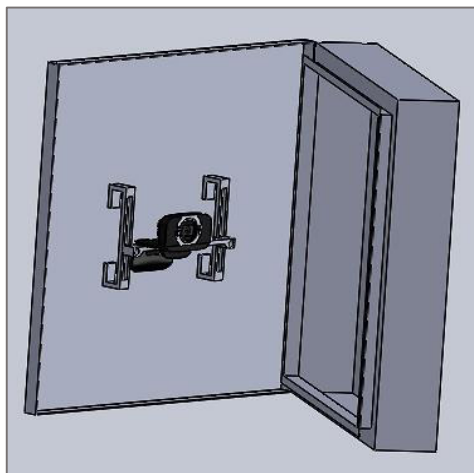


Figura 28 Gabinete con cámara de video

Para facilitar la manipulación de los elementos internos de los módulos, los gabinetes dispondrán de puertas con bisagra y también de una cerradura de seguridad, la parte frontal cuenta con el panel polarizado (analizador). El segundo gabinete que se encuentra en la parte posterior de la máquina de ensayos universal, es el encargado de albergar un filtro polarizador y la fuente de iluminación; la fuente de iluminación está sujeta a un par de acoples que se encuentran atornillados al gabinete para garantizar un adecuado posicionamiento de la fuente de luz.

Para una correcta captura de imagen el equipo mecánico dispondrá de unas guías que permitan el desplazamiento horizontal como vertical de la cámara de video. Estas guías se encontraran ubicadas en la parte posterior del analizador, y la cámara de video se encuentra sujeta a las mismas por medio de pernos para su fácil manipulación.

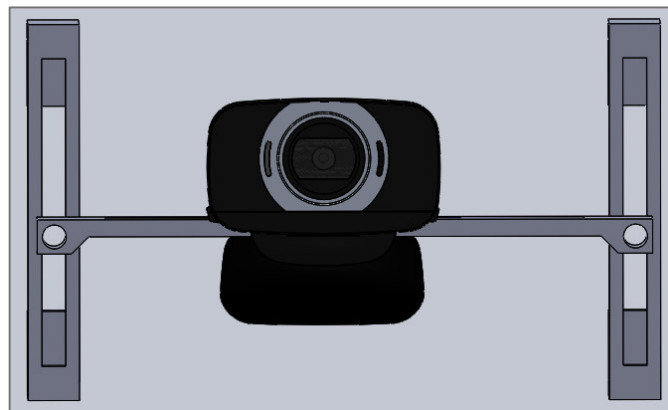


Figura 29 Guías de la cámara de video

Estas guías permitirán desplazarse a la cámara de video 90mm en el eje vertical como horizontal, de igual manera la cámara de video permite que el usuario gire la cámara 180° y también la incline de manera que el posicionamiento de la cámara de video sea el más adecuado para la obtención de las imágenes fotoelásticas en las probetas.

Las guías de la cámara de video serán de material polímero PLA, que es un material ligero y presenta la resistencia suficiente para soportar el peso de la cámara de video.

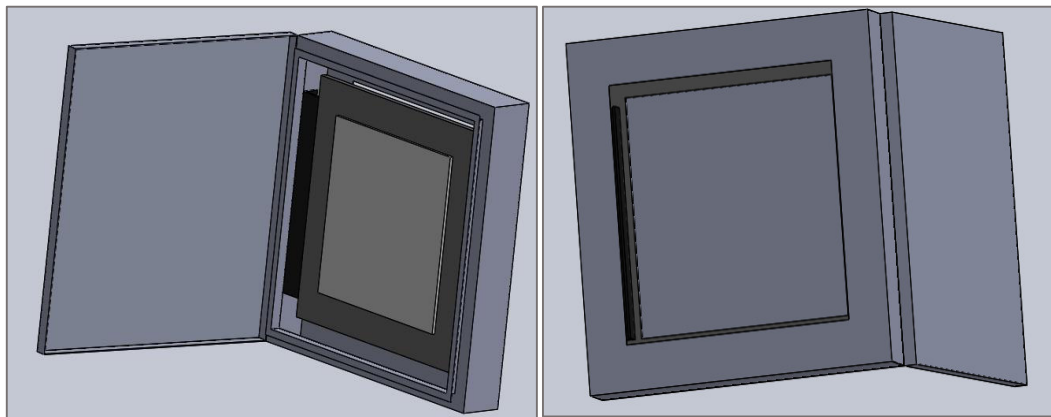


Figura 30 Gabinete con fuente de luz

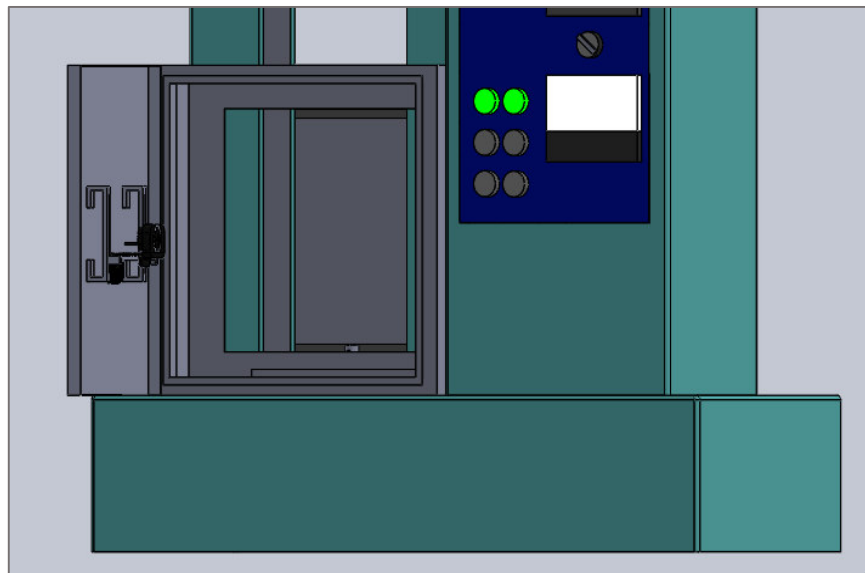


Figura 31 MTS con gabinete frontal

*Tabla 2:
Tabla de selección del diseño mecánico*

	Precio	Costo	Estética	Peso	Robustez	Total
Diseño 1	1	2	3	3	4	13
Diseño 2	3	3	4	3	4	17
Diseño 3	5	4	5	5	4	23

Para realizar la evaluación de selección del diseño mecánico, se utilizó los mismos criterios que la selección del material, dando como resultado que el diseño número 3 es el de mejores características y se adapta de mejor manera

a la máquina de ensayos universal, sin causarla ninguna modificación. A continuación se muestran los elementos construidos.



Figura 32 Guías de cámara implementadas



Figura 33 Equipo polarizador implementado



Figura 34 Equipo analizador implementado



Figura 35 Equipo polarizador y analizador

3.4. Selección del material fotoelástico

Como se explicó anteriormente en la teoría, el material que se debe utilizar para realizar un análisis fotoelástico, debe tener ciertas características. Para éste trabajo se analizaron dos distintos tipos de materiales, estos fueron el policarbonato compacto y el poliuretano, su selección se la realizó mediante una tabla de comparación, evaluando sus características.

*Tabla 3:
Selección material fotoelástico*

Características	Policarbonato	Poliuretano
Transparencia	✓	✓
Sensibilidad a factor de franja	X	✓
Isotropía	✓	✓
Birrefringencia	✓	✓
Maquinabilidad	X	✓

Como resultado de la tabla de selección, se concluyó que el policarbonato no cumple con la característica de sensibilidad a factor de franja, esto quiere decir que el material comienza a mostrar franjas fotoelásticas, cuando se le ha aplicado una carga muy elevada, lo que lo hace un material con bajo índice de sensibilidad fotoelástica, de igual manera el policarbonato no cumple con

la característica de maquinabilidad, esto se debe a que el policarbonato es un polímero que al ser maquinado desprende sustancias tóxicas, que aparte de provocar una oxidación acelerada en los equipos de manufactura, afectan gravemente la salud del operario.

Por otro lado el poliuretano es un material que se lo puede encontrar en varias presentaciones; de las cuales la líquida es la que cumple a cabalidad las características necesarias para ser un material fotoelástico; al encontrarse el poliuretano en estado líquido, se decidió utilizar el poliuretano como material fotoelástico colocado sobre acrílico transparente, el cual no presenta la característica de birrefringencia, que es la propiedad principal para producir fotoelasticidad.

En conclusión, en el capítulo de pruebas y resultados se realizará los ensayos fotoelásticos al acrílico, tomando como medio fotoelástico al poliuretano.

3.5. Selección de la cámara de video

En el mercado actual, existe una gran cantidad de cámaras de video con las que se puede realizar aplicaciones de visión por computadora; la selección de las mismas, depende en alto grado de la aplicación que se le vaya a dar, el entorno donde va a trabajar y su tipo de comunicación.

Tomando en cuenta las características antes mencionadas, para este proyecto se seleccionó una cámara de video web Logitech C615, con una resolución máxima de 1920X1080 pixeles, ya que la aplicación que se le va a dar es la captura de una imagen en un tiempo específico, lo que deja como un parámetro despreciable la velocidad de respuesta en su función de video.

El entorno donde trabajará la cámara web será el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, las condiciones ambientales que presenta el laboratorio no afectaran de ninguna manera el desempeño de la cámara de video. Por otro lado, una ventaja que presenta la cámara de web es que es un dispositivo común, por lo que la mayoría de sistemas operativos ya presenta los controladores necesarios para la utilización de las mismas; a continuación se muestran las

características principales de la cámara de video seleccionada, en los anexos se encuentran adjuntos los documentos que indican las características completas de la cámara de video.

Tabla 4:
Características principales cámara de video

Características	
Resolución máxima	1980x1080
Calidad de fotografía	Hasta 8 Megapíxeles
Control de enfoque	Automático/Manual

Fuente:(Logitech, 2016)

3.6. Paneles polarizados

Como ya se explicó en la teoría, los paneles polarizados son los encargados de filtrar la luz en una sola dirección; los paneles polarizados que se implementaron en este proyecto, se los obtuvo de pantallas de monitores que han sido dados de baja, ya que en estos monitores se utiliza una gran variedad de distintos filtros, uno de estos filtros presenta la propiedad requerida para este proyecto, de polarizar la luz en una sola dirección.

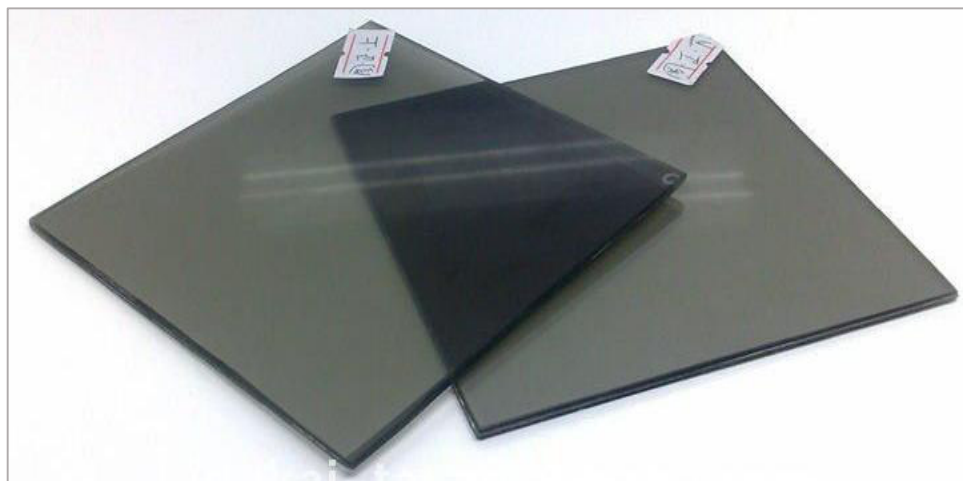


Figura 36 Filtros polarizadores

3.7. Selección de la fuente de luz

Para la selección de la fuente de luz se tomó en cuenta la normativa de la ASTM D-4093-95 donde se encuentran establecidas las siguientes condiciones.

- Iluminación mínima requerida $0,0465 \frac{W}{cm^2}$.
- La fuente de luz no debe hacer que la probeta varíe su temperatura en más de $2^{\circ}C$.
- El color de temperatura de la fuente luminosa no debe ser menor a $3150^{\circ}K$.

La fuente de luz seleccionada que cumple los requerimientos de la normativa es el foco led cuadrado que posee una potencia de $32 W$. Temperatura de color $6500 k$; valores que se encuentran adjuntos en anexos, en la hoja técnica de la fuente de luz seleccionada.

- **Iluminación mínima**

$$I_{min} = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 17}$$

- I_{min} = Iluminación mínima requerida
- P = Potencia de la fuente de iluminación
- A = Área iluminada

$$I_{min} = \frac{32W}{625cm^2} = 0,0512 \frac{W}{cm^2}$$

- **Medición de variación de la temperatura en la probeta**

Con la fuente de iluminación encendida se tomó mediciones de temperatura en la probeta, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5:
Temperatura en la probeta

Tiempo(minutos)	Temperatura en la probeta ($^{\circ}C$)
15	20,5
30	20,6
45	20,6
60	20,5

Tabla 6:
Selección fuente luminosa

Valores requeridos	Valores seleccionados
$0,0465 \frac{W}{cm^2}$	$0,0512 \frac{W}{cm^2}$
3150K.	6500 k
Variación de temperatura menor a 2°C	Variación de temperatura menor a 1°C

3.8. Acondicionamiento de la celda de carga

La máquina MTS de ensayo universal consta de una celda de carga tipo "S", la cual cuenta con su respectivo acondicionador de señal que consta con un display, donde se puede observar directamente la carga aplicada; para este proyecto se incorporó esta celda de carga y su acondicionador de señal al software de adquisición de imágenes fotoelásticas, por medio de un cable USB/serial.

3.9. Diseño e implementación del Software

Para el diseño del software se utilizó un lenguaje de programación que permita la adquisición y manejo de imágenes para la manipulación e interpretación de las mismas, además de ser compatible con el dispositivo de acondicionamiento de la celda de carga.

El diseño de la HMI (Interfaz Humano Máquina), se utilizó un diseño intuitivo para el usuario con opciones predeterminadas de espesor y factor de franja para facilitar el análisis del ensayo; el software utiliza como periféricos externos una celda de carga tipo 'S' y una cámara Web, las cuales se conectan al computador por medio de los puertos USB.

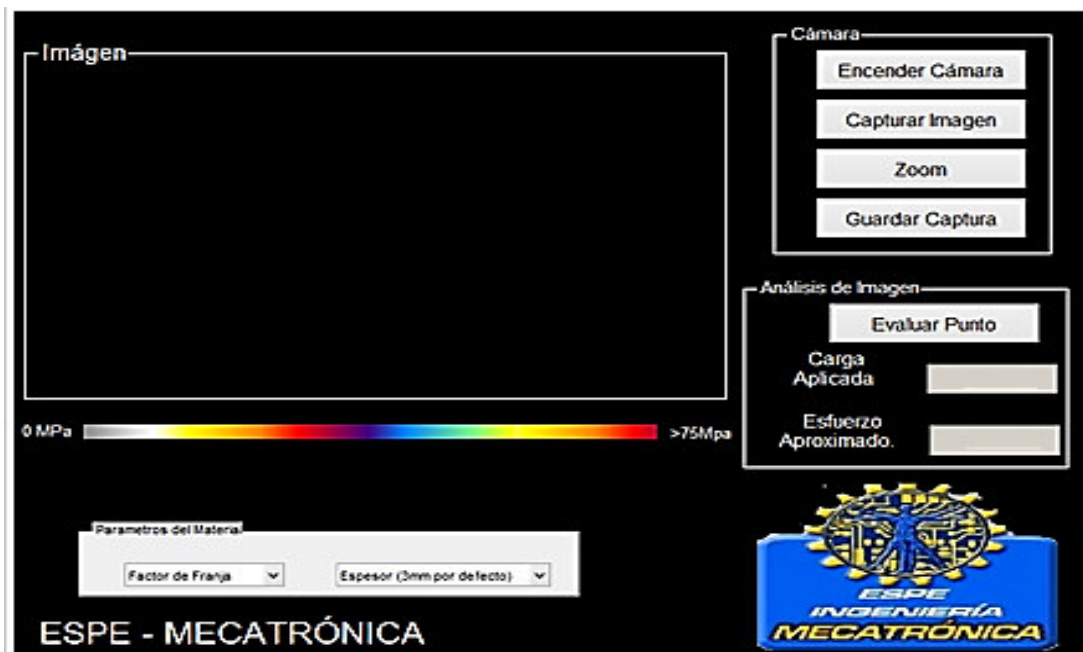


Figura 37 HMI Fotoelasticidad

Al iniciar el software (una vez conectado los periféricos externos) se puede observar la probeta en tiempo real por medio de la cámara web, una vez que esto ocurre el software le permite al usuario adquirir la imagen en la cual se procede a realizar la interpretación por medio de los colores que presenta la probeta; para facilitar el estudio de la imagen el software presenta la opción de realizar un acercamiento al punto de estudio.

Una vez que la carga ha sido aplicada y la imagen ha sido adquirida, inmediatamente el software muestra el valor de la tensión a la que fue adquirida la imagen para poder realizar posteriores comparaciones con softwares de simulación. Con la imagen adquirida se podrá evaluar un punto que representa el esfuerzo de la región identificada con el mismo color; esta imagen puede ser guardada en cualquier dispositivo de almacenamiento interno o externo.

3.9.1. Diagramas de flujo

A continuación se detalla mediante diagramas de flujo el procedimiento desarrollado por el software para la adquisición de la imagen y de la fuerza, la detección del color y el cálculo del esfuerzo aproximado en un punto de análisis.

- **Función de apertura del programa**

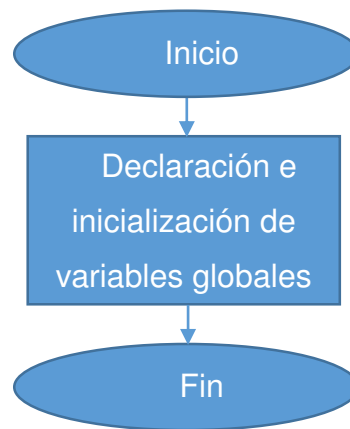


Figura 38 Diagrama de flujo, declaración de variables

- **Botón encender Cámara**

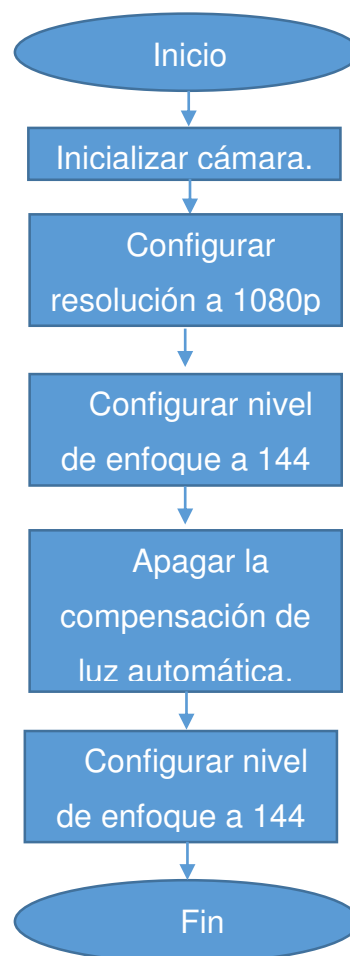


Figura 39 Diagrama de flujo encender cámara

- **Botón capturar imagen**

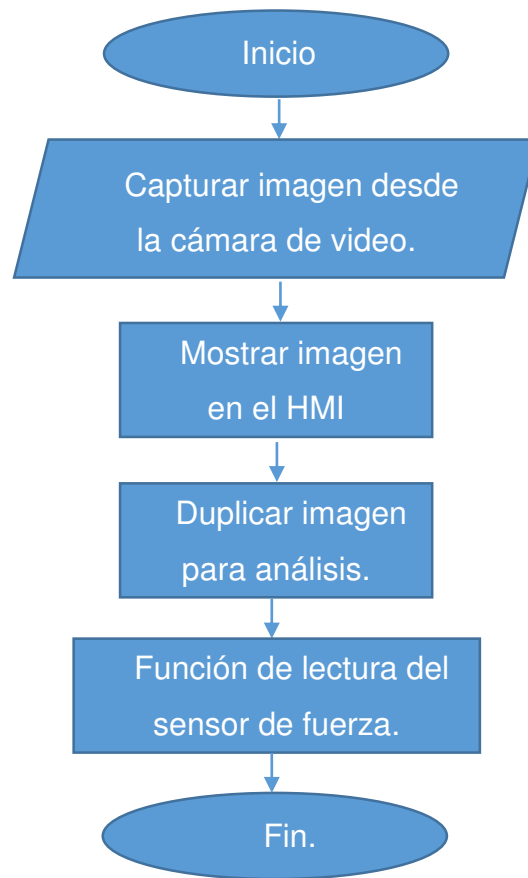
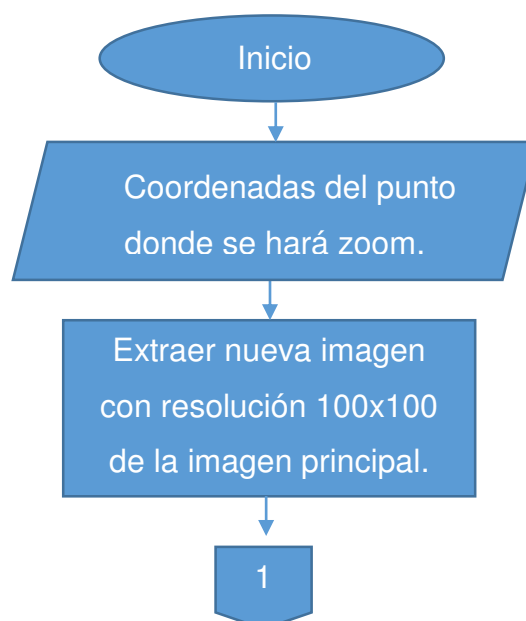


