



ESFPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

“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:

ERICK ALVEAR

ANGELO HARO

OBJETIVO 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.

OBJETIVOS 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.

FUNDAMENTO TEÓRICO

FOTOELASTICIDAD

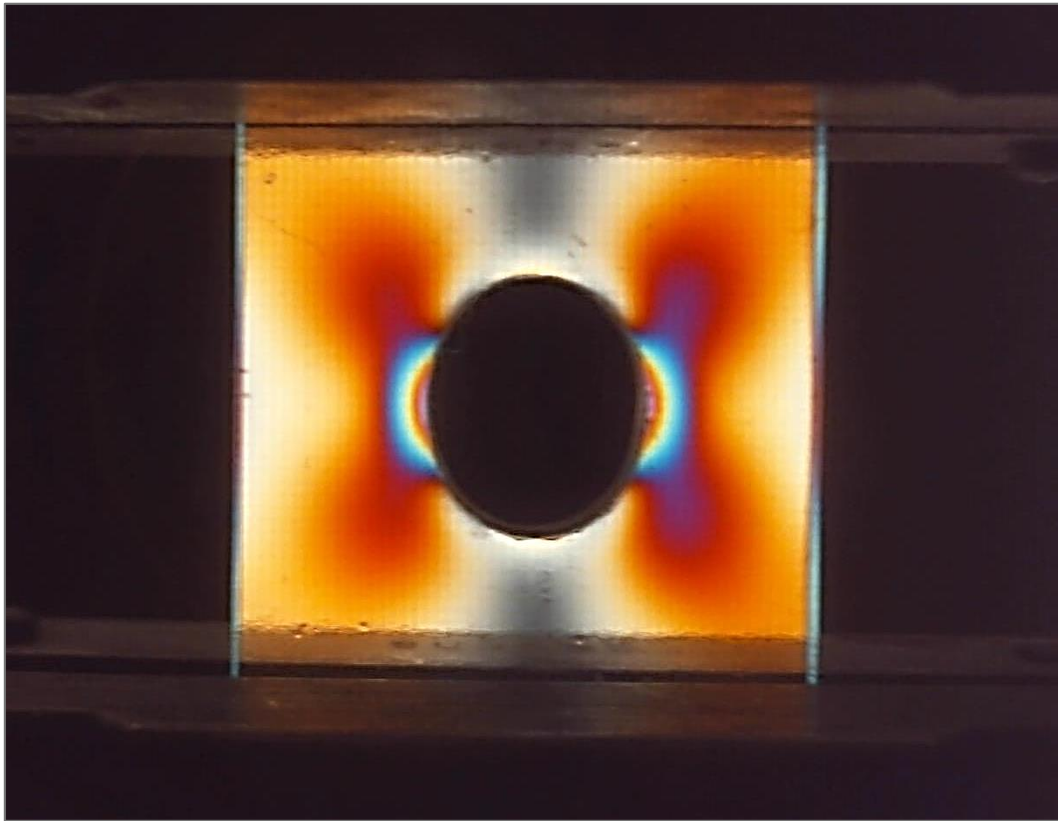
LUZ POLARIZADA



MATERIAL
BIRREFRINGENTE



ANALIZADOR

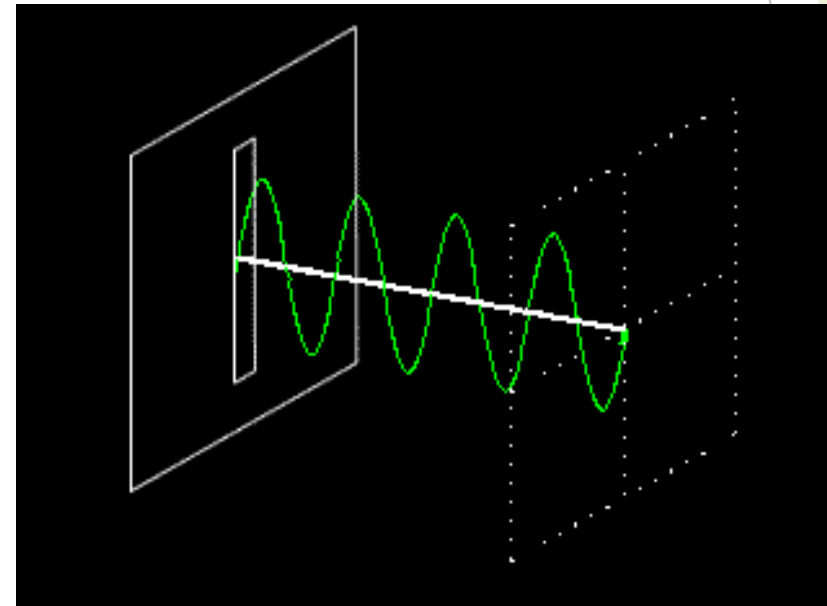
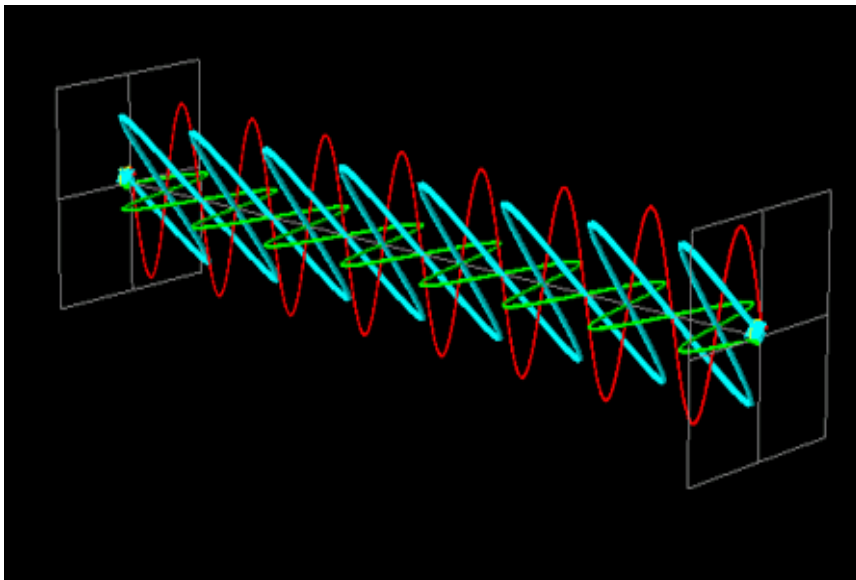