Figura 40 Diagrama de flujo capturar imagen

- **Botón zoom**



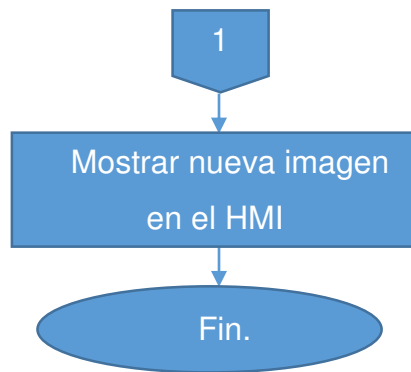


Figura 41 Diagrama de flujo zoom

- **Botón Guardar Captura**

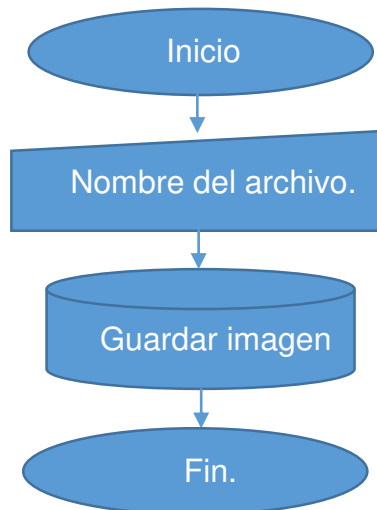


Figura 42 Diagrama de flujo guardar imagen

- **Botón Evaluar Punto**

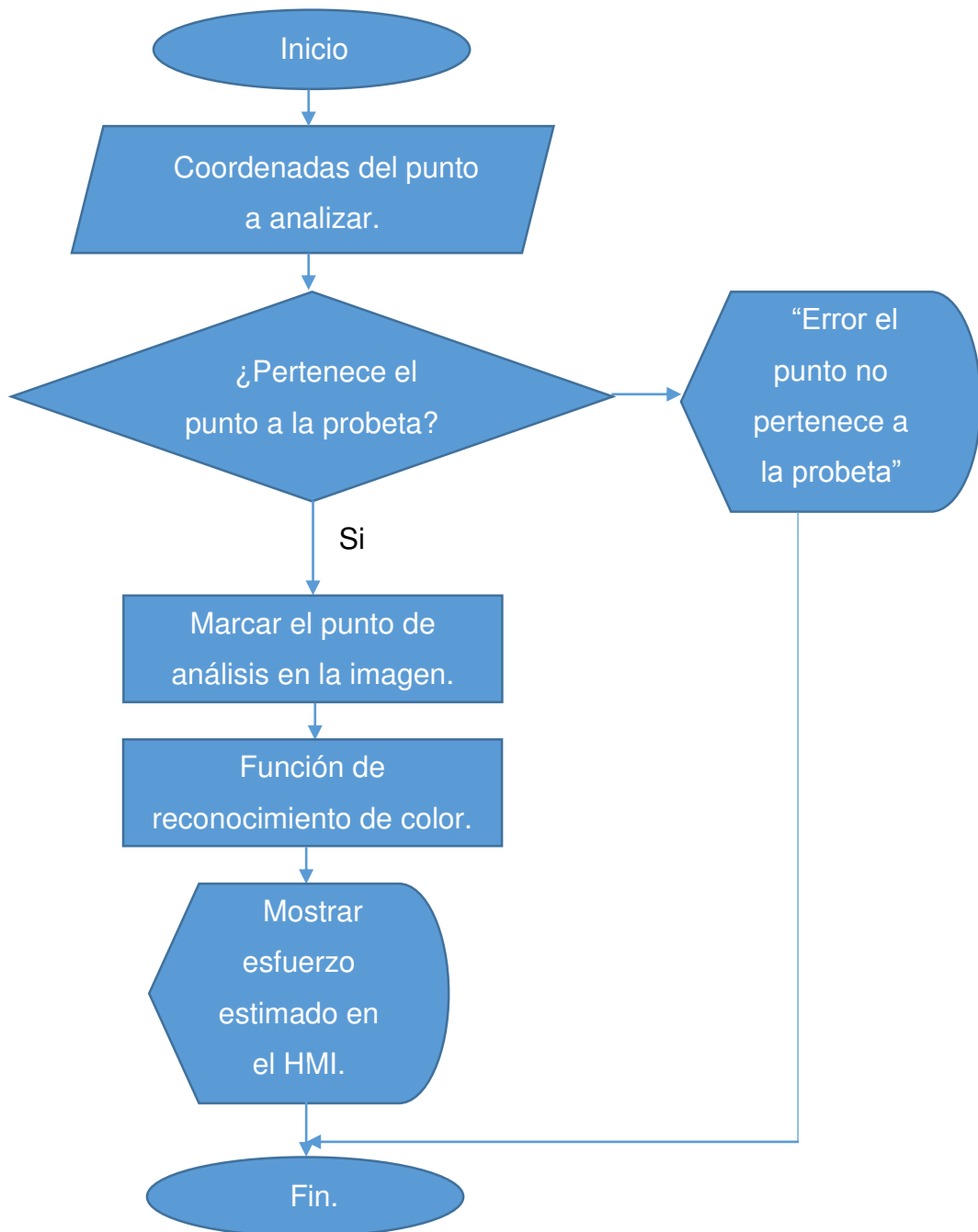
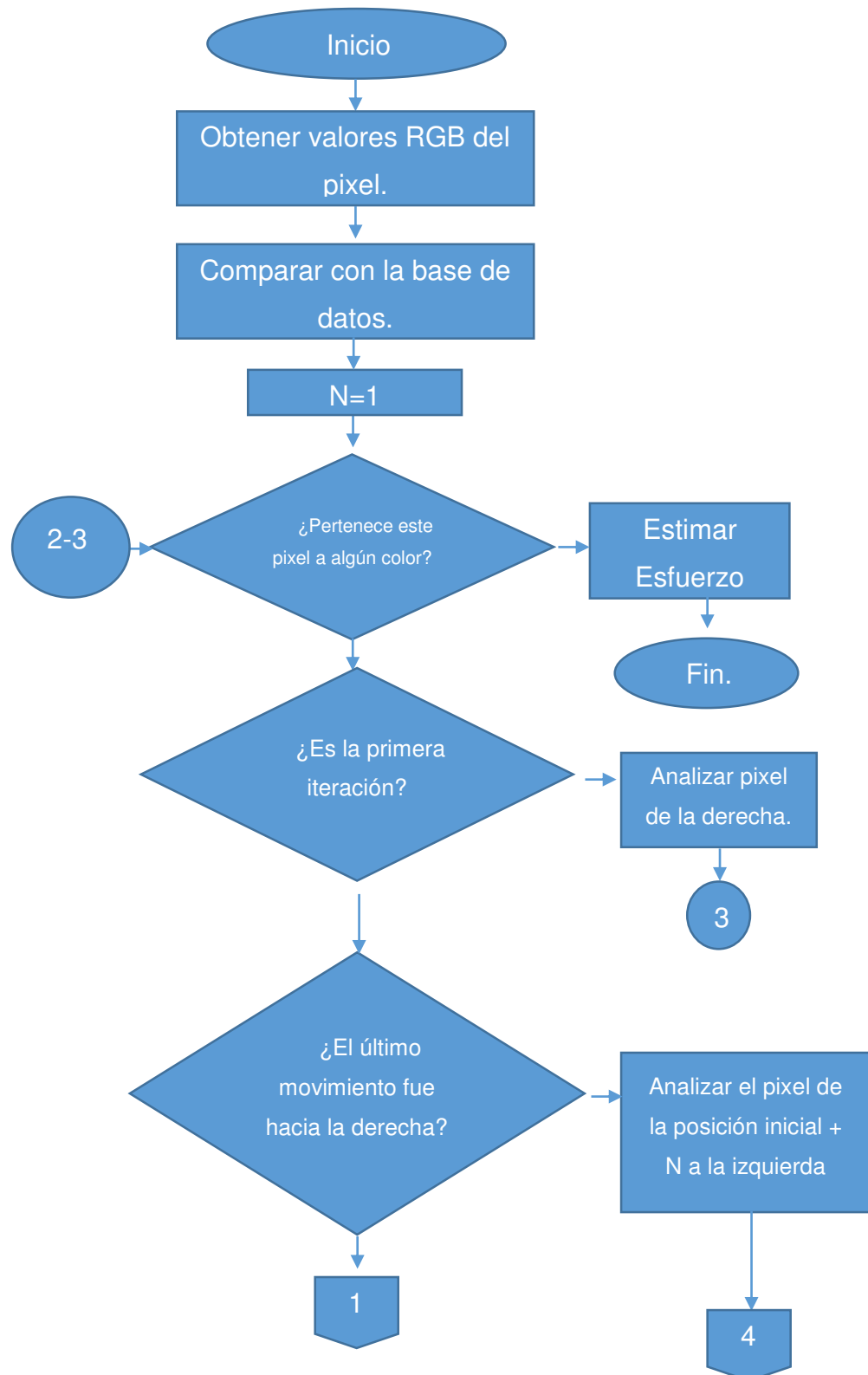


Figura 43 Diagrama de flujo evaluar punto

- **Función de reconocimiento de color**



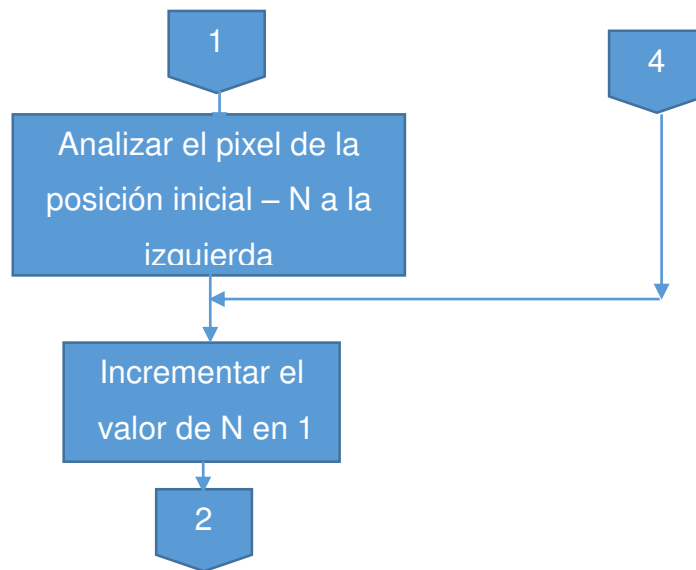


Figura 44 Diagrama de flujo reconocer color

3.10. Diseño y construcción de probetas

Como se dijo en la selección del material fotoelástico, el material que se va a utilizar en los ensayos es el acrílico; a continuación se presentan las características mecánicas del acrílico.

Tabla 7:
Características del acrílico

Características mecánicas acrílico	
Resistencia a la rotura	75,83MPa
Módulo de elasticidad	3041 MPa
Coefficiente de Poisson	0,33

Para la elaboración de las probetas en primera instancia, fueron diseñadas en un software CAD, tomando en cuenta los principales concentradores de esfuerzos; posteriormente se realizó la simulación CAE de las probetas para evaluar su comportamiento al ser afectadas por cargas de tensión, compresión, flexión y torsión; de esta manera encontrar el valor de la carga al cual se puede llegar en los ensayos con las probetas, sin causarles la deformación permanente o la rotura.

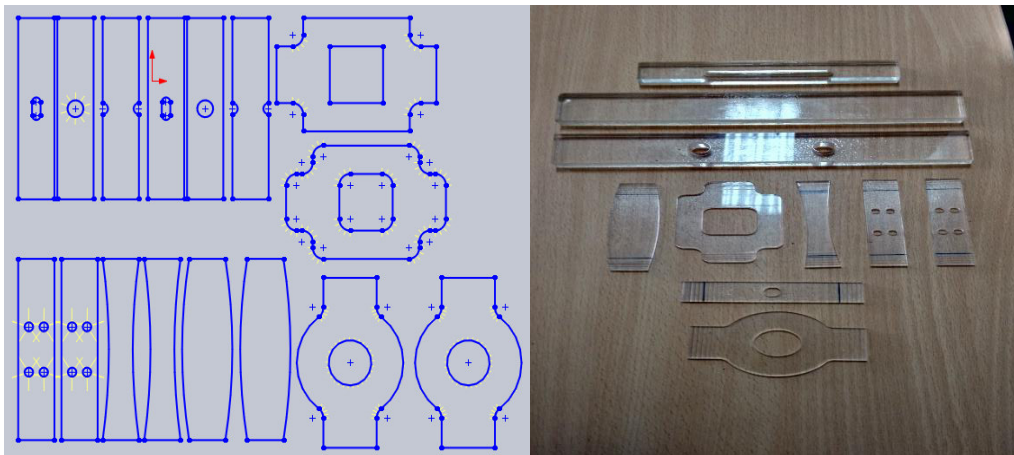


Figura 45 Modelo de probetas

Una vez con el diseño de las probetas realizado en la computadora, el proceso de producción se lo realizó mediante corte laser, este procedimiento causa un mínimo de estrés a la probeta e introduce la menor cantidad de esfuerzos residuales.

Con las probetas diseñadas y cortadas, se procede a aplicarles una película de poliuretano, la cual es aplicada por medio de un rodillo de pintura estándar; la película en la probeta de acrílico es de aproximadamente 4 micras, lo que no afecta a las propiedades mecánicas de la probeta. Los modelos seleccionados cuentan con los principales concentradores de esfuerzos, así como también se puede observar formas no muy convencionales; esto se debe a que una de las principales características de la fotoelasticidad es evaluar esfuerzos en figuras que matemáticamente serían más complicado de analizarlas.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo está basado en la adquisición de imágenes fotoelásticas, evaluación de resultados y su comparación con cálculos matemáticos y simulación por computadora.

En la máquina MTS se analizaron 12 tipos de probetas con distintos concentradores de esfuerzos, a las cuales se les aplicó dos tipos de cargas distintas; las cargas fueron aplicadas tomando en cuenta que la probeta nunca llegue a la rotura.

4.1. Análisis teórico

4.1.1. Ensayo de tracción

Para el análisis teórico de las probetas a tracción se utilizó la teoría de deformaciones, que establece, que para un material elástico lineal, el módulo de elasticidad longitudinal es una constante, en cuyo caso su valor se define como el cociente entre la tensión y la deformación. Conociendo el módulo de elasticidad del polimetilmetacrilato (PMMA) de las probetas como $3000MPa$ y midiendo las deformaciones obtenidas en los ensayos, calculamos el valor de los esfuerzos mediante la relación.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Como se mencionó, los resultados obtenidos por la fotoelasticidad representan la diferencia de los esfuerzos principales, por lo que analizando el círculo de Mohr, para el ensayo de tracción pura, se obtuvo los siguientes resultados.

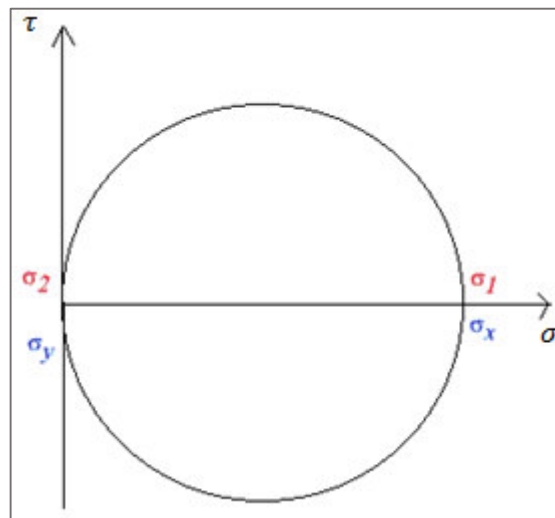


Figura 46 Círculo de Mohr tracción pura

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = 0$$

$$\sigma_y = \sigma_2 = 0$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_1 = \sigma_x$$

Tabla 8:

Resultados análisis teórico probeta 1 tracción

Carga [N]	Lo [mm]	Lf [mm]	Deformación [mm]	Deformación Unitaria	Esfuerzo
300	45.2	45.41	0.21	0.00462	13.87
550	45.2	45.54	0.34	0.00752	22.57

Tabla 9:

Resultados análisis teórico probeta 2 tracción

Carga [N]	Lo [mm]	Lf [mm]	Deformación [mm]	Deformación Unitaria	Esfuerzo
300	45.55	45.8	0.25	0.00549	16.46
400	45.55	45.92	0.37	0.00812	24.36

Tabla 10:

Resultados análisis teórico probeta 3 tracción

Carga [N]	Lo [mm]	Lf [mm]	Deformación [mm]	Deformación Unitaria	Esfuerzo
400	50.65	50.99	0.34	0.00671	20.13
750	50.65	51.34	0.69	0.01362	40.86

Tabla 11:
Resultados análisis teórico probeta 4 tracción

Carga [N]	Lo [mm]	Lf [mm]	Deformación [mm]	Deformación Unitaria	Esfuerzo
800	49.61	49.94	0.33	0.00665	19.95
900	49.61	50.07	0.46	0.00927	27.81

Tabla 12:
Resultados análisis teórico probeta 5 tracción

Carga [N]	Lo [mm]	Lf [mm]	Deformación [mm]	Deformación Unitaria	Esfuerzo
800	44.73	45.22	0.49	0.01095	32.86
1100	44.73	45.36	0.63	0.01408	42.25

Tabla 13:
Resultados análisis teórico probeta 6 tracción

Carga [N]	Lo [mm]	Lf [mm]	Deformación [mm]	Deformación Unitaria	Esfuerzo
900	44.5	44.79	0.29	0.00647	19.42
1000	44.5	44.87	0.37	0.00831	24.94

4.1.2. Ensayo de compresión

Previo al análisis de compresión se procedió a analizar la carga crítica de las probetas tratándolas como columnas, con esto garantizamos que las probetas no se pandee y no provoque errores en las medidas de deformación ni en el análisis fotoelástico.

$$F_{crit} = \pi^2 \frac{EI_{min}}{(\alpha L)^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

- E = Módulo de elasticidad
- L = Distancia entre apoyos
- I_{min} = Inercia mínima
- α = Coeficiente de sujeción
- F = Fuerza crítica
- $E = 3000MPa$
- $L = 43mm$
- $I_{min} = 38.25 mm^4$
- $\alpha = 0.5$ (empotrado – empotrado)

- $F_{crit} = 2449.91 \text{ MPa}$

Analizando el círculo de Mohr para un elemento diferencial ubicado en el extremo inferior de la probeta podemos obtener la diferencia de esfuerzos principales para poder comparar los resultados obtenidos mediante la fotoelasticidad.

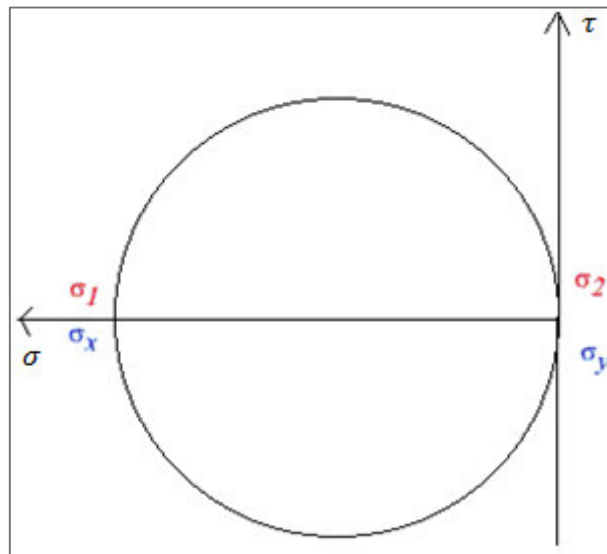


Figura 47 Círculo de Morh compresión

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = 0$$

$$\sigma_y = \sigma_2 = 0$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_1 = \sigma_x$$

Tabla 14:

Resultados análisis teórico probeta 1 compresión

Carga [N]	Lo [mm]	Lf [mm]	Deformación [mm]	Deformación Unitaria	Esfuerzo
300	43	43.17	0.17	0.00394	11.81
800	43	43.36	0.36	0.00812	24.36

Tabla 15:

Resultados análisis teórico probeta 2 compresión

Carga [N]	Lo [mm]	Lf [mm]	Deformación [mm]	Deformación Unitaria	Esfuerzo
300	46.45	46.75	0.3	0.00642	19.25
500	46.45	46.84	0.39	0.00840	25.19

4.1.3. Ensayo de flexión

Para los ensayos de flexión se utilizaron dos apoyos simples y la carga aplicada, para los análisis teóricos se utilizó las ecuaciones de mecánica de materiales para vigas en flexión pura, la cual establece que el esfuerzo flector en un punto de una viga se determina por la ecuación:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad \text{Ecuación 20}$$

En donde:

- σ = Esfuerzo flector en el punto de análisis
- M = Momento flector en la región transversal
- y = Distancia del centro de la región transversal al punto de análisis
- I = Momento de inercia de la sección transversal

Para un mejor análisis se analizaron puntos en donde el esfuerzo flector es máximo, es decir en los extremos de superior e inferior de la viga. Analizando el círculo de Mohr y teniendo en cuenta que en los puntos extremos no existe esfuerzo cortante obtenemos las siguientes relaciones:

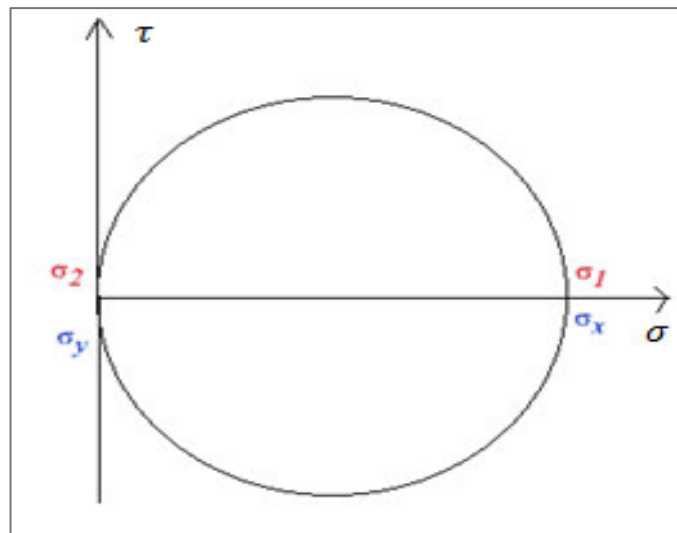


Figura 48 Círculo de Mohr flector puro

$$\begin{aligned} \tau_{yx} &= \tau_{xy} = 0 \\ \sigma_y &= \sigma_2 = 0 \\ \sigma_1 - \sigma_2 &= \sigma_1 = \sigma_x \end{aligned}$$

- **Carga 400N**

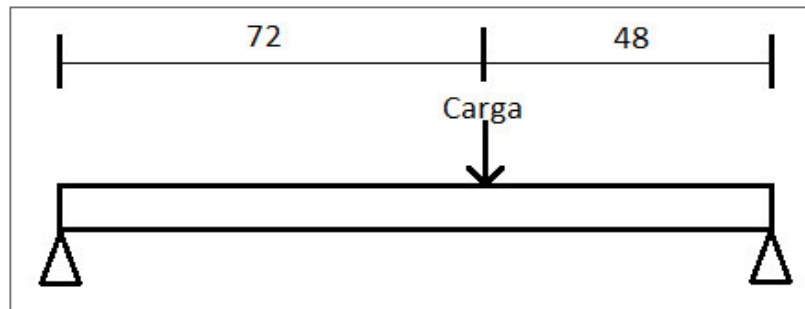


Figura 49 Representación gráfica ensayo a flexión

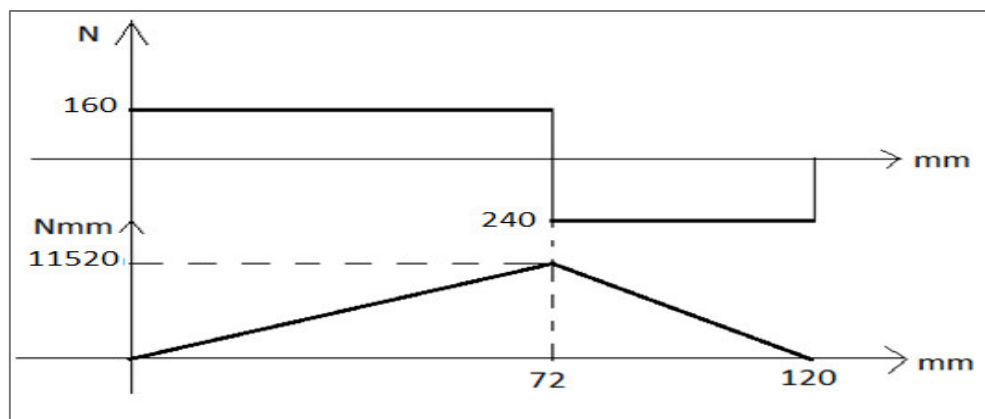


Figura 50 Diagramas fuerza cortante y momento flector

- **Carga 500N**

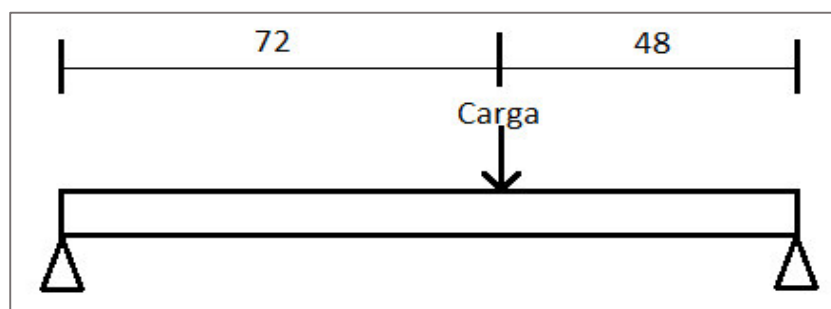


Figura 51 Representación gráfica ensayo a flexión

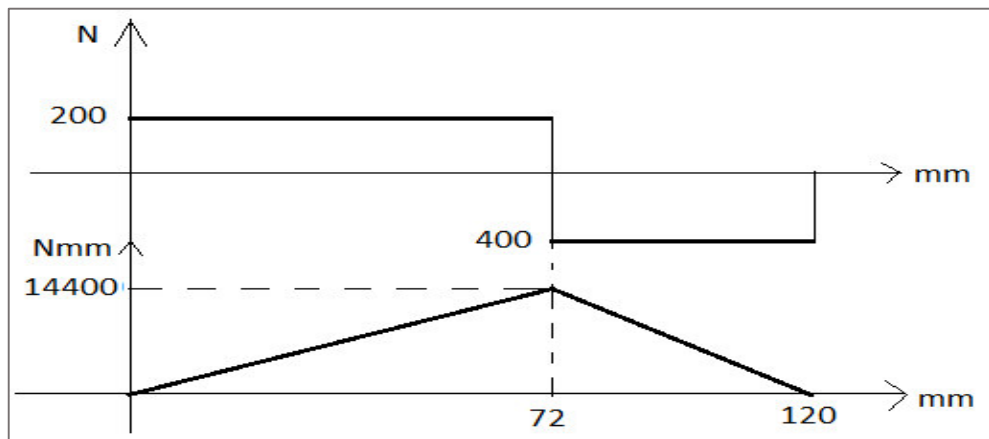


Figura 52 Diagramas fuerza cortante y momento flector

Tabla 16:
Resultados análisis teórico probeta 1 flexión

Carga	Momento Flector	Distancia al eje neutro	Inercia	Esfuerzo
400N	11520Nmm	15mm	20250	8.53Mpa
500N	14400Nmm	15mm	20250	10.67Mpa

- **Carga 600N**

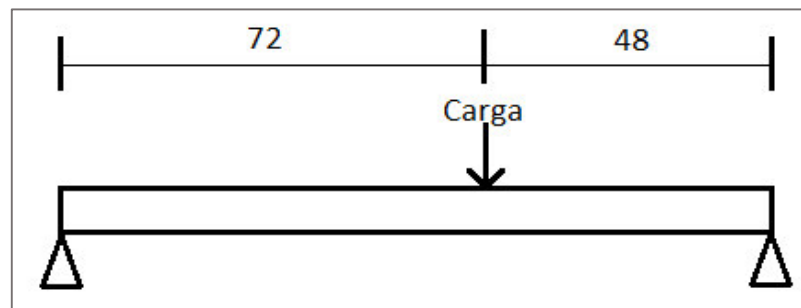


Figura 53 Representación gráfica ensayo a flexión

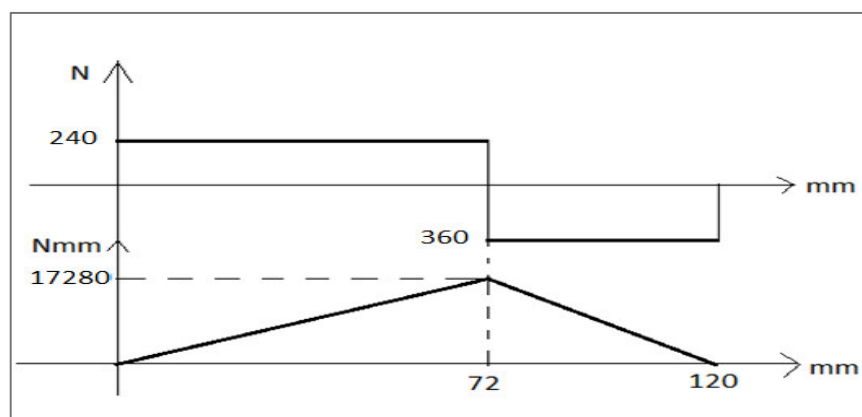


Figura 54 Diagramas fuerza cortante y momento flector

- **Carga 700N**

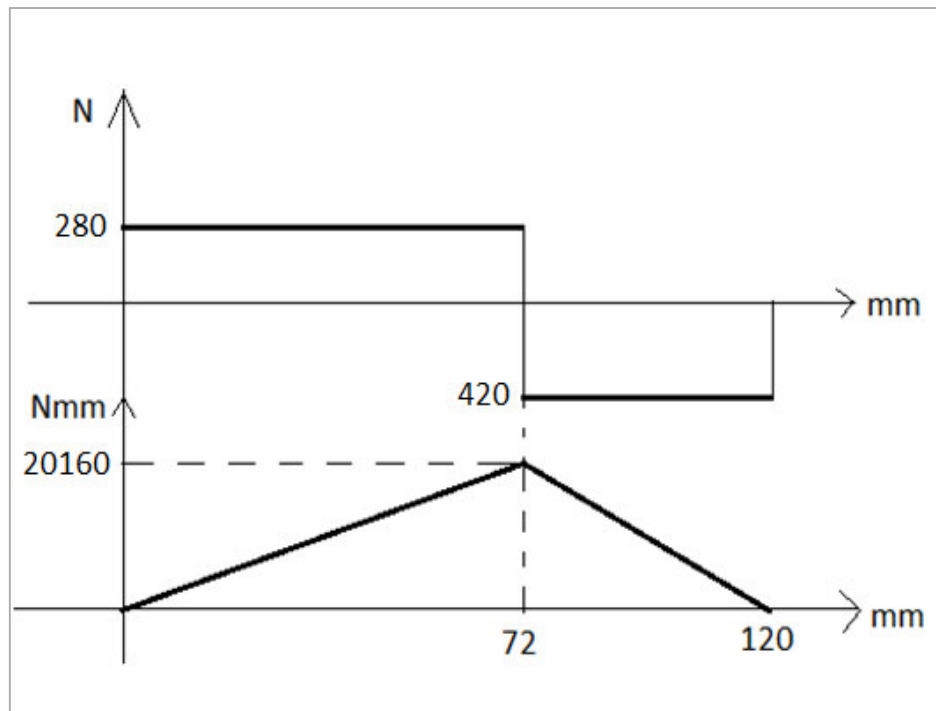


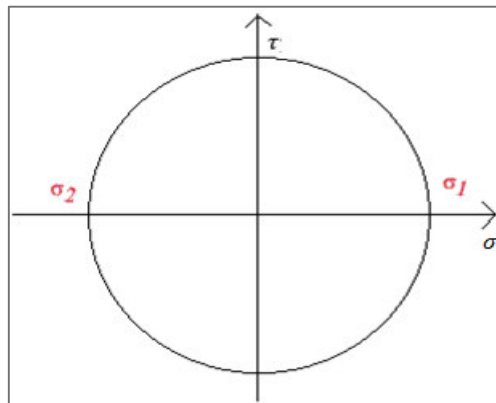
Figura 55 Diagramas fuerza cortante y momento flector

Tabla 17:
Resultados análisis teórico probeta 1 flexión

Carga	Momento Flector	Distancia al eje neutro	Inercia	Esfuerzo
600N	17280Nmm	15mm	20250	12.80Mpa
700N	20160Nmm	15mm	20250	14.93Mpa

4.1.4. Ensayo de torsión

Como se observó en el ensayo de fotoelasticidad y en la simulación, la diferencia de los esfuerzos principales en el ensayo de torsión pura es siempre cero, esto se puede demostrar analizando el círculo de Mohr para el estado de esfuerzos de un elemento diferencial.



$$\tau_{yx} = \tau_{xy}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = 0$$

Al formarse un círculo con centro en el origen los esfuerzos principales tienen la misma magnitud por lo tanto:

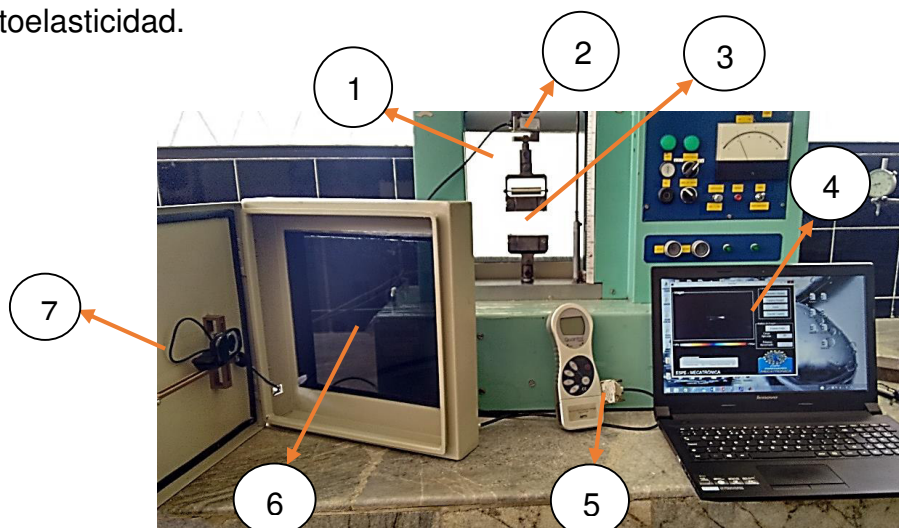
$$\sigma_1 - \sigma_2 = 0$$

4.2. Montaje y parámetros de los ensayos fotoelásticos

4.2.1 Ensayo de Fotoelasticidad

El análisis fotoelástico de las probetas, se lo realizó utilizando los gabinetes diseñados en el capítulo anterior, que son los encargados de realizar el acondicionamiento de la luz, al igual que las imágenes fotoelásticas las cuales fueron adquiridas e interpretadas por medio del software diseñado anteriormente.

A continuación se muestra el equipo necesario para realizar el ensayo de fotoelasticidad.



1. Fuente de luz continua y polarizada.
2. Celda de carga.
3. Probeta.
4. Computador con el software de fotoelasticidad.
5. Acondicionador de señal.
6. Analizador.
7. Cámara Web.

4.2.2 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se lo realizó a 6 tipos de probetas con distintas formas y concentradores de esfuerzos, a las cuales se les aplicó dos valores de cargas distintas, tomando en cuenta el límite de fluencia del material para permanecer siempre en la zona elástica y no producir la fractura o deformación permanente de las probetas.



Figura 56 Montaje ensayo tracción

Como se puede observar en la Figura 56 Montaje ensayo tracción, para realizar el ensayo fotoelástico de tracción es necesario colocar los filtros polarizadores, probeta de ensayo, la cámara de video, la celda de carga con su acondicionador de señal y el software de fotoelasticidad.

4.2.3 Ensayo de compresión

El ensayo de compresión se lo realizó a 2 tipos de probetas con distintas formas y concentradores de esfuerzos, a las cuales se les aplicó dos valores de cargas distintas, tomando en cuenta el límite de fluencia del material para

permanecer siempre en la zona elástica y no producir la fractura o deformación permanente de las probetas.



Figura 57 Montaje ensayo compresión

El montaje del ensayo a compresión como se puede observar en la Figura 57, es muy similar al montaje de tracción, con la diferencia que la carga se la aplica en sentido contrario al de tracción.

4.2.4 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión se lo realizó a 2 tipos de probetas con distintas formas y concentradores de esfuerzos, a las cuales se les aplicó dos valores de cargas distintas, tomando en cuenta el límite de fluencia del material para permanecer siempre en la zona elástica y no producir la fractura o deformación permanente de las probetas.



Figura 58 Montaje ensayo flexión

Para el montaje de ensayo fotoelástico de flexión es necesario cambiar el tipo de mordazas, para éste ensayo se utilizó carga puntual, también es importante colocar los apoyos en los extremos de la probeta.

4.2.5 Ensayo de torsión

Para concluir con los ensayos de fotoelasticidad se procedió a ensayar las últimas dos probetas bajo torsión pura, como en los anteriores ensayos se procuró trabajar en el límite elástico del material. Para éste ensayo se utilizó la máquina de torsión del laboratorio de mecánica de materiales.



Figura 59 Montaje ensayo torsión

Como se observa en la Figura 59 Montaje ensayo torsión, el montaje de los equipos en la máquina de torsión es similar al utilizado en la máquina de ensayos MTS.

4.3. Cálculo de elemento finito

Para la simulación de las probetas en los diferente ensayos se utilizó un software CAE el cual se basa en el análisis de elementos finitos. Para una mejor comprensión de éste tipo de análisis, a continuación se presenta el análisis de un elemento finito triangular de acrílico de 3mm de espesor, módulo de elasticidad 3000MPa y coeficiente de Poisson 0,33.

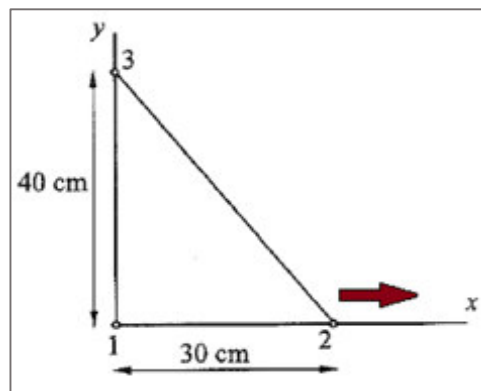


Figura 60 Elemento finito

Coordenadas de los vértices

$$\begin{array}{ll} x_i = 0 & y_i = 0 \\ x_j = 300 & y_j = 0 \\ x_m = 0 & y_m = 400 \end{array}$$

Calculando las dimensiones de elemento finito

$$\begin{array}{lll} \beta_i = y_j - y_m = -400 & \beta_j = y_m - y_i = 400 & \beta_m = y_i - y_j = 0 \\ \gamma_i = x_m - x_j = -300 & \gamma_j = x_i - x_m = 0 & \gamma_m = x_j - x_i = 300 \end{array}$$

Calculamos el área del elemento finito

$$\text{Área} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix} = 60000 \text{mm}^2$$

Se establece la matriz de coordenadas nodales

$$B = \frac{1}{2 \cdot \text{Área}} \begin{pmatrix} \beta_i & 0 & \beta_j & 0 & \beta_m & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & \gamma_j & 0 & \gamma_m \\ \gamma_i & \beta_i & \gamma_j & \beta_j & \gamma_m & \beta_m \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -3.33 \times 10^{-3} & 0 & 3.33 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2.5 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 & 2.5 \times 10^{-3} \\ -2.5 \times 10^{-3} & -3.33 \times 10^{-3} & 3.33 \times 10^{-3} & 0 & 2.5 \times 10^{-3} & 0 \end{pmatrix}$$

Se establece la matriz de deformaciones, donde:

$D = \text{Matriz de deformaciones}$

$E = \text{Módulo de elasticidad}$

$\nu = \text{Coeficiente de poisson}$

$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.367 \times 10^3 & 1.111 \times 10^3 & 0 \\ 1.111 \times 10^3 & 3.367 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 1.128 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Donde la matriz de rigidez está definida por:

$$K = t * \text{Área} * B^T * D * B$$

Ecuación 21

Donde:

$K = \text{Matriz de rigidez}$

$t = \text{espesor}$

$B^T = \text{Transpuesta de la matriz } B$

$D = \text{Matriz de deformación}$

$B = \text{Matriz de coordenadas nodales}$

$$= \begin{pmatrix} 8.002 \times 10^3 & 3.358 \times 10^3 & -6.733 \times 10^3 & -1.692 \times 10^3 & -1.269 \times 10^3 & -1.666 \times 10^3 \\ 3.358 \times 10^3 & 6.043 \times 10^3 & -1.666 \times 10^3 & -2.256 \times 10^3 & -1.692 \times 10^3 & -3.787 \times 10^3 \\ -6.733 \times 10^3 & -1.666 \times 10^3 & 6.733 \times 10^3 & 0 & 0 & 1.666 \times 10^3 \\ -1.692 \times 10^3 & -2.256 \times 10^3 & 0 & 2.256 \times 10^3 & 1.692 \times 10^3 & 0 \\ -1.269 \times 10^3 & -1.692 \times 10^3 & 0 & 1.692 \times 10^3 & 1.269 \times 10^3 & 0 \\ -1.666 \times 10^3 & -3.787 \times 10^3 & 1.666 \times 10^3 & 0 & 0 & 3.787 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Siendo

$F = \text{Matriz de fuerzas}$

$U = \text{Deformaciones}$

$$F = \begin{pmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ 1000 \\ f_{yj} \\ f_{xm} \\ f_{ym} \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{pmatrix}$$

Utilizando la siguiente ecuación resolvemos el sistema de ecuaciones lineales

$$F = K * U$$

Ecuación 22

$$\begin{pmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ f_{xj} \\ f_{yj} \\ f_{xm} \\ f_{ym} \end{pmatrix} = K * \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{pmatrix}$$

Utilizando software matemático obtenemos las respuestas que representan las fuerzas y deformaciones en las coordenadas

$$f_{xi} = -1000N$$

$$f_{yi} = 247.49N$$

$$f_{xm} = 0N$$

$$f_{ym} = 247.49N$$

$$u_j = 0.1485mm$$

$$v_j = 0mm$$

El gráfico ampliado de la deformación del elemento finito es el siguiente

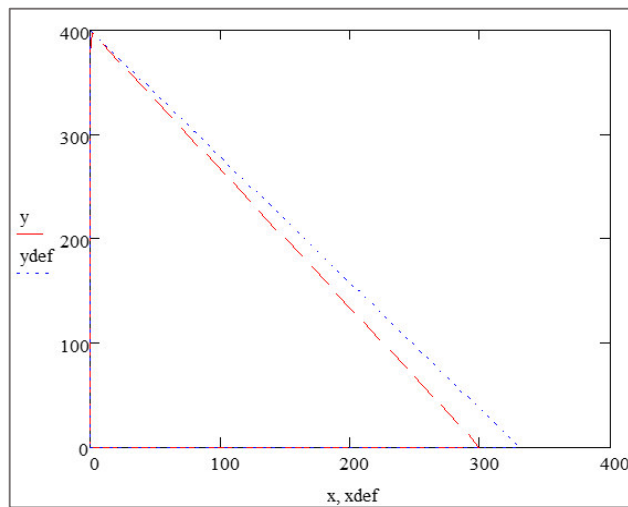


Figura 61 Deformación elemento finito

Una vez encontradas las deformaciones del elemento procedemos a calcular los esfuerzos en las direcciones X, Y y el cortante.

$$\sigma = D * B * \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.667 \\ 5.5 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_x = 16.67 \text{MPa}$$

$$\sigma_y = 5.55 \text{MPa}$$

$$\tau_{xy} = 0$$

Al no haber cortante los esfuerzos principales corresponden a los esfuerzos de los ejes X e Y.

$$\sigma_1 = 16.67 \text{MPa}$$

$$\sigma_2 = 5.55 \text{MPa}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 11.12 \text{MPa}$$

Como se puede observar el análisis de elementos finitos de un solo punto en único elemento resulta un cálculo trabajoso, teniendo en cuenta que el análisis de las probetas de éste trabajo tienen un aproximado de 600 a 700 elementos, realizar el análisis de elementos finitos manualmente resulta un

trabajo imposible, por ésta misma razón a partir de éste punto se realizará el análisis de las probetas mediante el uso de un software especializado.