POLARIZACIÓN DE LUZ

Luz Sin Polarizar



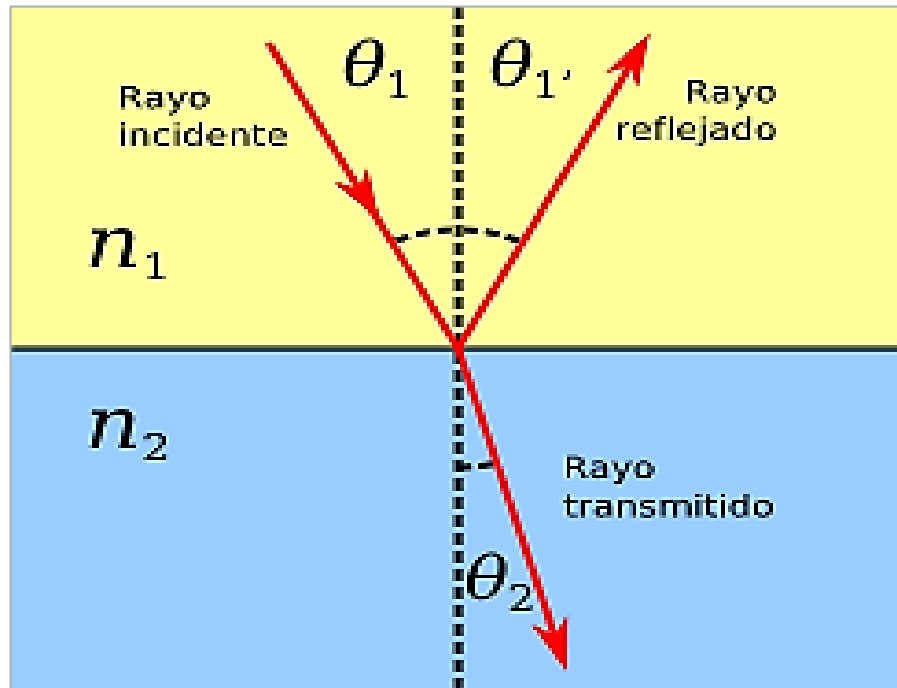
Luz Polarizada



Filtros de polarización



REFRACCIÓN



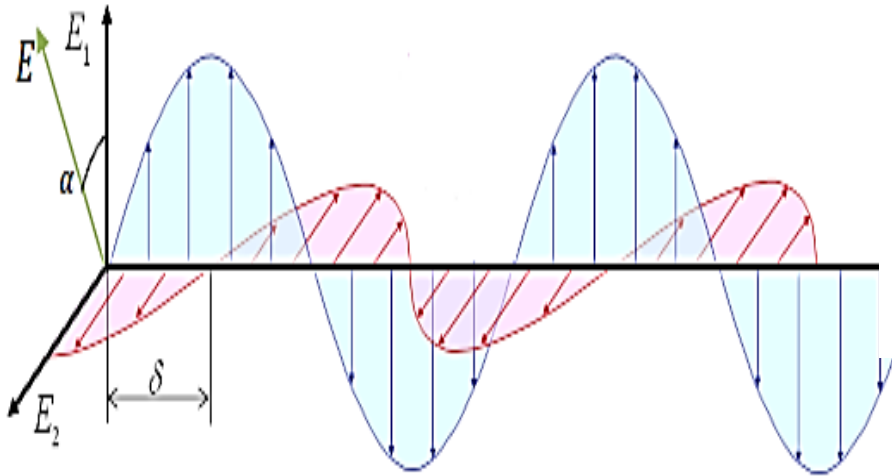
LEY DE SNELL

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2$$

Donde:

$$n = \frac{\text{Velocidad e la luz en el vacio}}{\text{Velocidad de la luz en el medio}}$$

BIRREFRINGENCIA

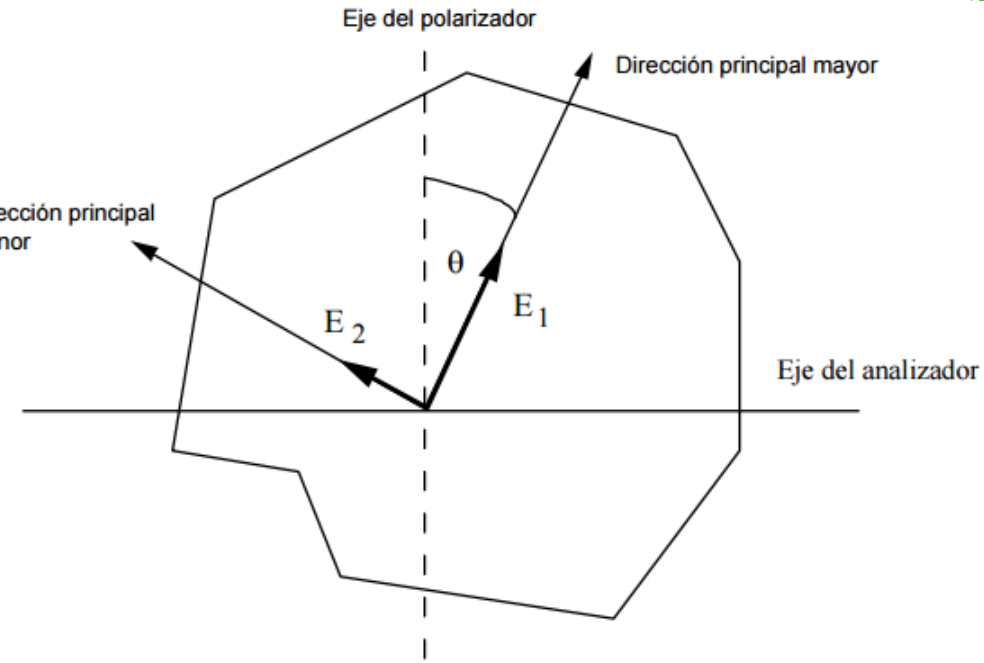


$$\delta = e(n_2 - n_1)$$

$e = \text{Espesor del material}$
 $n = \text{Índice de refracción}$

Donde:

$\delta = \text{Desfase}$



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

Donde:

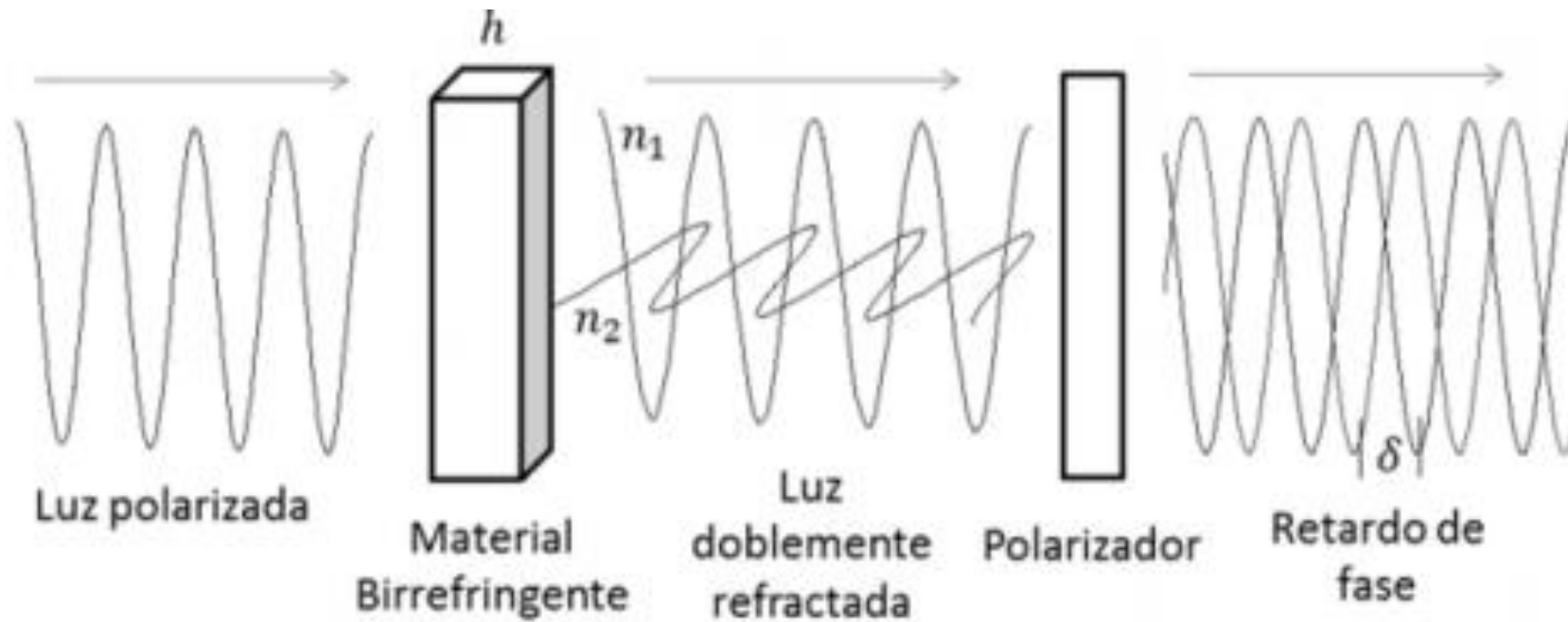
$\varphi = \text{Ángulo de desfase}$

$e = \text{Espesor del material}$

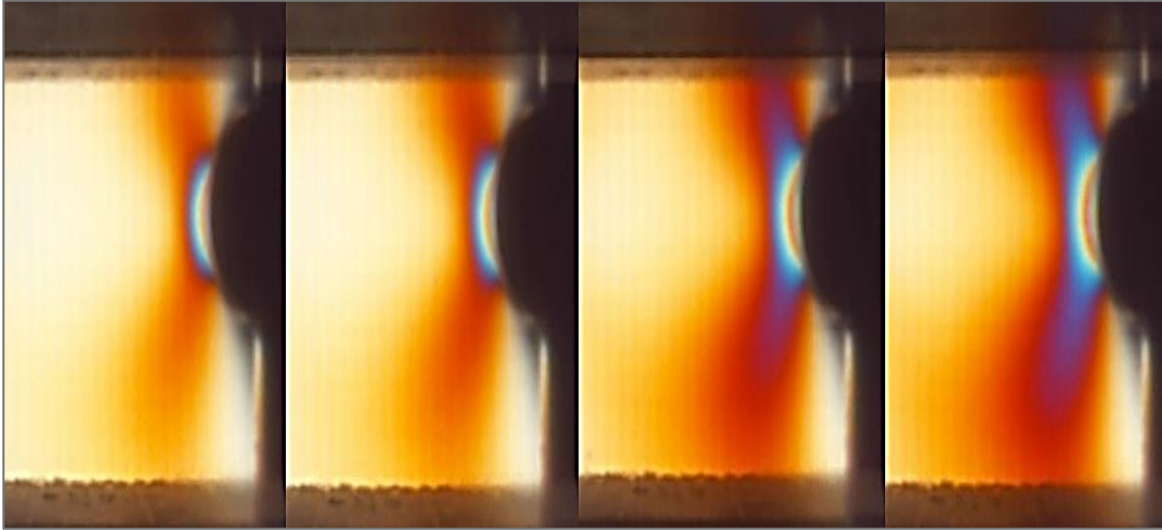
$n = \text{Índice de refracción}$

$\lambda = \text{Longitud de onda}$

Fotoelasticidad



FOTOELASTICIDAD



Ley de Brewster

$$n_1 - n_2 = K(\sigma_1 - \sigma_2)$$

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

$$\delta = e \cdot K(\sigma_1 - \sigma_2)$$

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

$$N = \frac{\varphi}{2\pi} \quad f_\sigma = \frac{\lambda}{K}$$

Donde:

N = Orden de franja

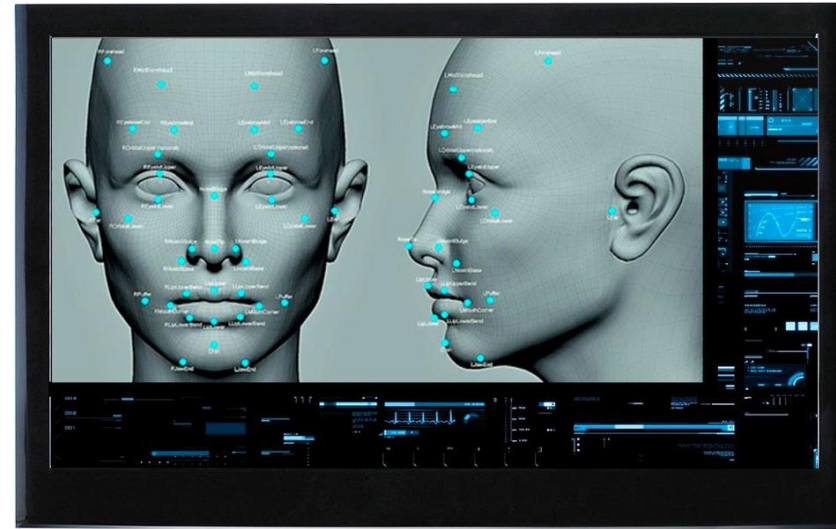
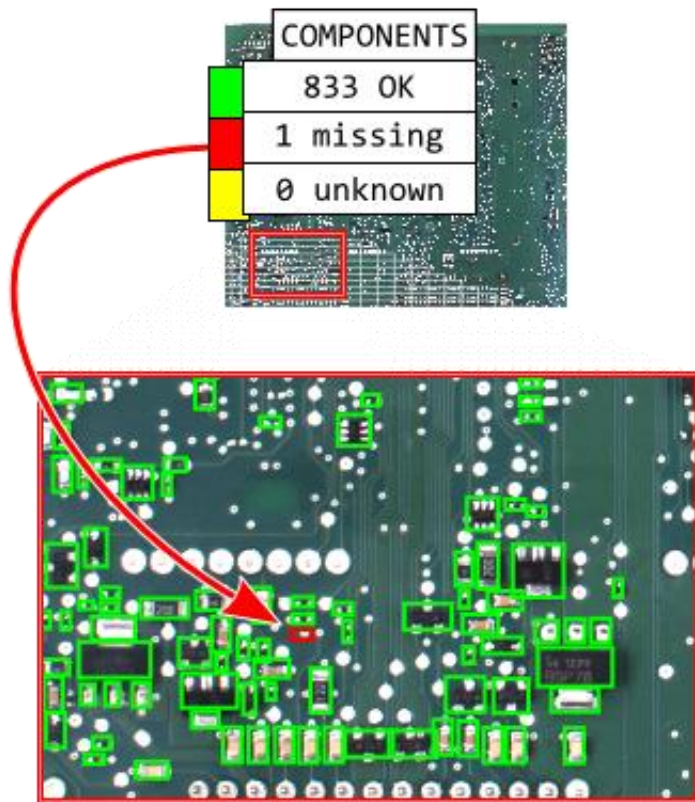
f_σ = Factor de franja