4.4. Resultados de pruebas a tracción

4.4.1 Probeta 1

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 18:

Parámetros primera carga probeta 1 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
1	3 mm	300N

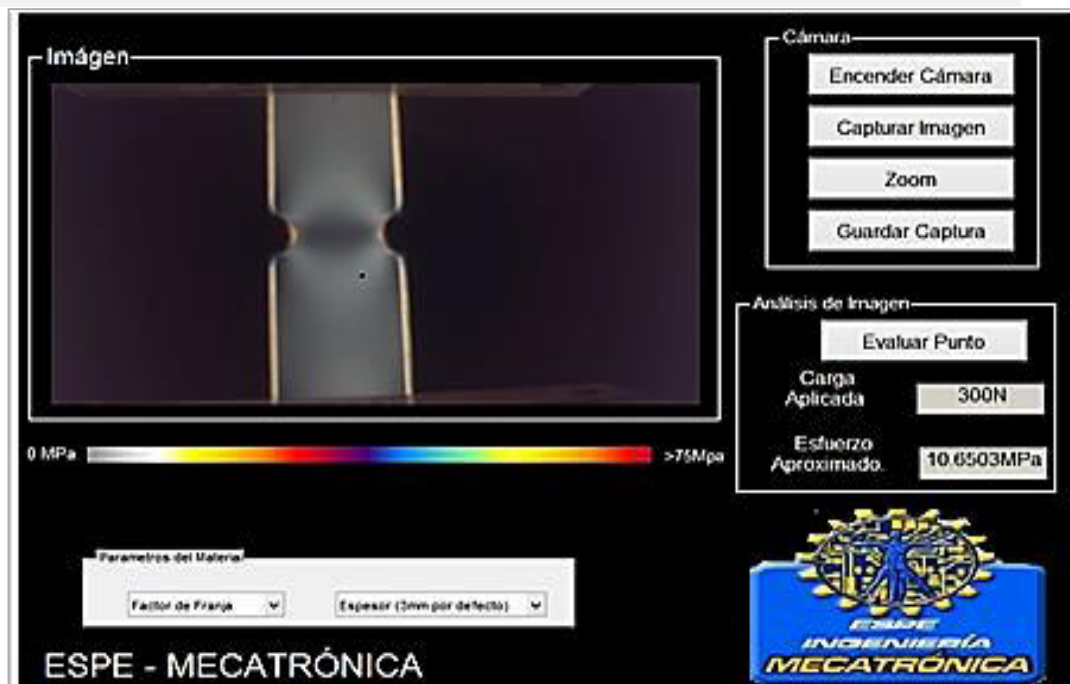


Figura 62 Probeta 1 tracción a 300 N

Tabla 19:

Parámetros segunda carga probeta 1 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
1	3 mm	550N

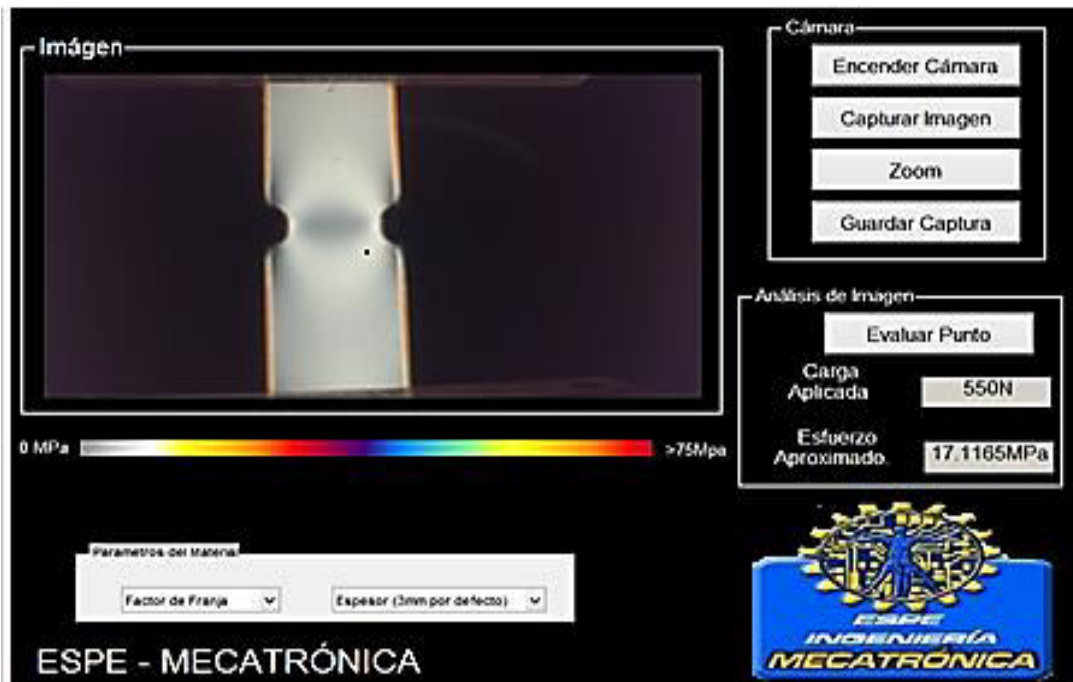


Figura 63 Probeta 1 tracción a 550N

- Simulación

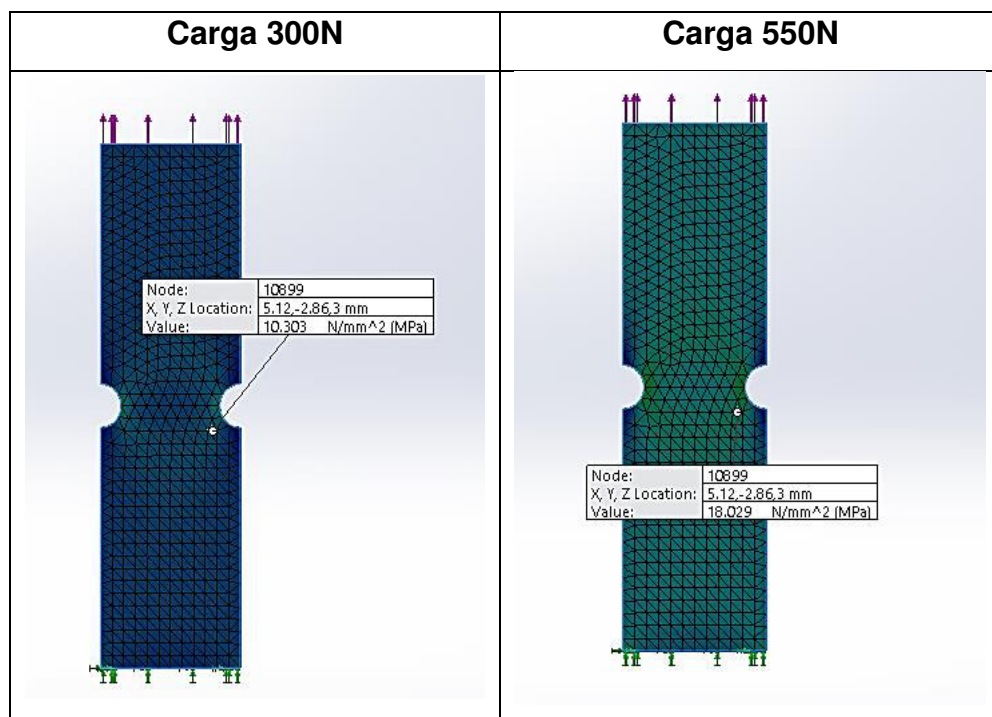


Figura 64 Simulación probeta 1 tracción 300N y 550N

4.4.2 Probeta 2

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 20:

Parámetros primera carga probeta 2 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
2	3 mm	300N

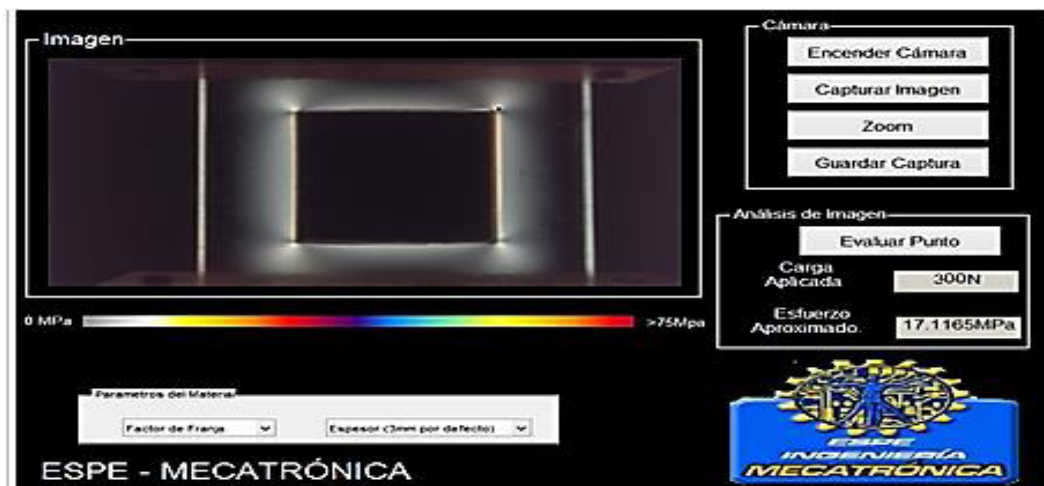


Figura 65 Probeta 2 tracción a 300N

Tabla 21:

Parámetros segunda carga probeta 2 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
2	3 mm	900N

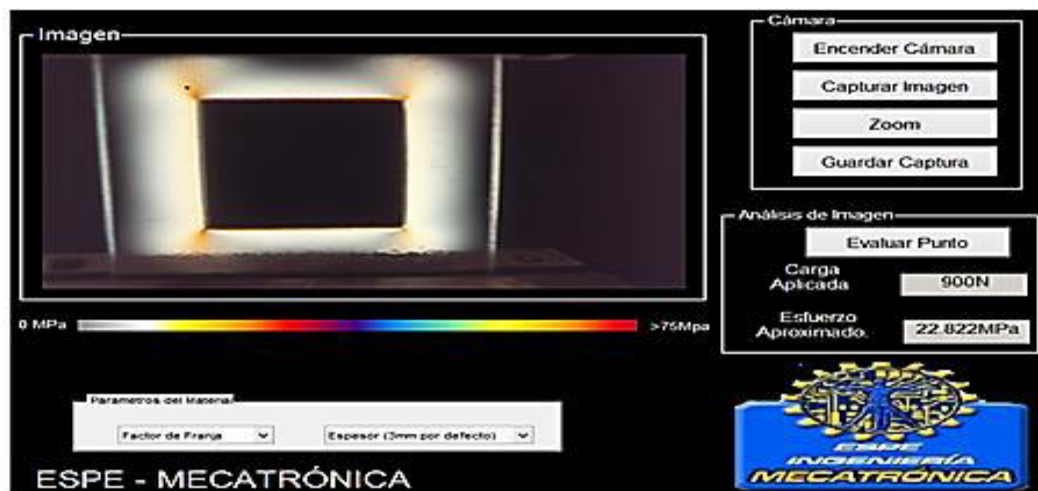


Figura 66 Probeta 2 tracción a 900 N

- Simulación

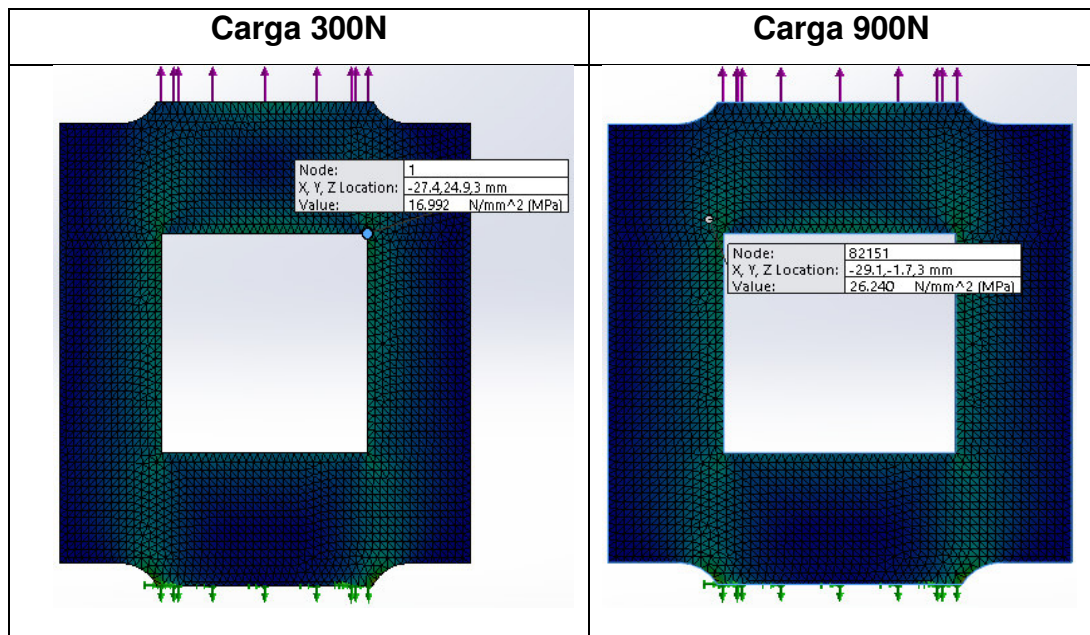


Figura 67 Simulación probeta 2 tracción a 900N

4.4.3 Probeta 3

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 22:

Parámetros primera carga probeta 3 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
3	3 mm	400N

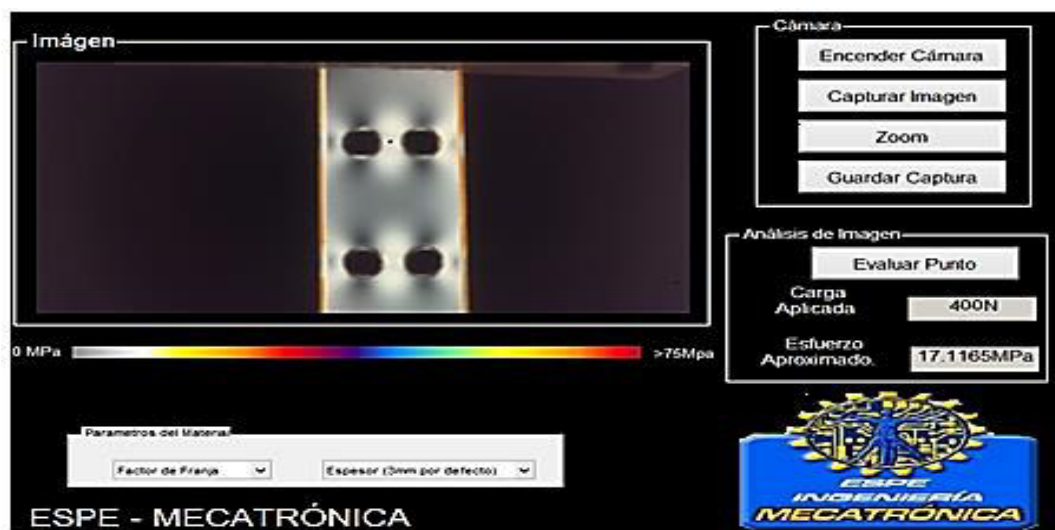


Figura 68 Probeta 3 tracción a 400N

Tabla 23:
Parámetros segunda carga probeta 3 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
3	3 mm	750N

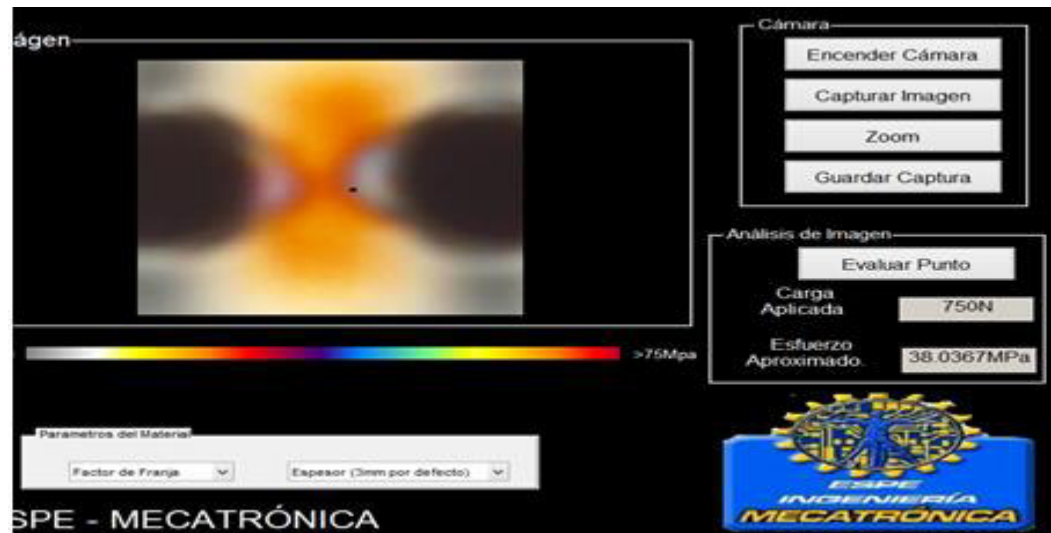


Figura 69 Probeta 3 a 750N

- Simulación

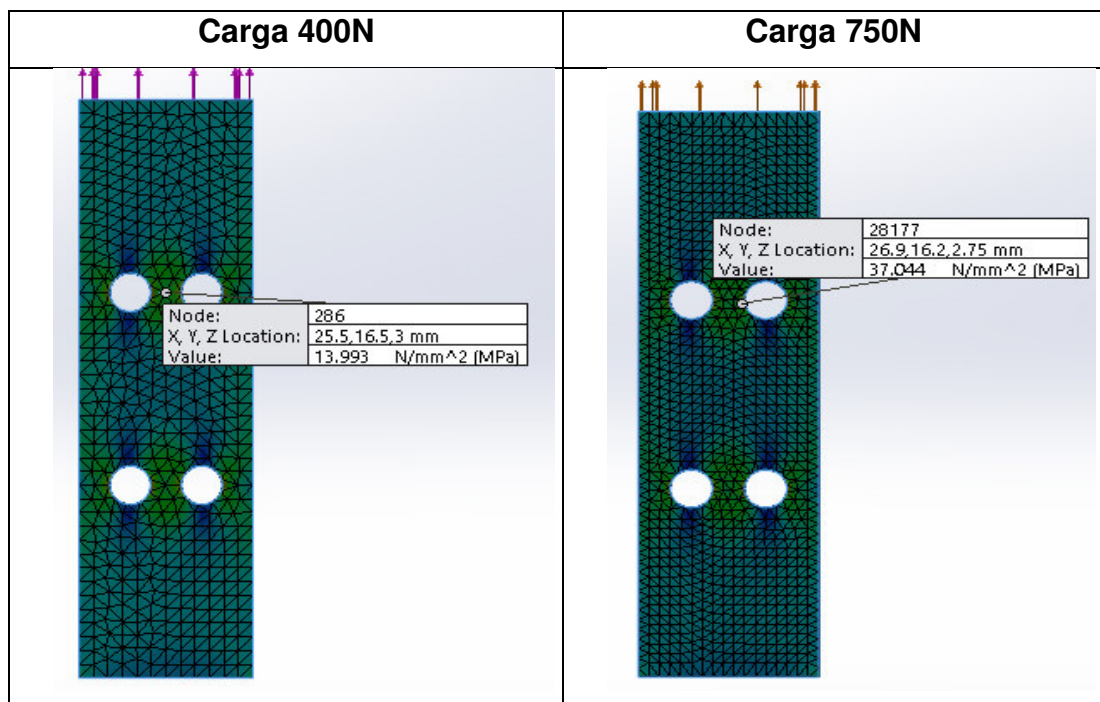


Figura 70 Simulación probeta 3 tracción a 400N y 750N

4.4.4 Probeta 4

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 24:

Parámetros primera carga probeta 4 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
4	3 mm	800N

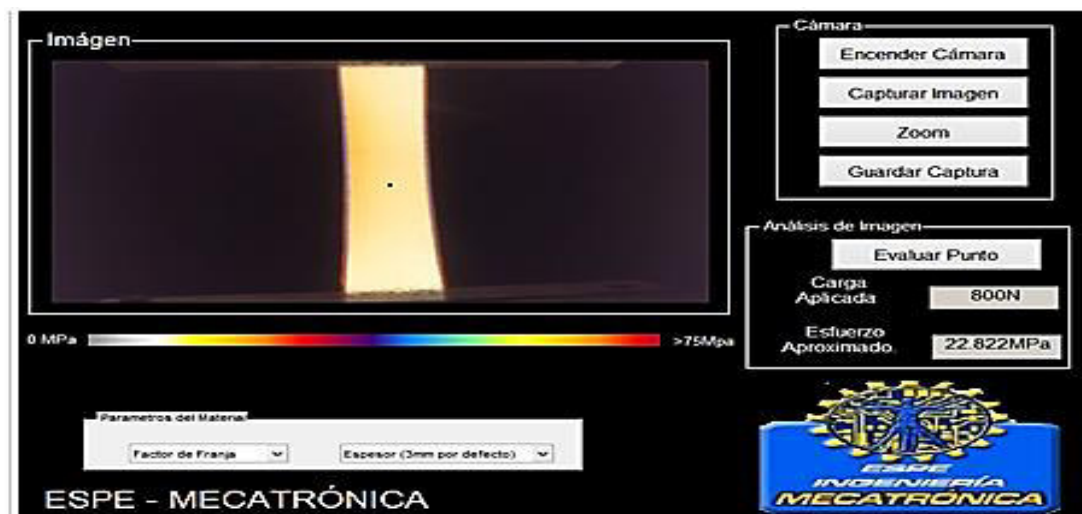


Figura 71 Probeta 4 tracción a 800 N

Tabla 25:

Parámetros segunda carga probeta 4 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
4	3 mm	900N

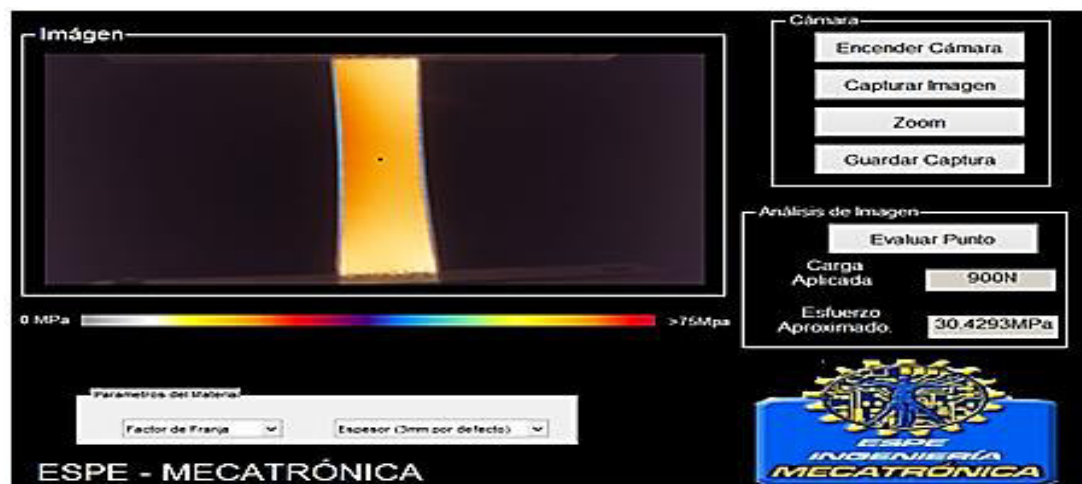


Figura 72 Probeta 4 tracción a 900N

- Simulación

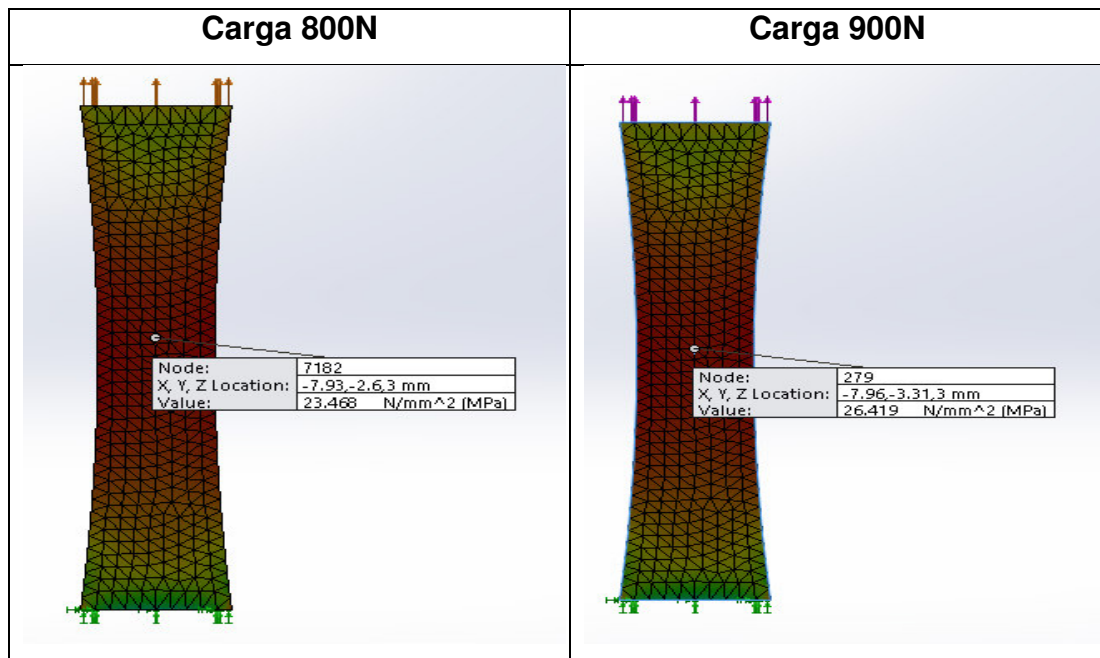


Figura 73 Simulación Probeta 4 tracción a 800N y 900N

4.4.5 Probeta 5

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 26:

Parámetros primera carga probeta 5 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
5	3 mm	800N

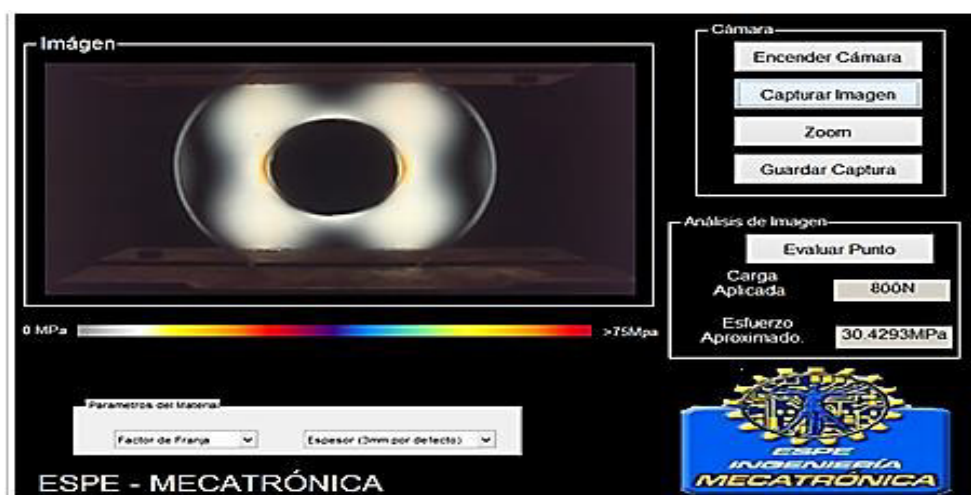


Figura 74 probeta 5 tracción a 800N

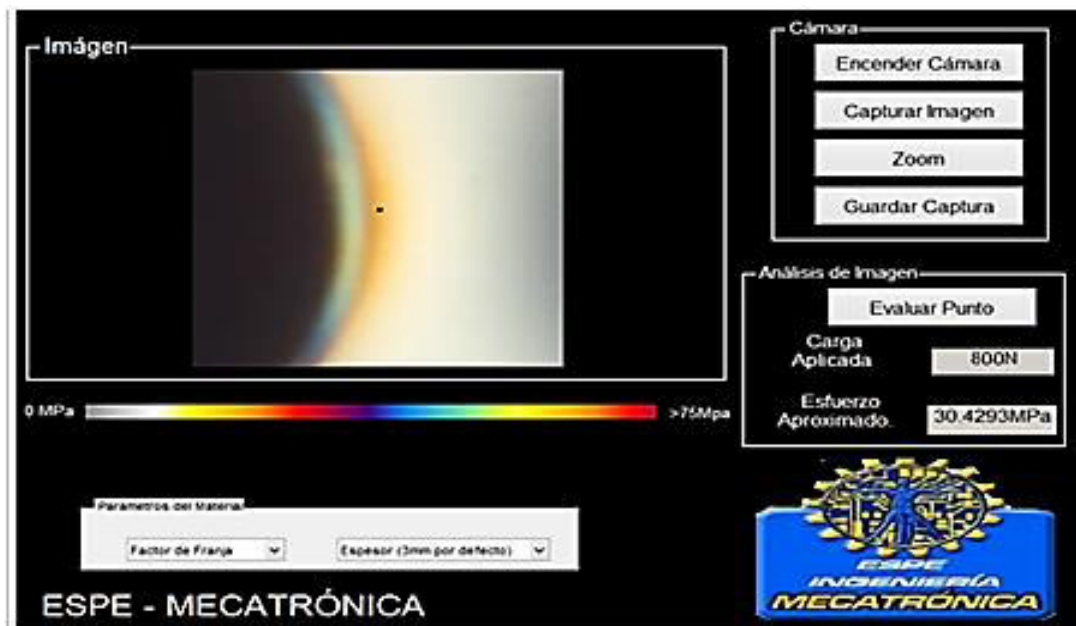


Figura 75 Zoom probeta 5 tracción a 800N

Tabla 27:
Parámetros segunda carga probeta 5 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
5	3 mm	1100N

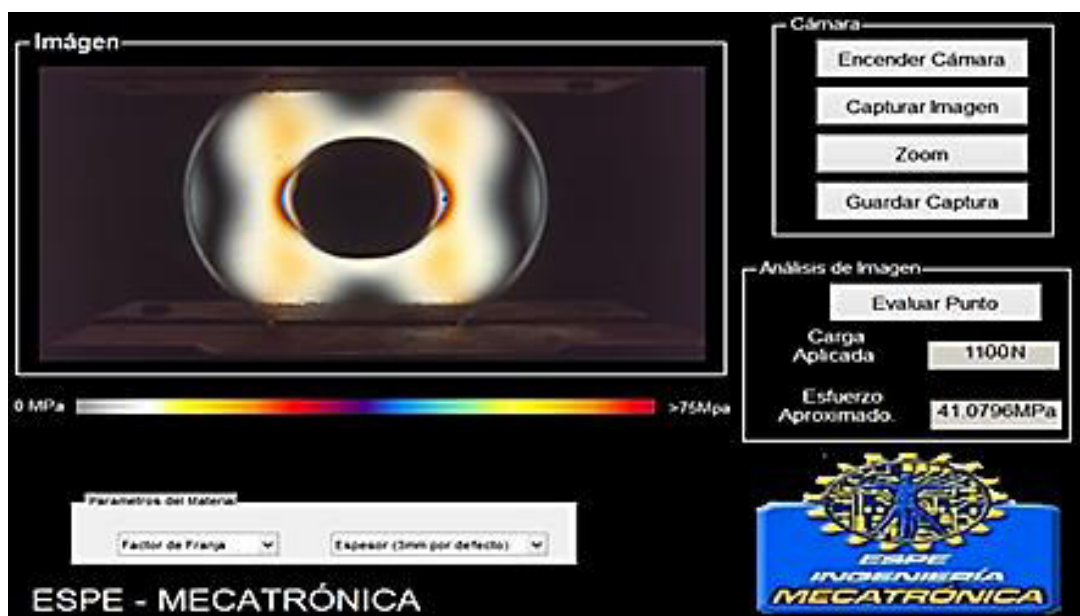


Figura 76 Probeta 6 tracción a 1100N

- Simulación

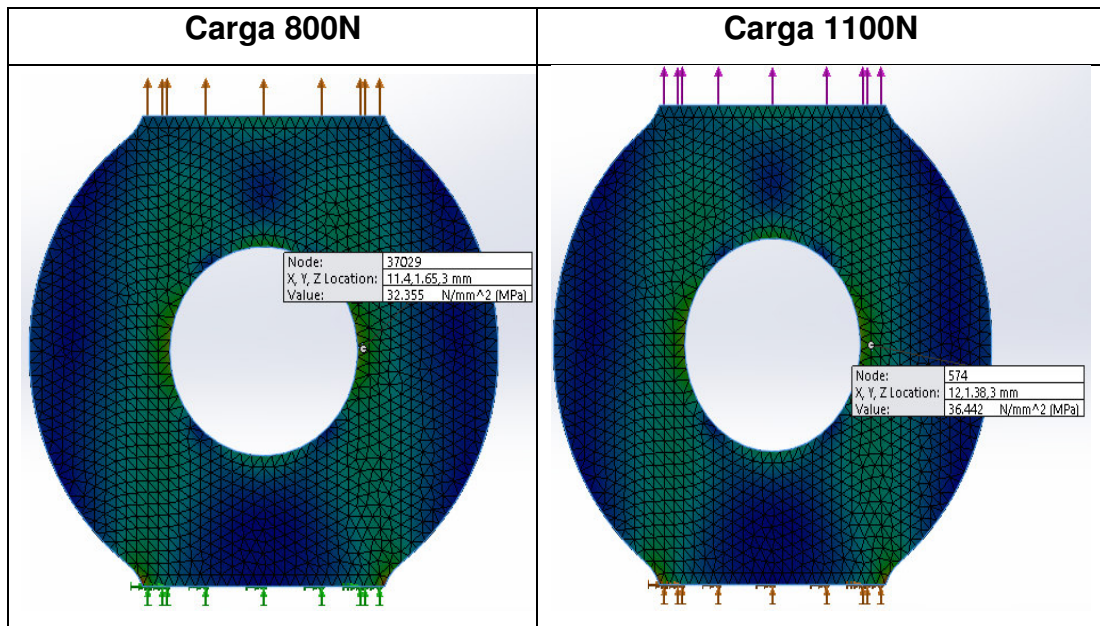


Figura 77 Simulación probeta 5 tracción a 1100N

4.4.6 Probeta 6

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 28:

Parámetros primera carga probeta 6 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
6	6 mm	900N



Figura 78 Probeta 6 tracción a 900N

Tabla 29:
Parámetros segunda carga probeta 6 tracción

Número de Probeta	Espesor	Carga
6	6 mm	1100N

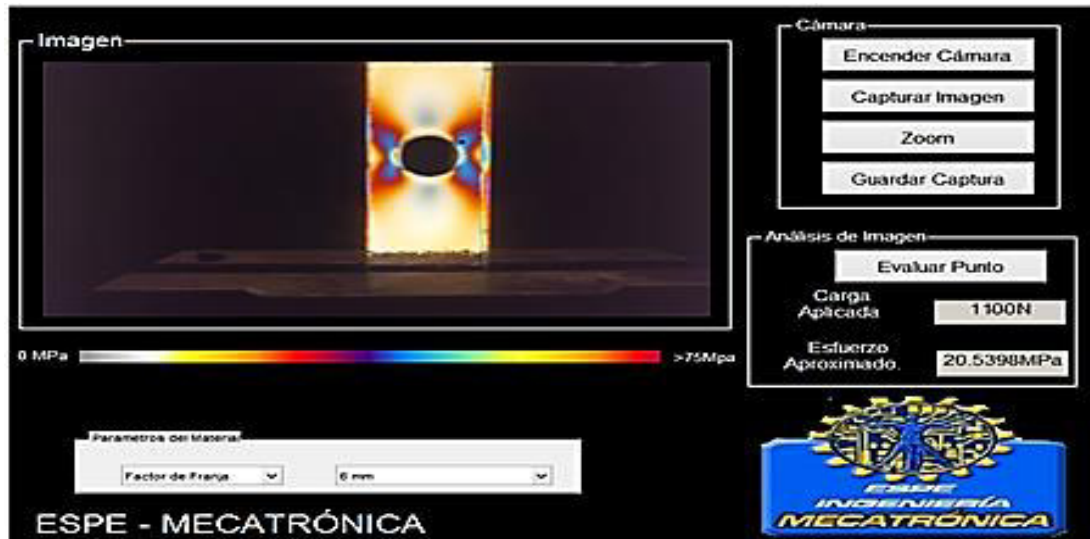


Figura 79 Probeta 6 tracción a 1100N

- Simulación

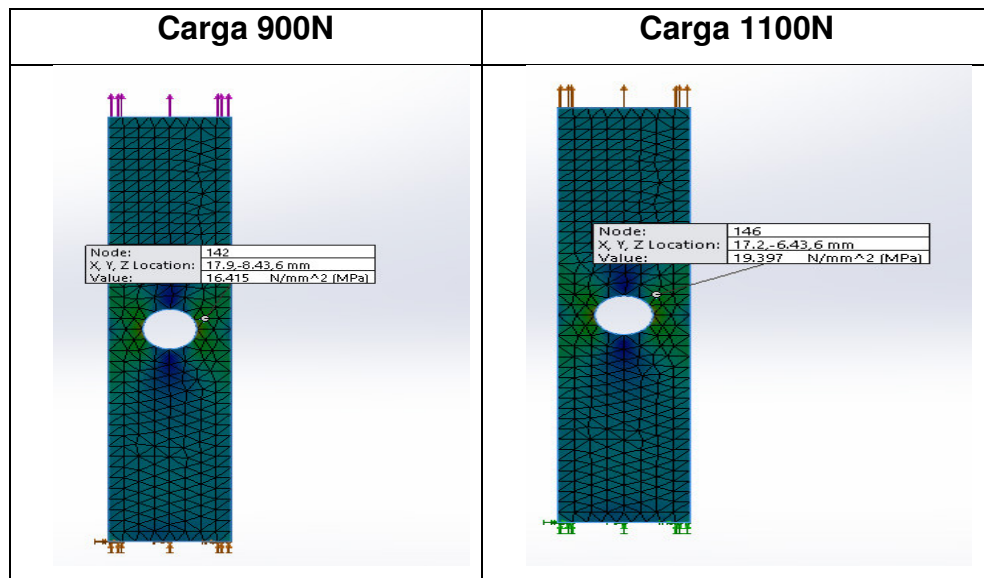


Figura 80: Simulación probeta 6 tracción a 900N y 1100N

4.5. Resultados de pruebas a compresión

4.5.1 Probeta 1

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 30:

Parámetros primera carga probeta 1 compresión

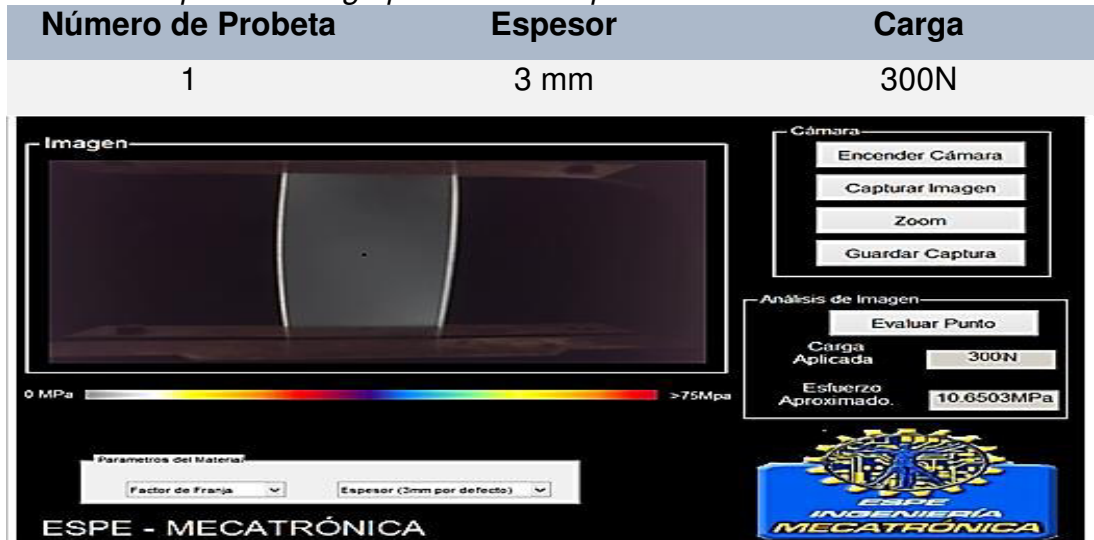


Figura 81 Probeta 1 compresión a 300N

Tabla 31:

Parámetros segunda carga probeta 1 compresión

Número de Probeta	Espesor	Carga
1	3 mm	800N



Figura 82 Probeta 1 compresión a 800N

- Simulación

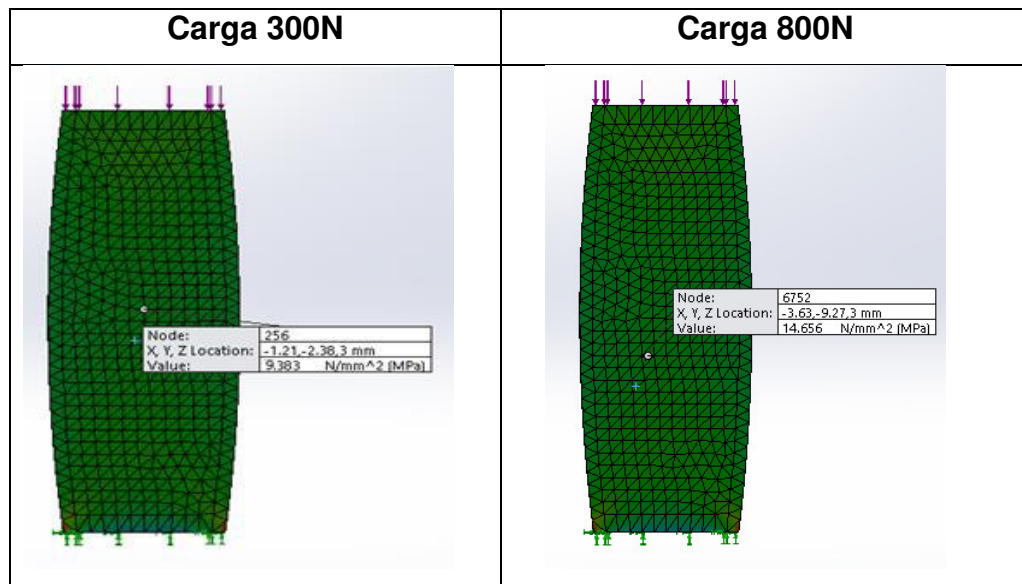


Figura 83 Simulación probeta 1 compresión a 300N y 800N

4.5.2 Probeta 2

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 32:

Parámetros primera carga probeta 2 compresión

Número de Probeta	Espesor	Carga
2	3 mm	300N

Figura 84 Probeta 2 compresión a 300N

Tabla 33:
Parámetros segunda carga probeta 2 compresión

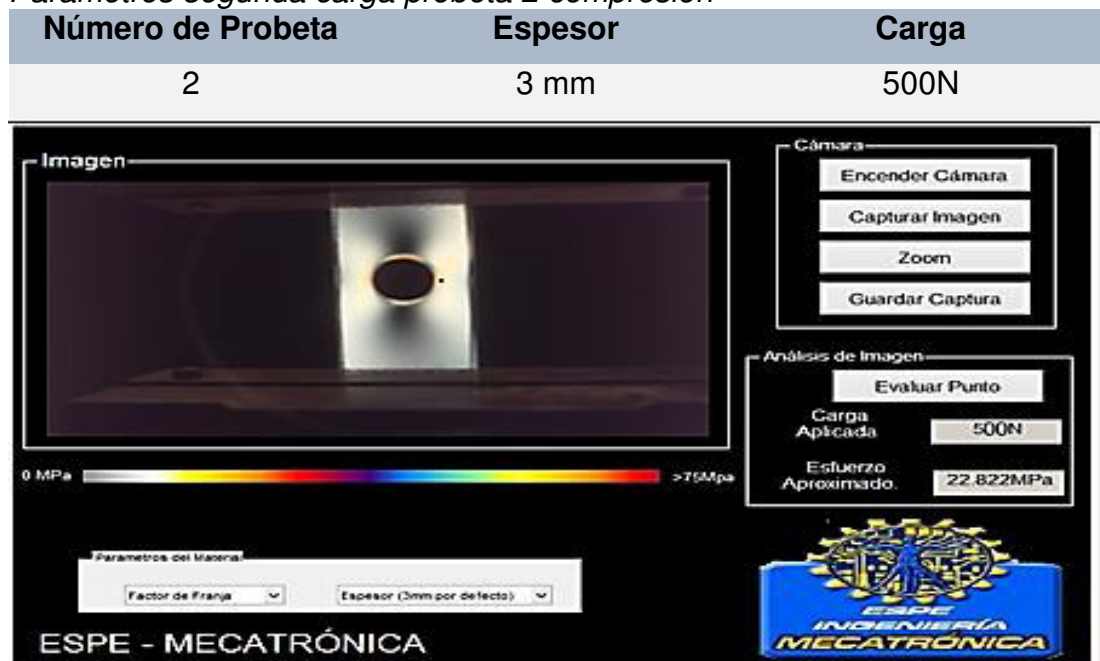


Figura 85 Probeta 2 compresión a 500N

- Simulación

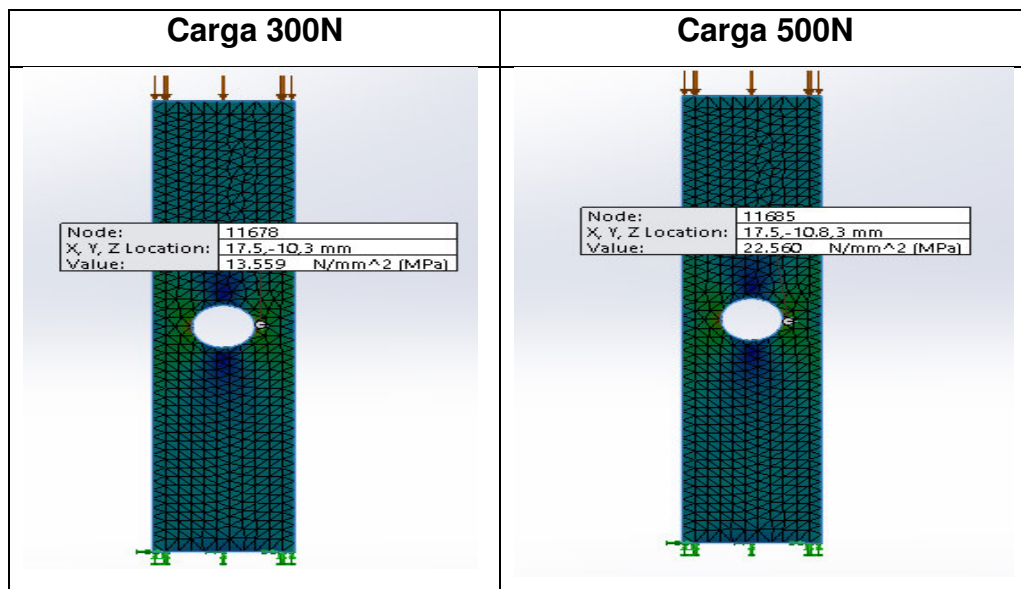


Figura 86 Simulación probeta 1 compresión a 300N y 500N

4.6. Resultados de pruebas a flexión

4.6.1 Probeta 1

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 34:
Parámetros primera carga probeta 1 flexión

Número de Probeta	Espesor	Carga
1	9 mm	400N



Figura 87 Probeta 1 flexión a 400N

Tabla 35:
Parámetros segunda carga probeta 1 flexión

Número de Probeta	Espesor	Carga
1	9 mm	500N

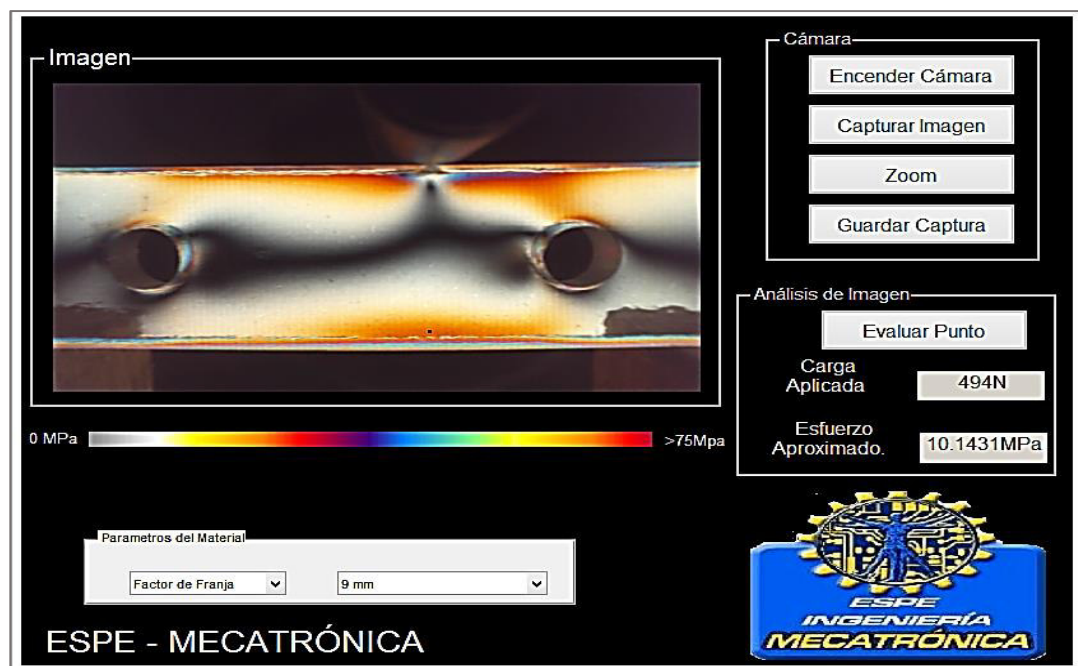


Figura 88 Probeta 1 flexión a 500N

- Simulación

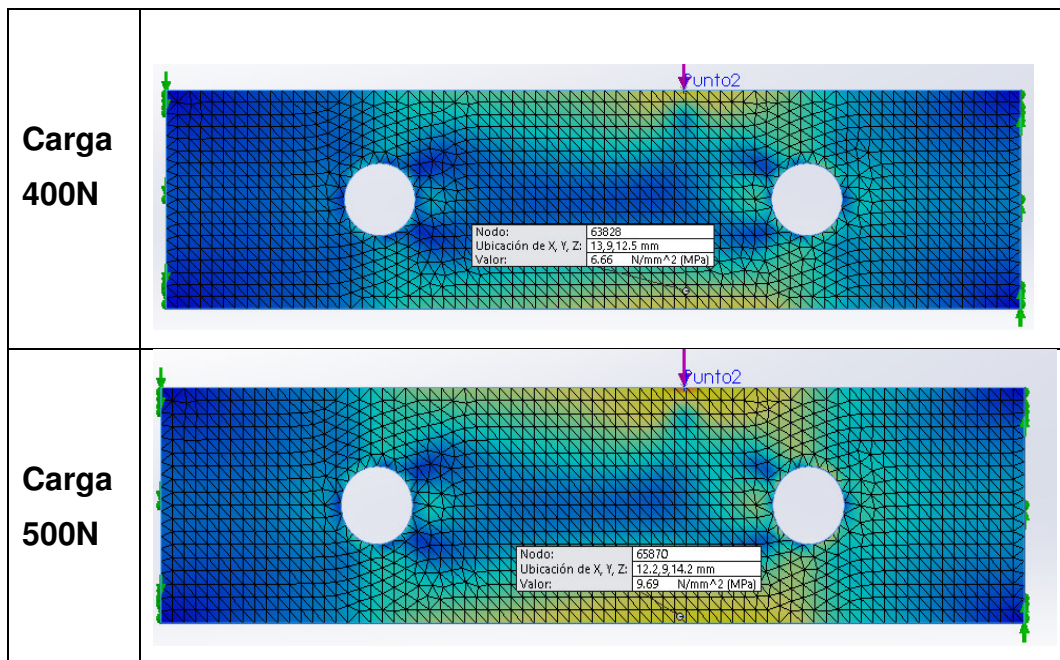


Figura 89 Simulación probeta 1 flexión a 500N

4.6.2 Probeta 2

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 36:
Parámetros primera carga probeta 2 flexión

Número de Probeta	Espesor	Carga
2	9 mm	600N

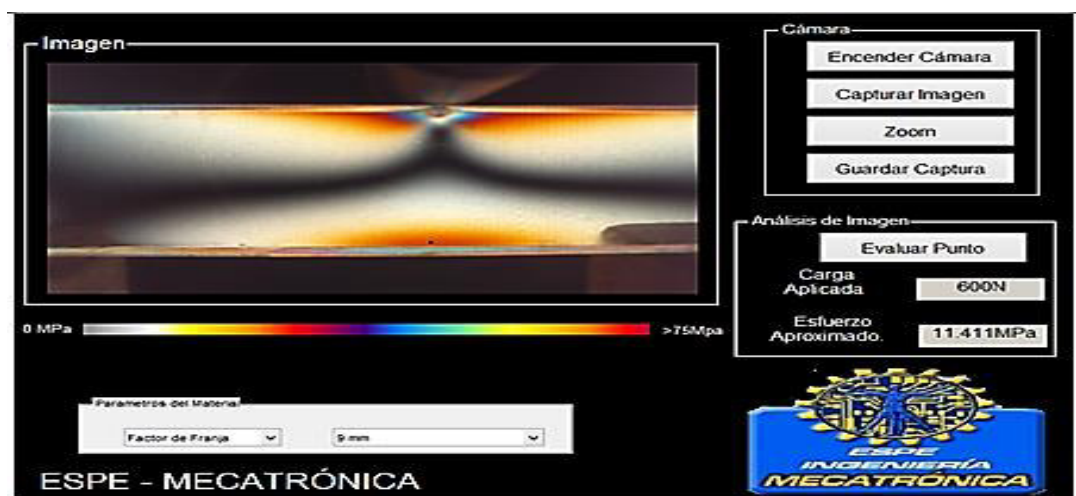


Figura 90 Probeta 2 flexión a 600N

Tabla 37:
Parámetros segunda carga probeta 2 flexión

Número de Probeta	Espesor	Carga
2	9 mm	700N

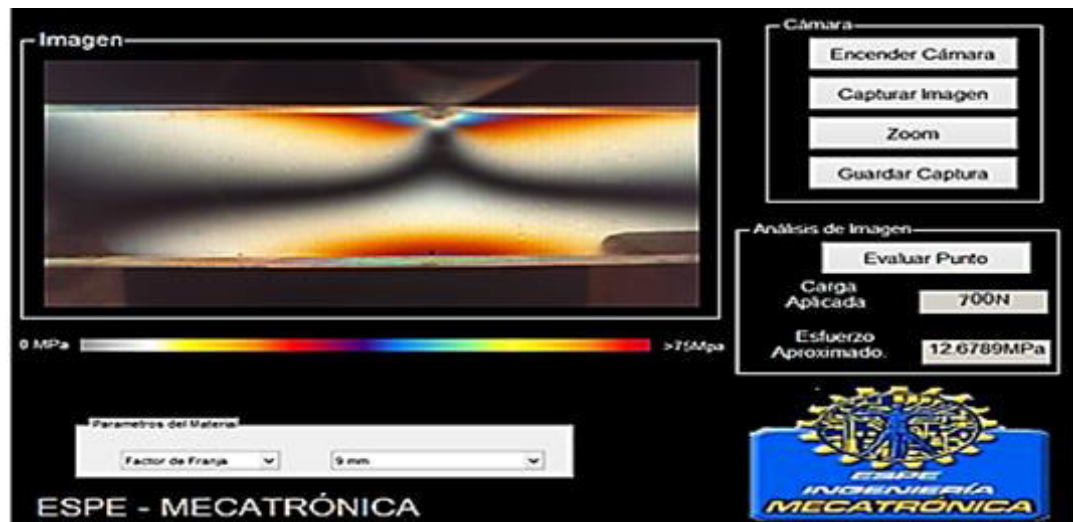


Figura 91 Probeta 2 flexión a 700N

- Simulación

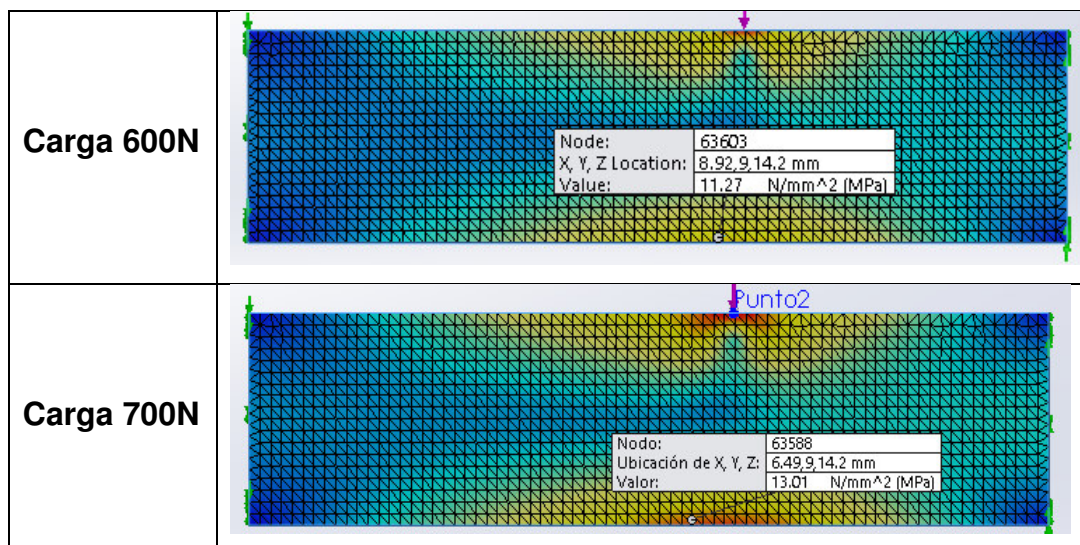


Figura 92 Simulación probeta 2 flexión

4.7. Resultados de pruebas a torsión

4.7.1 Probeta 1

- Ensayo de fotoelasticidad.

Tabla 38:

Parámetros segunda carga probeta 1 torsión

Número de Probeta	Espesor	Carga
1	9 mm	2000Nmm

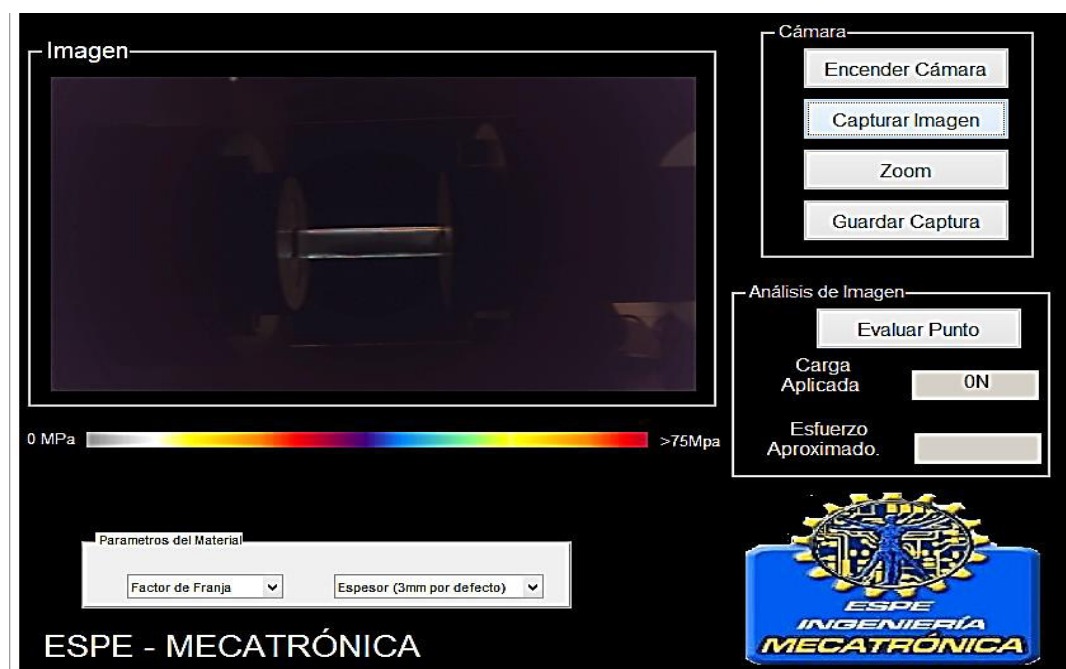


Figura 93 Probeta 1 torsión a 2000Nmm

Tabla 39:

Parámetros segunda carga probeta 1 torsión

Número de Probeta	Espesor	Carga
1	9 mm	4000Nmm

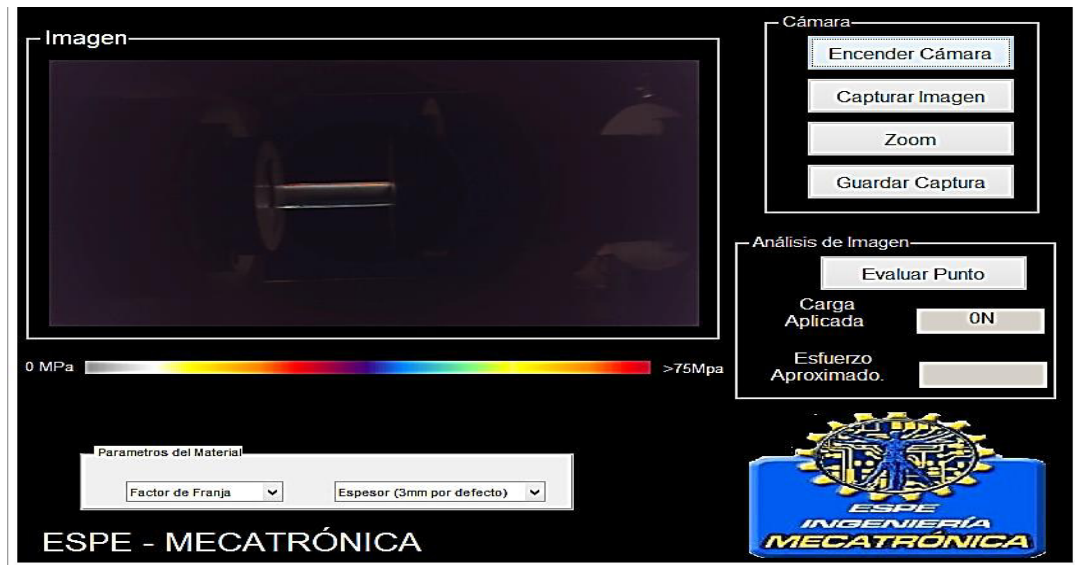


Figura 94 Probeta 1 torsión a 4000Nmm

- Simulación

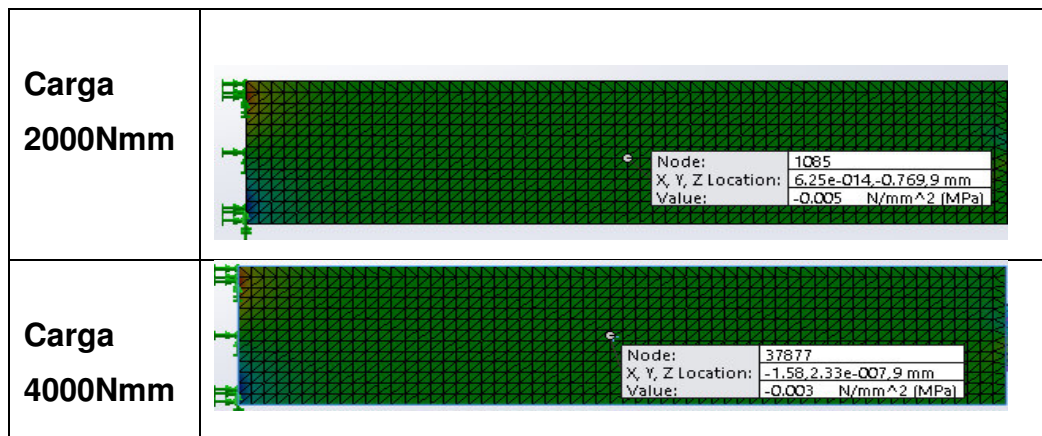


Figura 95 Simulaciones probeta 1 torsión

4.7.2 Probeta 2

- Ensayo de fotoelasticidad

Tabla 40:
Parámetros primera carga probeta 2 torsión

Número de Probeta	Espesor	Carga
2	9 mm	2000Nmm

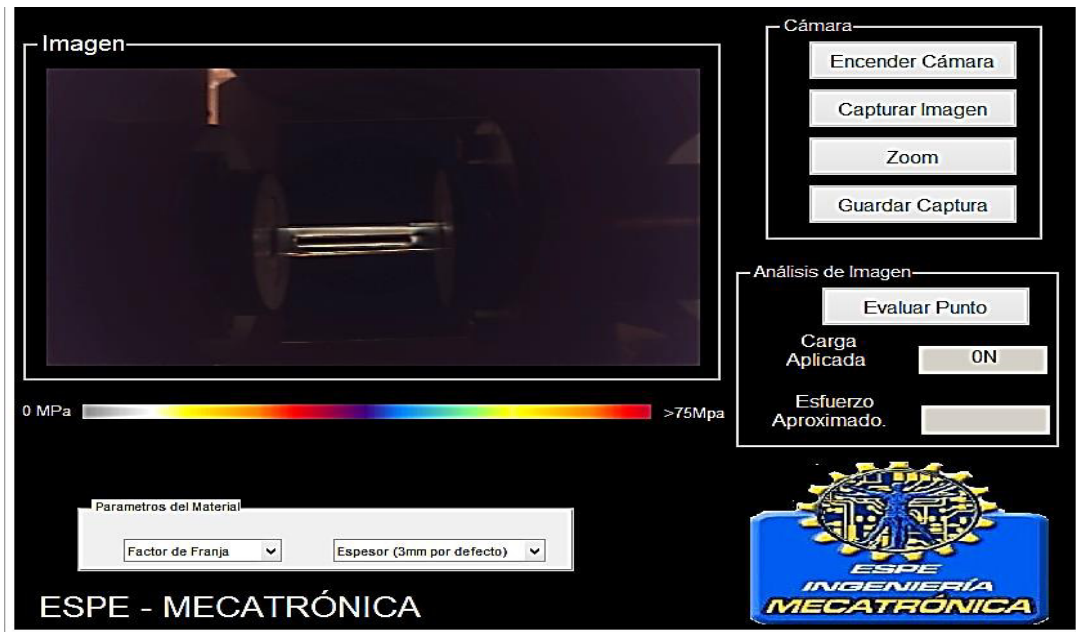


Figura 96 Probeta 2 torsión a 2000Nmm

Tabla 41:
Parámetros primera carga probeta 2 torsión

Número de Probeta	Espesor	Carga
2	9 mm	4000Nmm



Figura 97 Probeta 2 torsión a 4000Nmm

- Simulación

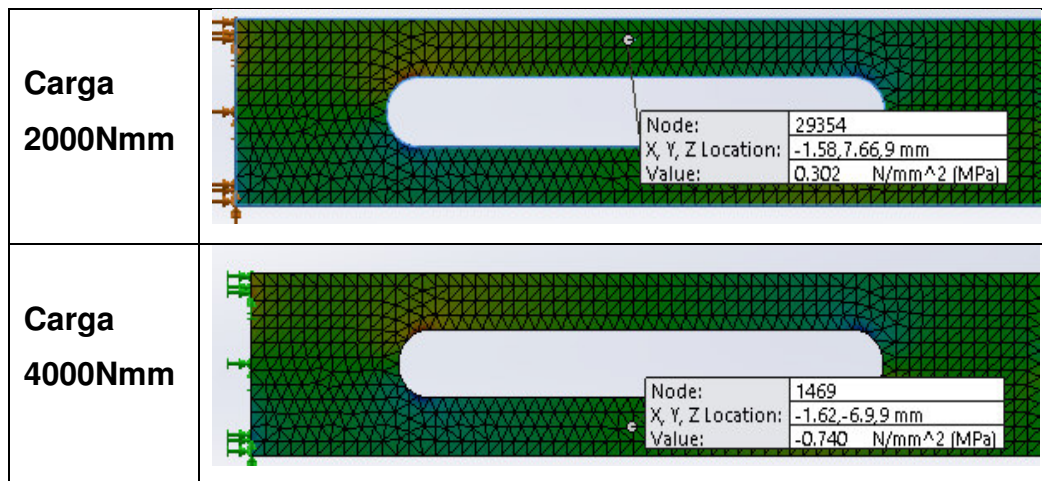
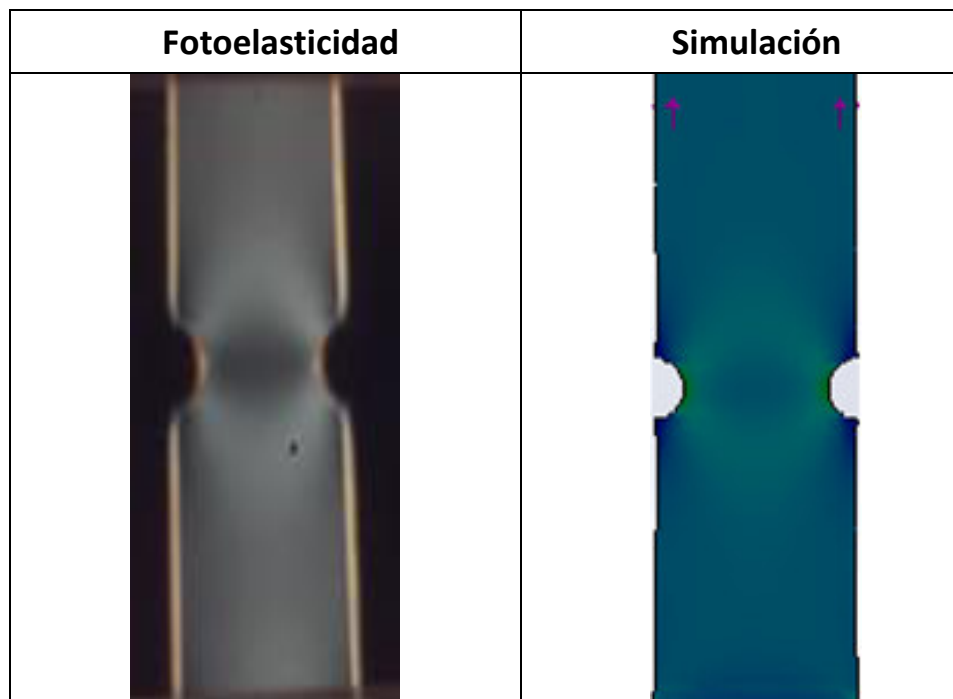


Figura 81 Simulaciones probeta 2 torsión

4.8. Análisis de resultados

4.8.1 Distribución de esfuerzos tracción

- Probeta 1



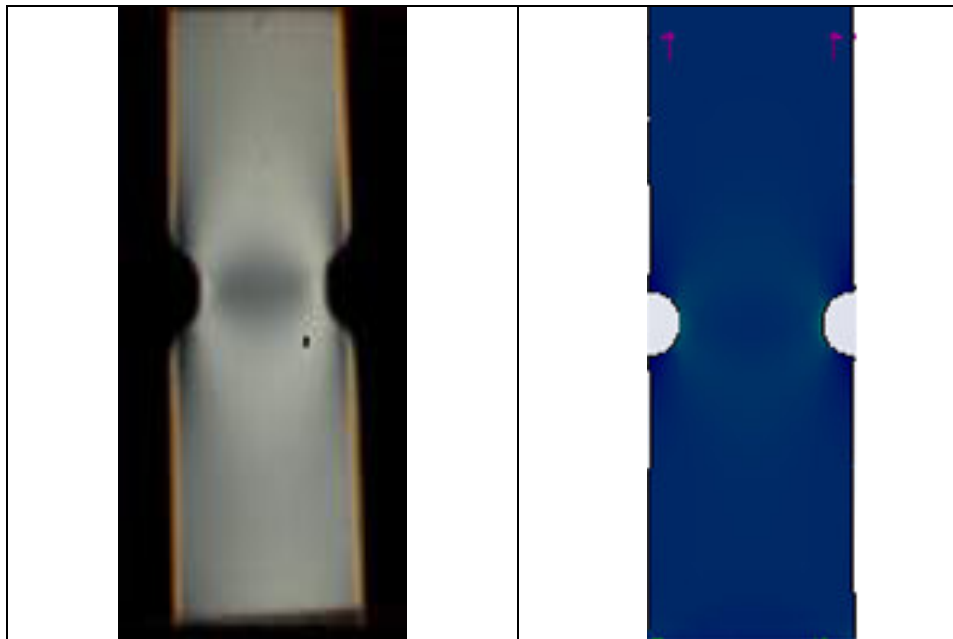


Figura 98 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación

Como se puede observar en la Figura 98 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación, la distribución de esfuerzos obtenida por el análisis de fotoelasticidad es muy similar a la simulación, se observa la formación de arcos en los concentradores de esfuerzos, mientras que en el centro de la probeta el esfuerzo es de menor intensidad y por ende toma un color más oscuro.