FOTOELASTICIDAD

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

*Tabla de factor de franja
ASTM D-4093*

Procesamiento Digital de Imágenes

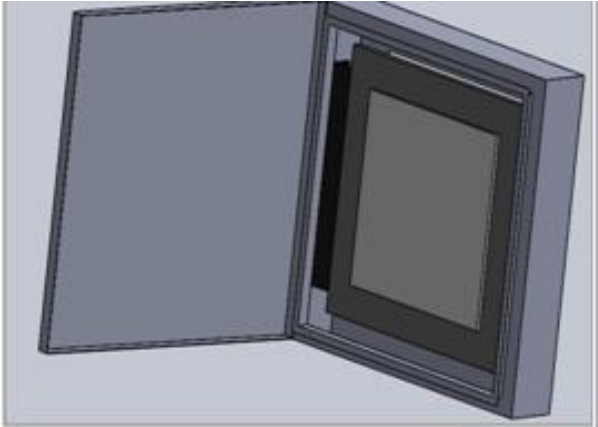


MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS MTS



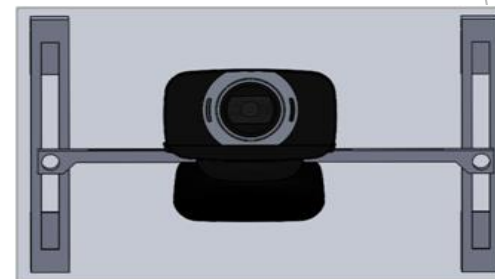
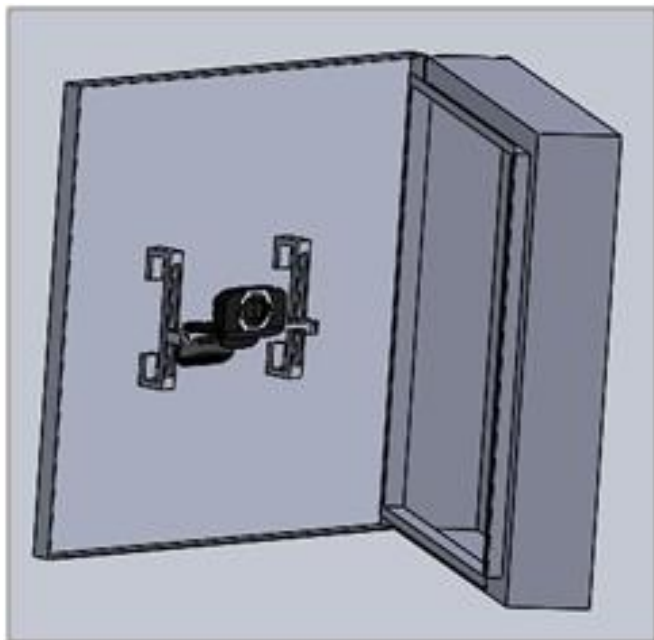
DISEÑO DEL EQUIPO