- **Probeta 2**

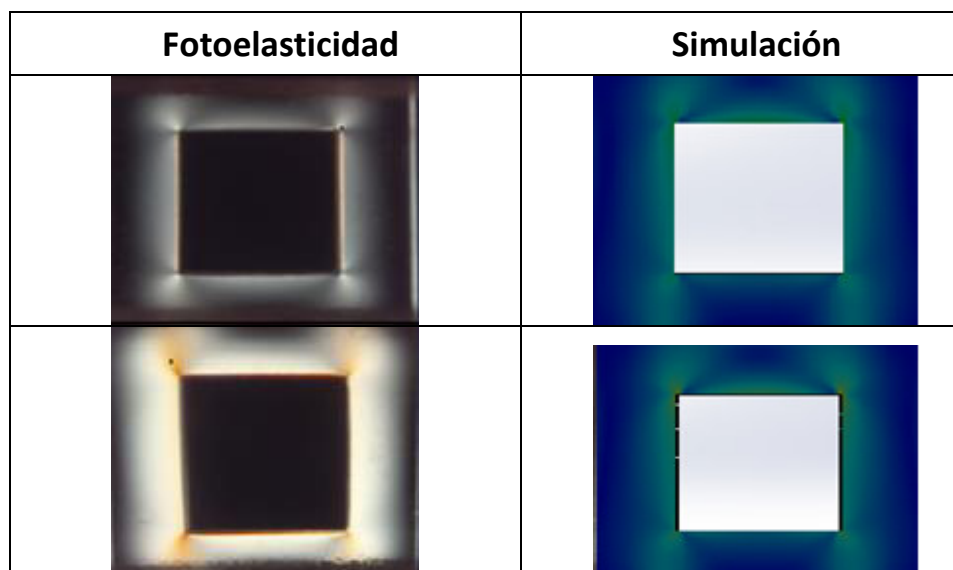


Figura 99 Probeta 2 fotoelasticidad vs simulación

Como se puede observar, tanto en la simulación como en la imagen fotoelástica los concentradores se encuentran en las esquinas del cuadrado central, en donde se forman zonas de mayor intensidad, en las imágenes inferiores se observa también que en los extremos superior e inferior de la probeta existe menos concentración de esfuerzo.

- **Probeta 3**

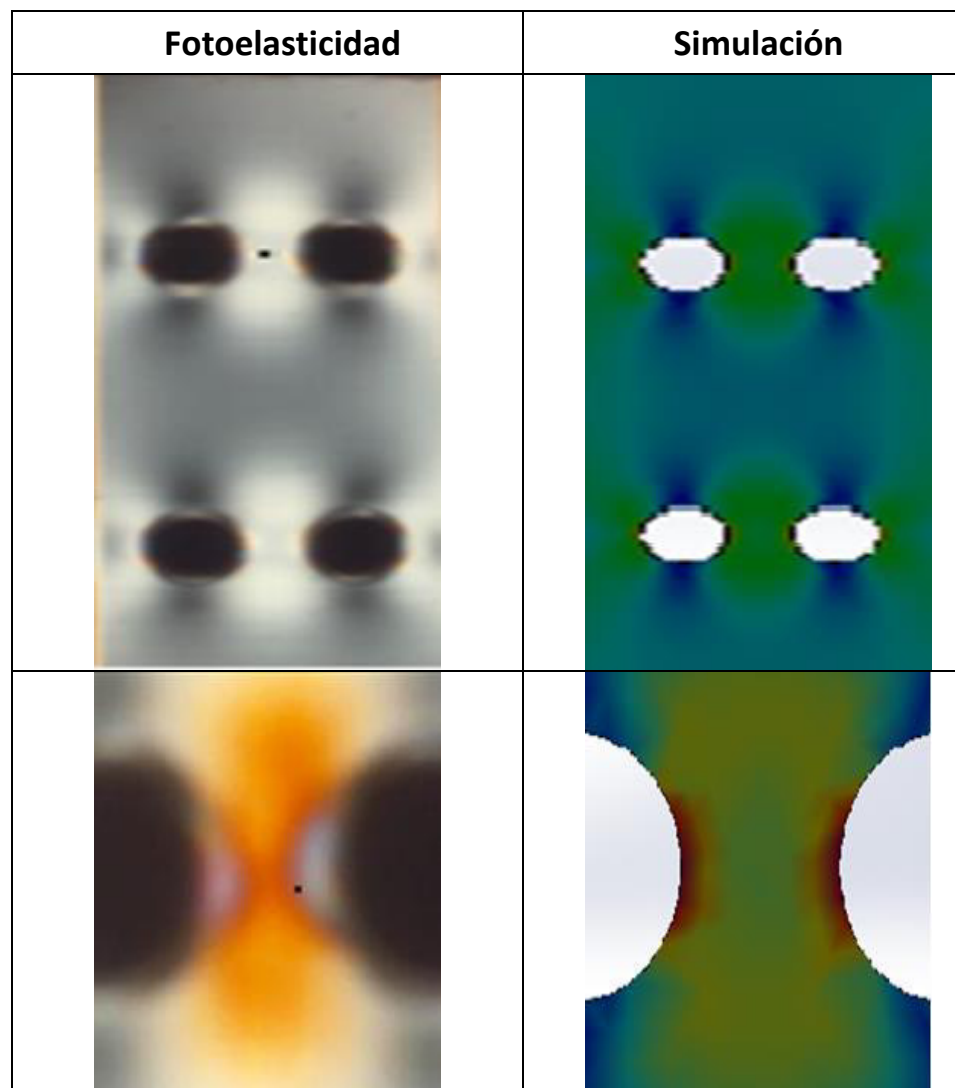


Figura 100 Probeta 3 fotoelasticidad vs simulación

Como se puede observar en la primera figura la mayor concentración de esfuerzos se encuentra entre los dos agujeros, tanto en los superiores como en los inferiores, mientras que en los extremos superiores e inferiores de los agujeros el esfuerzo es muy pequeño. Haciendo un acercamiento a la zona

crítica observamos que los puntos con mayor esfuerzo son los laterales interiores de los círculos.

- **Probeta 4**

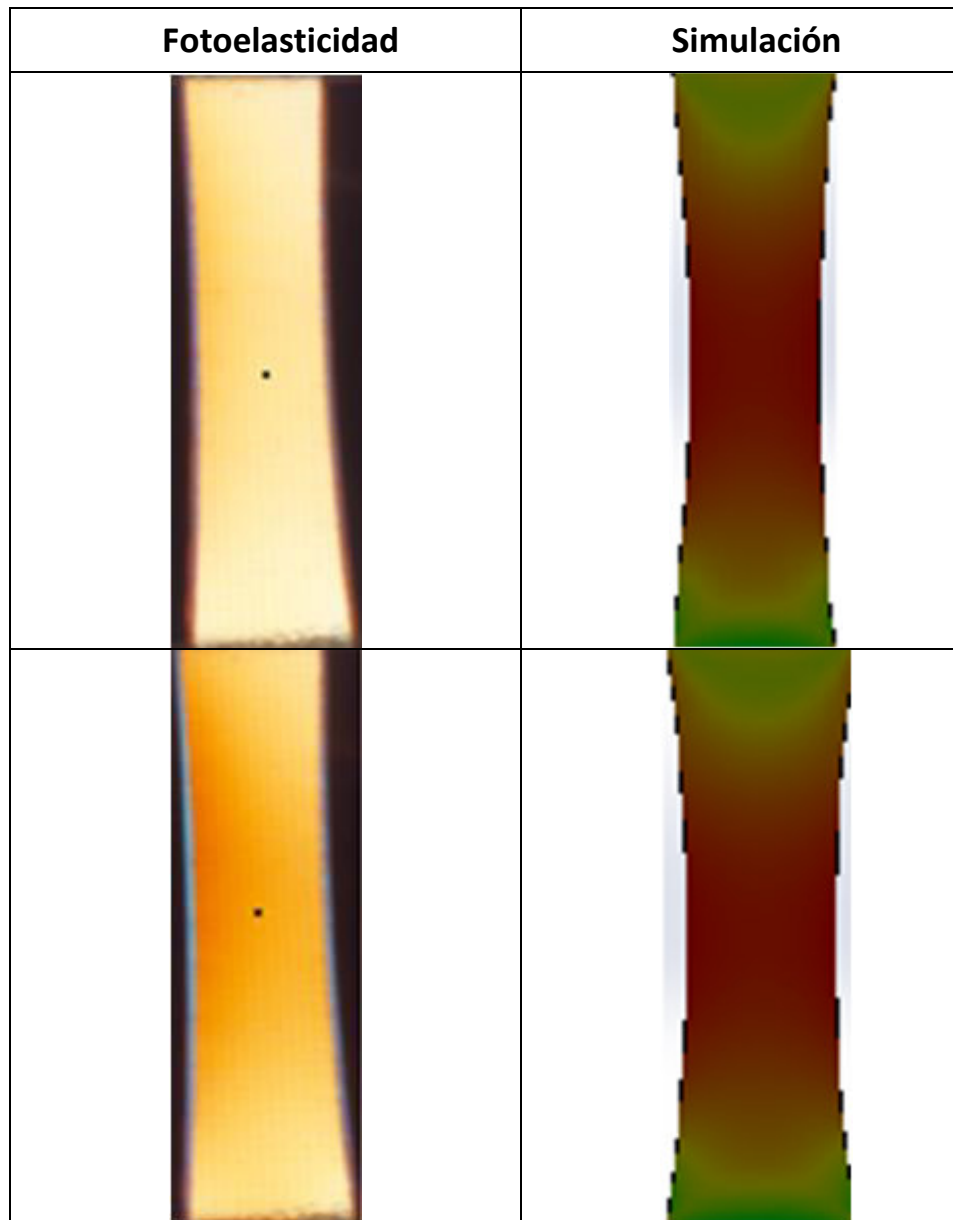


Figura 101 Probeta 4 fotoelasticidad vs simulación

Como se puede observar en la imagen, la zona con mayor concentración de esfuerzos se encuentra en la parte central, y se va disipando a medida que se acerca a los agarres.

- **Probeta 5**

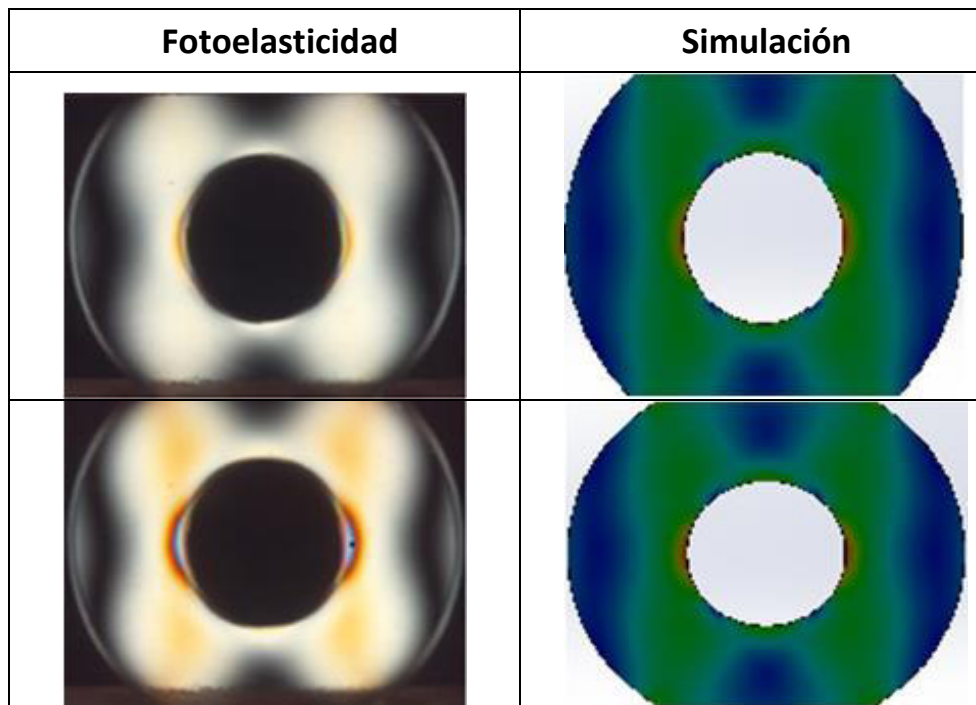
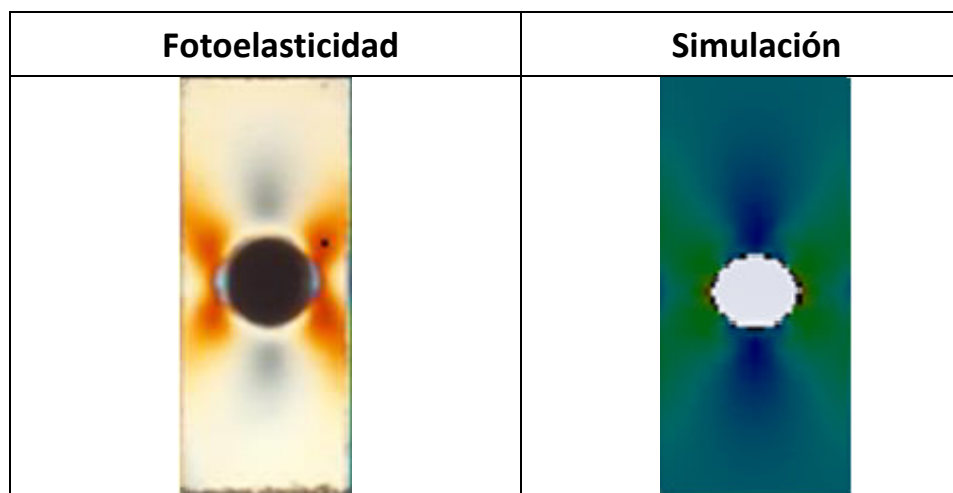


Figura 102 Probeta 5 fotoelasticidad vs simulación

En ésta figura se puede observar que los esfuerzos se concentran en los laterales del agujero mientras que en el lado superior e inferior son de menor magnitud, el resto de patrones en la distribución de esfuerzo es muy similar en ambos ensayos.

- **Probeta 6**



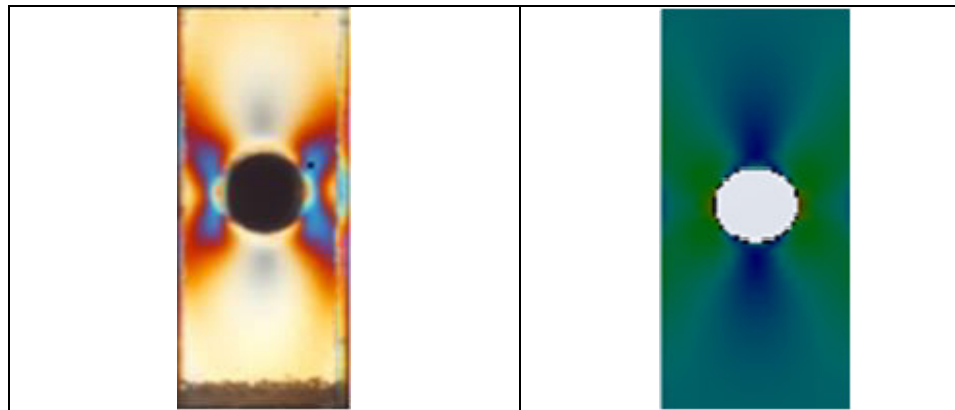


Figura 103 Probeta 5 fotoelasticidad vs simulación

Como se puede observar la distribución de esfuerzos es bastante similar, como ya se observó anteriormente el esfuerzo se concentra en los laterales del agujero y se va a disipando en diagonal mientras que en el lado superior e inferior existe muy poca concentración de esfuerzos.

4.8.2 Distribución de esfuerzos compresión

- **Probeta 1**

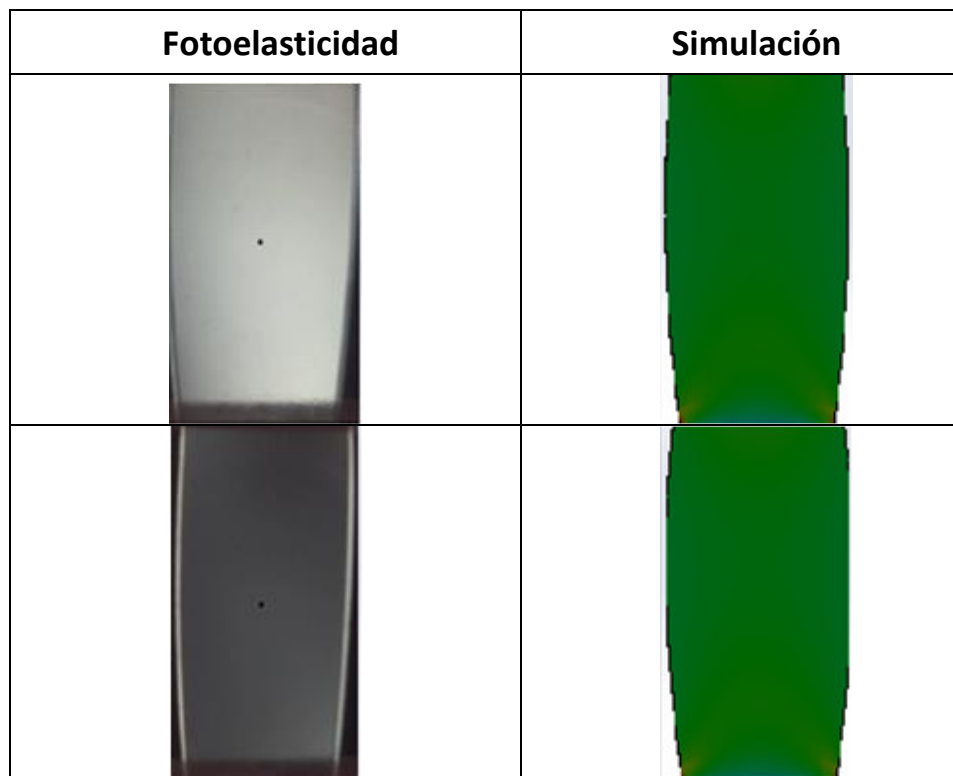


Figura 104 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación

Como se puede observar en la figura, la distribución de esfuerzos es uniforme a lo largo de toda la superficie, también observamos que los colores que se presentan en éste ensayo son los mismos que a tracción.

- **Probeta 2**

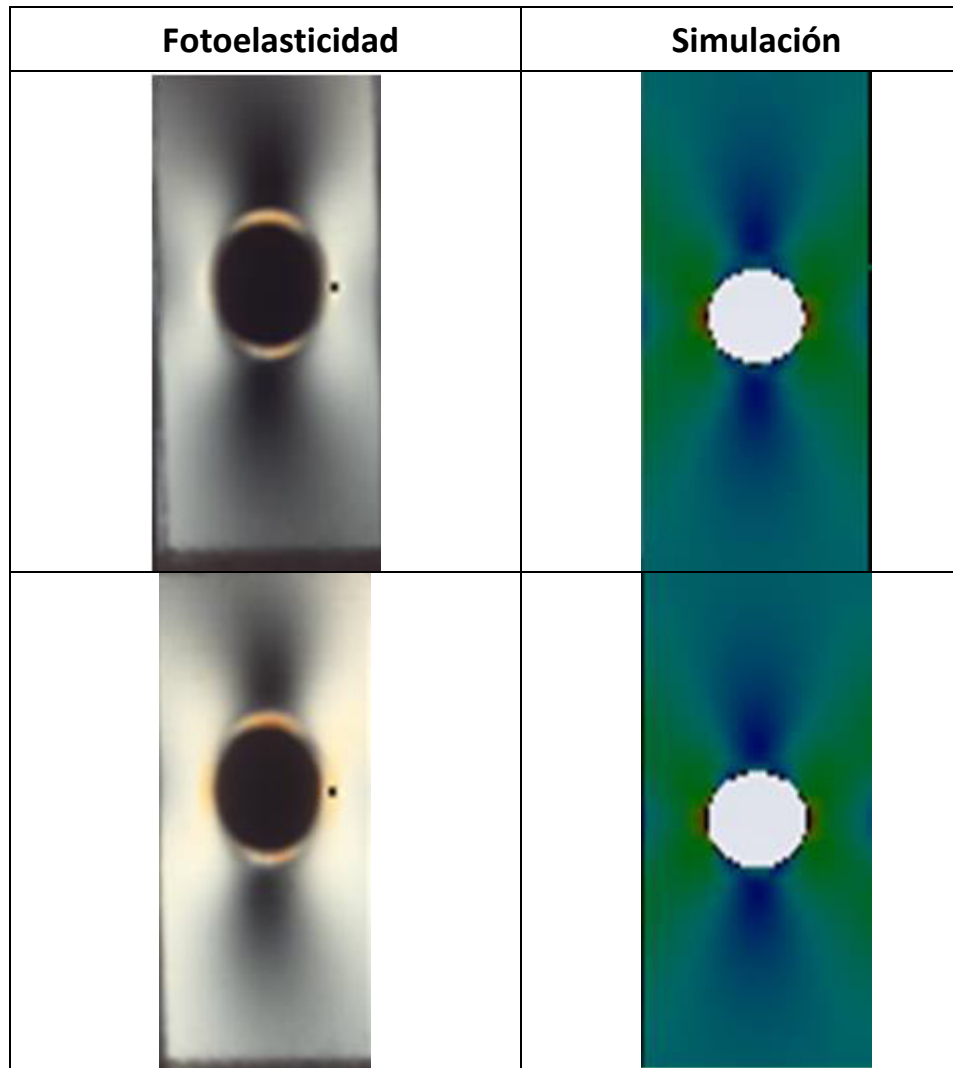


Figura 105 Probeta 2 fotoelasticidad vs simulación

Analizando una probeta similar utilizada en un ensayo de tracción comprobamos que la distribución de esfuerzos es similar en ambos ensayos, los puntos críticos siguen ubicándose en los laterales del agujero y esparciéndose en diagonal.

4.8.3 Distribución de esfuerzos flexión

- Probeta 1

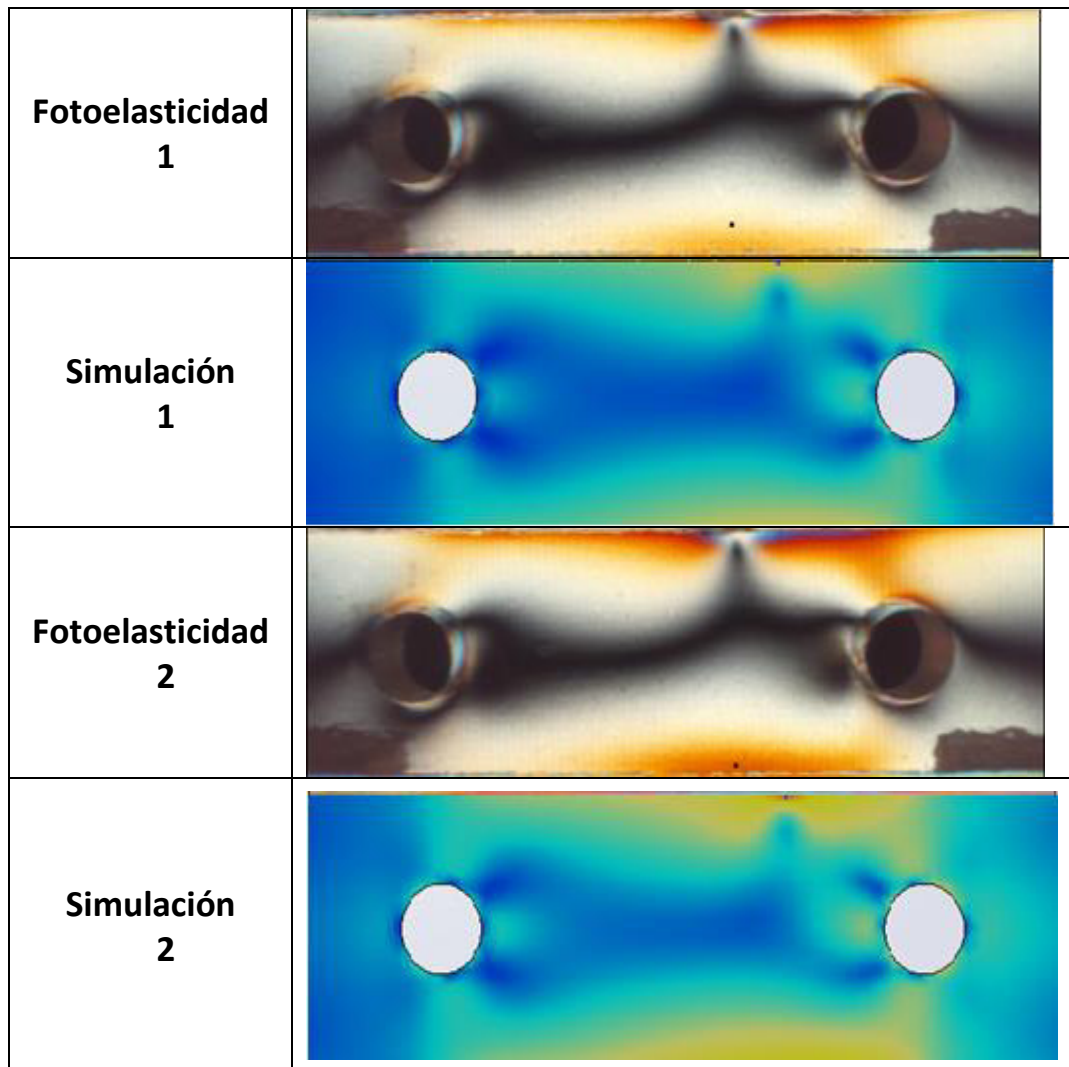


Figura 106 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación

Como se puede observar en la figura los patrones de distribución de esfuerzos son muy similares, el principal concentrador de esfuerzos se encuentra en el punto donde se aplicó la carga puntual. Otras características similares es la presencia de la línea neutra que se la puede observar principalmente entre los agujeros. También nos podemos dar cuenta de que a diferencia del ensayo de tracción, en el de flexión los agujeros no constituyen un concentrador de esfuerzos demasiado importante.

- **Probeta 2**

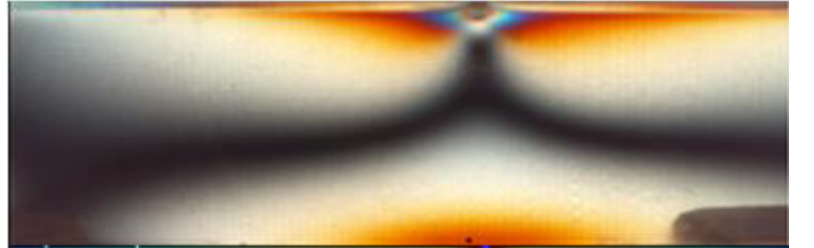
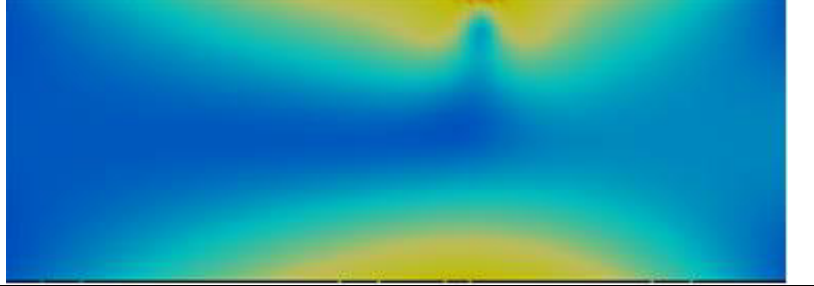

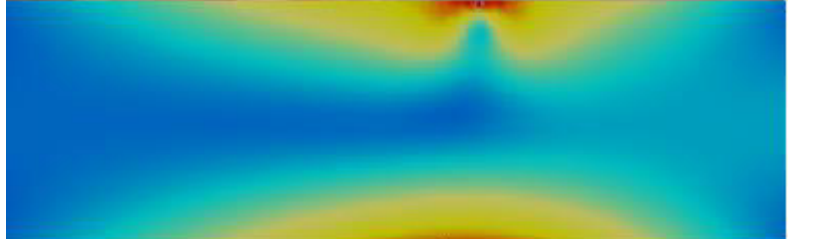
<p>Fotoelasticidad 1</p>	
<p>Simulación 1</p>	
<p>Fotoelasticidad 2</p>	
<p>Simulación 2</p>	

Figura 107 Probeta 2 fotoelasticidad vs simulación

Al igual que en la anterior probeta las principales características que se pueden observar es la presencia de la zona neutra en la mitad de la probeta, la principal concentración de esfuerzos se encuentra en la zona de aplicación de la carga. En ésta probeta también pudimos observar que tanto la región superior la cual está sujeta a esfuerzos de compresión y la inferior que se encuentra a tracción presentan la misma tonalidad en sus colores por lo que se puede concluir que la fotoelasticidad no diferencia esfuerzos de tracción y compresión.

4.8.4 Distribución de esfuerzos torsión

- **Probeta 1**

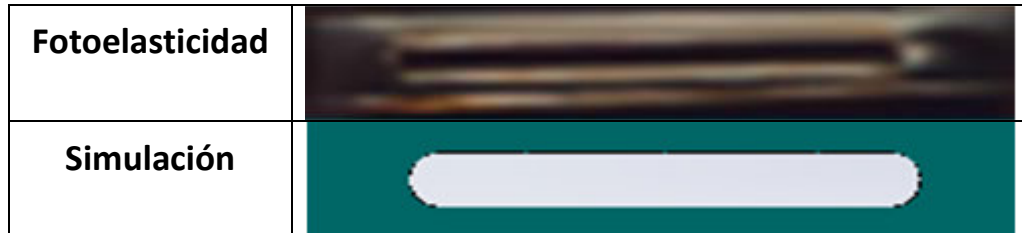


Figura 108 Probeta 1 fotoelasticidad vs simulación

- **Probeta 2**

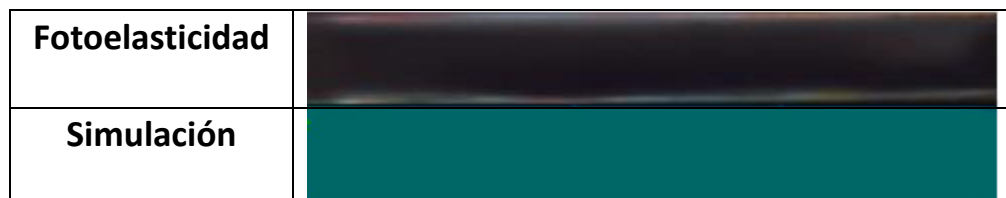


Figura 109 Probeta 2 fotoelasticidad vs simulación

Para el ensayo de torsión no se presenta ningún cambio de color apreciable, ya que como se demostró los esfuerzos principales tienen la misma magnitud y al restarse se anulan, por lo que no es apreciable por la fotoelasticidad.

4.9. Esfuerzos Aproximados

Como se mencionó en el alcance de éste proyecto el análisis de resultados está orientado al nivel cualitativo, es decir que el principal enfoque de éste estudio es el análisis de la distribución de los esfuerzos y la comprobación de la concentración de esfuerzos en los puntos denominados críticos, sin embargo para no desaprovechar el potencial que nos brinda la fotoelasticidad se decidió realizar una estimación del esfuerzo mediante el uso de las ecuaciones de la fotoelasticidad y compararlas con los valores obtenidos en la simulación y en el análisis teórico. Los resultados obtenidos.

4.9.1 Ensayo de tracción

Tabla 42:
Comparación de resultados a tracción Fotoelasticidad vs Simulación

	Fotoelasticidad [MPa]	Simulación [MPa]	%Error 1
Probeta 1			
Ensayo 1	10.65	10.3	3.40
Ensayo 2	17.12	18.03	5.05
Probeta 2			
Ensayo 1	17.12	16.99	0.77
Ensayo 2	22.82	26.24	13.03
Probeta 3			
Ensayo 1	17.12	13.99	22.37
Ensayo 2	38.04	37.04	2.70
Probeta 4			
Ensayo 1	22.82	23.48	2.81
Ensayo 2	30.43	26.42	15.17
Probeta 5			
Ensayo 1	30.43	32.36	5.96
Ensayo 2	41.08	36.42	12.80
Probeta 6			
Ensayo 1	17.12	16.42	4.26
Ensayo 2	20.54	19.39	5.93

Tabla 43:
Comparación de resultados a tracción Fotoelasticidad vs Análisis teórico

	Fotoelasticidad [MPa]	Análisis teórico [MPa]	%Error 1
Probeta 1			
Ensayo 1	10.65	13.87	23.22
Ensayo 2	17.12	22.57	24.15
Probeta 2			
Ensayo 1	17.12	16.46	4.01
Ensayo 2	22.82	24.36	6.32
Probeta 3			
Ensayo 1	17.12	20.13	14.95
Ensayo 2	38.04	40.86	6.90
Probeta 4			
Ensayo 1	22.82	19.95	14.39
Ensayo 2	30.43	27.81	9.42
Probeta 5			
Ensayo 1	30.43	32.86	7.40
Ensayo 2	41.08	42.25	2.77
Probeta 6			

Ensayo 1	17.12	19.42	11.84
Ensayo 2	20.54	24.95	17.68

4.9.2 Ensayo de compresión

Tabla 44:
Comparación fotoelasticidad vs simulación.

	Fotoelasticidad [MPa]	Simulación [MPa]	%Error
Probeta 1			
Ensayo 1	10.65	9.38	13.54
Ensayo 2	17.12	14.66	16.78
Probeta 2			
Ensayo 1	17.12	13.56	26.25
Ensayo 2	22.82	22.56	1.15

Tabla 45:
Comparación fotoelasticidad vs análisis teórico

	Fotoelasticidad [MPa]	Análisis teórico [MPa]	%Error
Probeta 1			
Ensayo 1	10.65	11.81	9.82
Ensayo 2	17.12	24.36	29.72
Probeta 2			
Ensayo 1	17.12	19.25	11.06
Ensayo 2	22.82	25.19	9.41

4.9.3 Ensayo de flexión

Tabla 46:
Comparación fotoelasticidad vs análisis teórico

	Fotoelasticidad [MPa]	Simulación [MPa]	%Error
Probeta 1			
Ensayo 1	7.61	6.66	14.26
Ensayo 2	10.14	9.69	4.64
Probeta 2			
Ensayo 1	11.41	11.27	1.24
Ensayo 2	12.68	13.01	2.54

Tabla 47:
Comparación fotoelasticidad vs análisis teórico

	Fotoelasticidad [MPa]	Análisis teórico [MPa]	%Error
Probeta 1			
Ensayo 1	7.61	8.53	10.78

Ensayo 2	10.14	10.67	4.96
Probeta 2			
Ensayo 1	11.41	12.80	10.86
Ensayo 2	12.68	14.93	15.07

Como se puede observar los valores tanto teóricos como de simulación se mantienen en el rango establecido por la fotoelasticidad, sin embargo el porcentaje de error en algunos puntos no es lo suficientemente pequeño como para que estos valores puedan ser utilizados en el diseño, esto se debe a que la fotoelasticidad relaciona un solo valor de esfuerzos con cada color, mientras que en realidad en una región de un solo color pueden existir varios niveles de esfuerzos no apreciables en la fotoelasticidad.

4.9.4 Ensayo de torsión

Como se pudo observar en el análisis de fotoelasticidad, el ensayo de torsión no presenta resultados visibles, sin embargo se comprueba que el color negro en una probeta además de representar la ausencia de esfuerzos representa esfuerzos principales de igual magnitud.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se realizará un desglose de los costos generados en el diseño, construcción e implementación del equipo de análisis fotoelástico para realizar una comparación con equipos de similares características existentes en el mercado actual.

5.1. Costos Directos

Se conoce como costos directos, al conjunto de gastos generados por una empresa o persona que se encuentran directamente relacionados a la obtención de un producto o servicio. Entre los costos directos que se analizaran en este proyecto se encuentran:

- Costo materia prima.
- Costo de mano de obra.

5.1.1 Costo de materia prima

Los costos de materia prima se los detalla continuación por medio de una tabla de valores.

Tabla 48:
Costos materia prima

Cantidad	Descripción	Costo unitario (\$)	Costo Total (\$)
2	Gabinetes metálicos	45	90
2	Paneles polarizados	26	52
1	Fuente de iluminación	38	38
1	Cámara de video	87	87
4	Imanes de neodimio	4	16
3	Impresión 3D	7	21
1	Varios	35	35
1	Acrílico	42	42
1	Poliuretano	59	59
TOTAL			\$440

5.1.2 Costos mano de obra directa

Es la remuneración que se le otorga a la persona que realiza algún tipo de esfuerzo físico dentro del proceso de la transformación de materia prima en un producto final, como también se encuentra el precio de hora máquina en la obtención del producto final.

Tabla 49:

Costo mano de obra directa

Operación	Tiempo (Hora)	Costo/Hora (\$)	Costo total (\$)
Cortado	3	4	12
Pintado	2	8	16
Taladrado	1	4	4
Ensamblado	5	12	60
TOTAL			\$92

5.2. Costos Indirectos

Son los rubros que no se encuentran directamente relacionados con el producto o servicio final; los rubros que se analizaron son:

- Mano de obra indirecta
- Costos operativos

Tabla 50:

Costo mano de obra indirecta

Detalle	Tiempo (Hora)	Costo/Hora (\$)	Costo total (\$)
Ingeniería y diseño	200	2	400
Programación	25	2	50
TOTAL			\$450

Tabla 51:
Costos operativos

Detalle	Costo total (\$)
Transporte movilización	100
Internet	25
TOTAL	\$125

5.3. Costo total

El costo total se lo calcula sumando la totalidad de los gastos directos e indirectos como se representa en la siguiente tabla.

Tabla 52:
Costos totales

Rubro	Costo (\$)
Costo materia prima	440
Costo mano de obra directa	92
Costo mano de obra indirecta	450
Costos operativos	125
TOTAL	\$1107

5.4. Equipos similares del mercado

La empresa Edibon con sede en España y manejada en Ecuador por la empresa Incotronics, cuenta con un equipo de similares características, que aunque cumple el mismo objetivo, no posee la misma versatilidad que el equipo diseñado en este proyecto, ya que no cuenta con la facilidad de adaptarse a distintas máquinas de ensayos, de igual manera el equipo posee un número limitado de probetas, de igual forma en la siguiente tabla se puede observar que el precio del equipo que ofrece la empresa Edibon es tres veces superior al construido en este proyecto.

Tabla 53:
Comparación de costos

Equipo	Costo
Equipo diseñado	1107\$
Equipo Edibon	3800\$

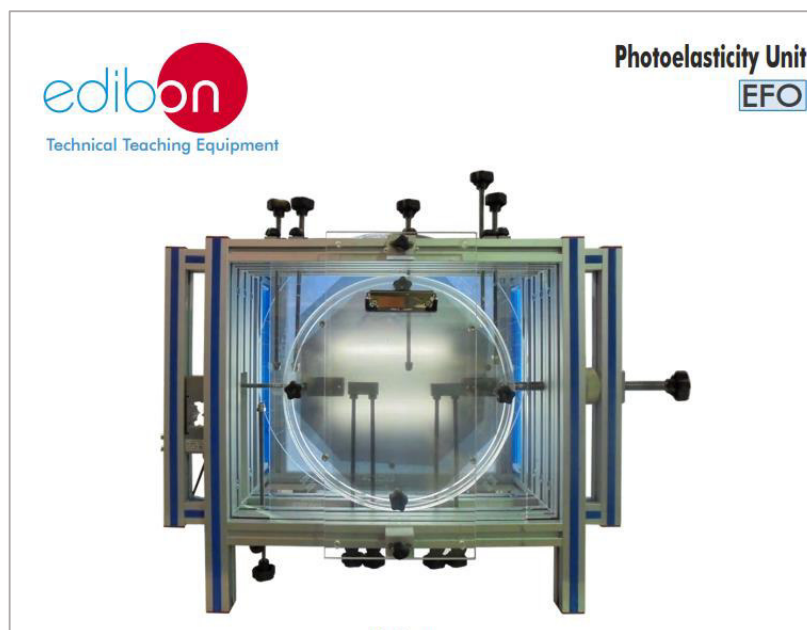


Figura 110 Equipo fotoelástico marca edibo.
Fuente: (catálogo edibon, 2015)

Este equipo cuenta con una celda de carga que indica la carga aplicada, cuenta con los paneles polarizados, una fuente de luz y no dispone de software de análisis.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Los esfuerzos obtenidos mediante fotoelasticidad corresponden a la diferencia entre los esfuerzos principales.
- El análisis fotoelástico es una herramienta confiable cuando se trata del análisis de distribución de esfuerzos, lo que lo convierte en uno de los mejores métodos para el análisis de elementos con geometrías complejas. Sin embargo esto se limita al nivel cualitativo ya que como se puede observar en el análisis de los resultados, el valor del esfuerzo obtenido es un aproximado, cuyo error alcanzó hasta 29%.
- La fotoelasticidad se complementa con el análisis teórico, puesto que nos ahorra tiempo para determinar el punto con máximo esfuerzo en un elemento.
- El ensayo de fotoelasticidad es aplicable en los ensayos de tracción, compresión y flexión.
- El ensayo de torsión no presenta ningún cambio visible bajo fotoelasticidad, esto se debe a que los esfuerzos principales generados por torsión pura son iguales y por ende la diferencia es cero.
- Los colores obtenidos en los ensayos de compresión y de tracción son los mismos, por lo que el ensayo de fotoelasticidad no permite diferenciar entre compresión y tracción.
- Se puede realizar análisis fotoelástico a materiales transparentes que no poseen propiedad de birrefringencia agregándoles una capa de material birrefringente como el poliuretano, sin afectar sus propiedades mecánicas sino solamente las ópticas.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda investigar a profundidad la posibilidad de utilizar este método en materiales no transparentes, mediante el uso de distintos filtros polarizadores y una disposición diferente de los equipos de polarización.
- Para aplicar el poliuretano se debe utilizar un rodillo liso y realizar una sola pasada. Se puede trabajar con el elemento a partir de 3 horas de la aplicación.
- En el Software de Fotoelasticidad es importante seleccionar adecuadamente el espesor de la probeta.
- Seleccionar las mordazas y apoyos adecuados para realizar los ensayos ya que dependiendo del tipo sujeción de la probeta, los resultados pueden verse afectados.
- Comprobar que los polarizadores se encuentren limpios para no provocar efectos visuales que afecten el desempeño del software.
- Mantener el envase de poliuretano herméticamente sellado en todo momento, ya que este se solidifica al contacto con el ambiente.
- Trabajar con cargas que no excedan el 90% de la capacidad de la máquina de ensayos MTS.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Beer, F. P. (2010). *Mechanics of Materials*. Boston: McGraw-Hill.
- D. Ramírez, A. A. (2004). fotoelasticidad. *Primer encuentro participación de la mujer en la ciencia*, (págs. 3 -7). Guanajuato.
- D., M. L. (2005). Evaluación de Tensiones Residuales en discos compactos mediante el método fotoelástico. *Revista de Investigación de Física*, 43-45.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de Materiales*. Virginia: Pearson Prentice Hall.
- Jimenez, E. V. (2010). *Procesamiento digital de imagenes con matlab y simulink*. España-Madrid: ra-ma sa.
- León, J. C. (2013). Estudio de foelasticidad: Desarrollos y aplicaciones . *Revista Politécnica ISSN 1900-2351*, 27-36.
- Li, F. (2010). *Study of Stress Measurement Using Polariscopes*. Georgia.
- Logitech. (02 de 06 de 2016). www.logitech.com. Obtenido de www.logitech.com/en-us/product/hd-webcam-c615
- Morales, L. M. (2006). *Laboratorio De Fotoelasticidad Para Los Estudiantes De Ingeniería Mecánica Universidad De San Carlos* . Guatemala.
- Phillips, J. F. (2006). *Manual on Experimental Stress Analysis*. Society for Experimental Mechanics.