EQUIPO POLARIZADOR



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

EQUIPO ANALIZADOR



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

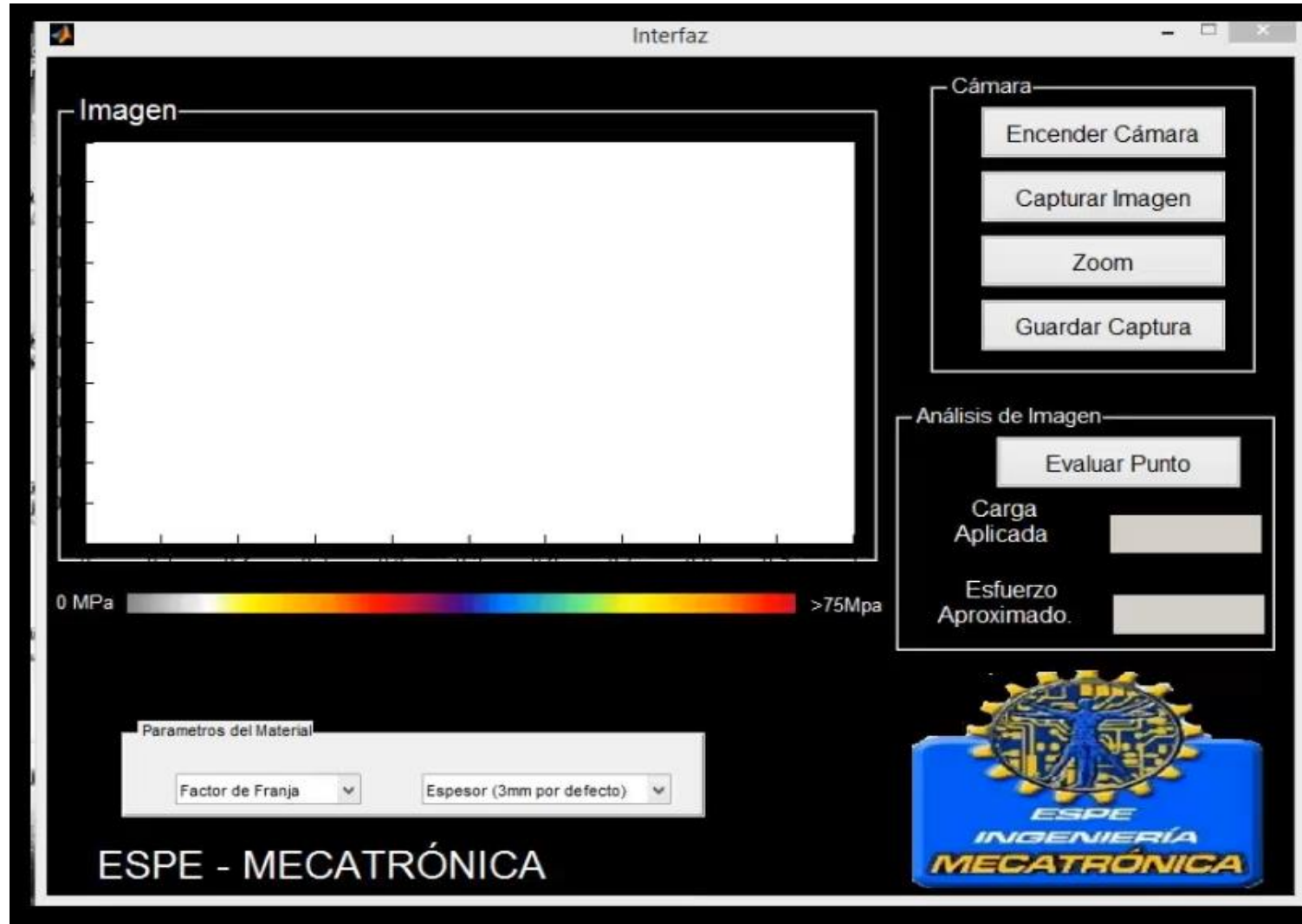
SELECCIÓN DEL MATERIAL FOTOELASTICO

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

DISEÑO DE PROBETAS

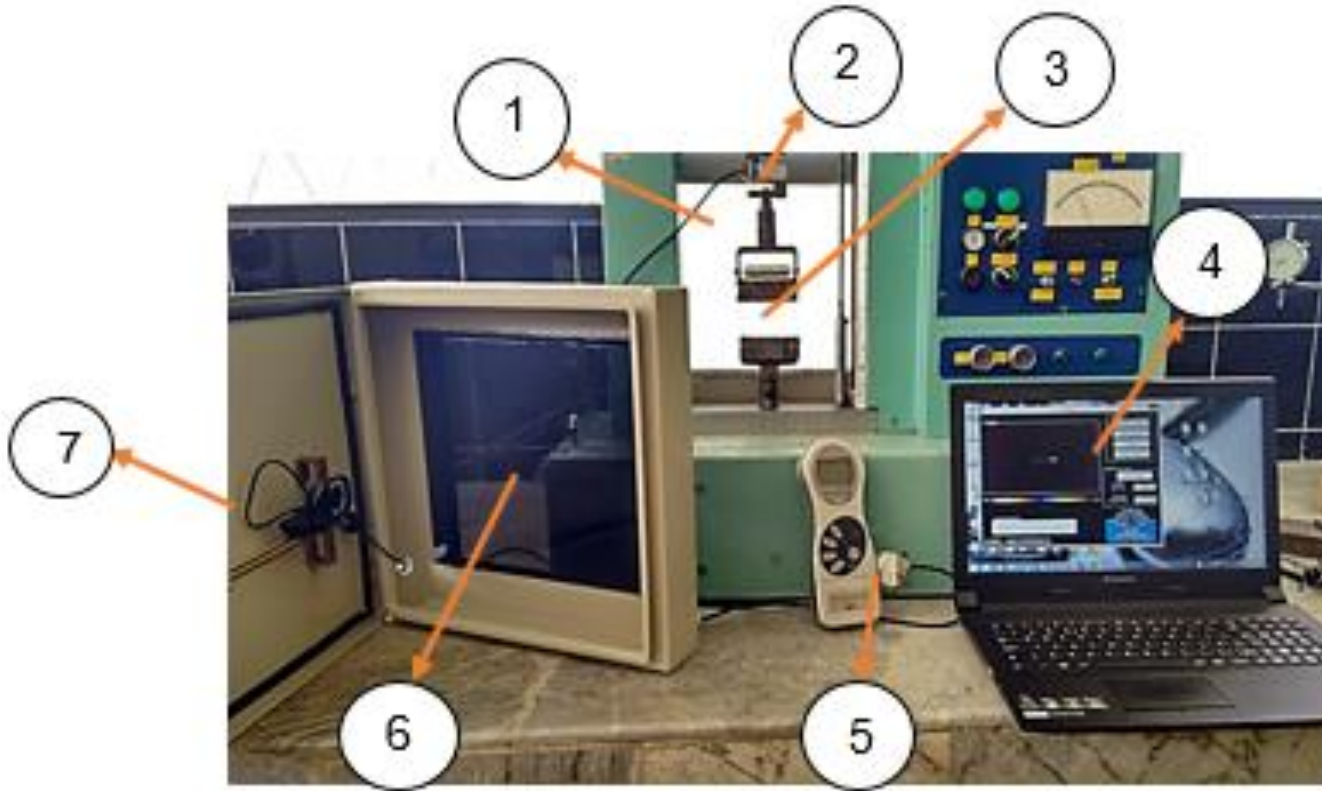


DISEÑO DEL SOFTWARE



RESULTADOS

Elementos del equipo



1. Fuente de luz polarizada

2. Celda de carga

3. Probeta

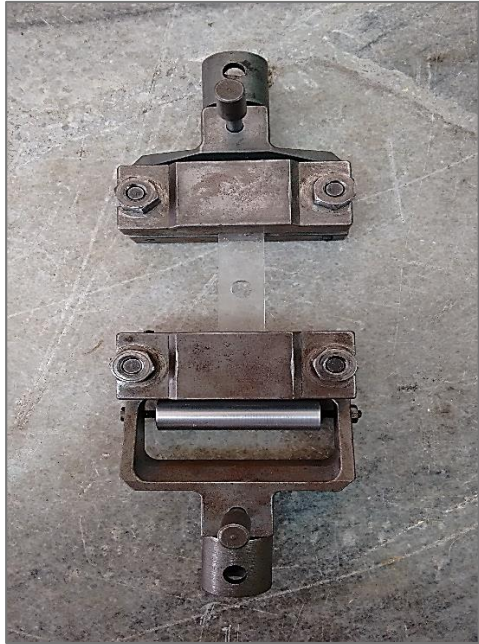
4. Software

5. Acondicionador de señal

6. Analizador

7. Cámara

Montaje para ensayos

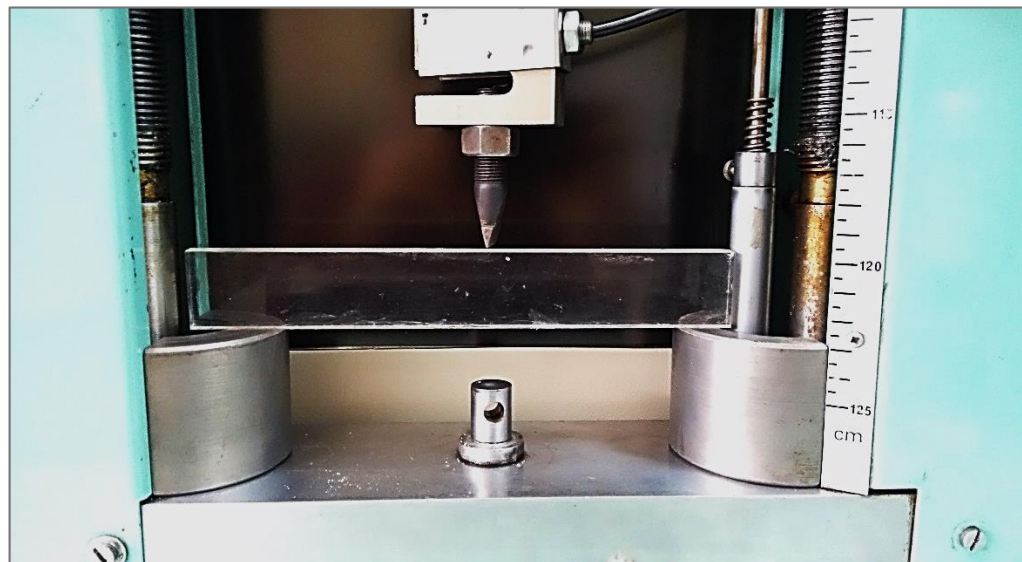


Tensión

Compresión



Montaje para ensayos



Flexión



Montaje para ensayos




Torsión



FOTOELASTICIDAD VS SIMULACIÓN

Imagen



Cámara

- Encender Cámara
- Capturar Imagen
- Zoom
- Guardar Captura

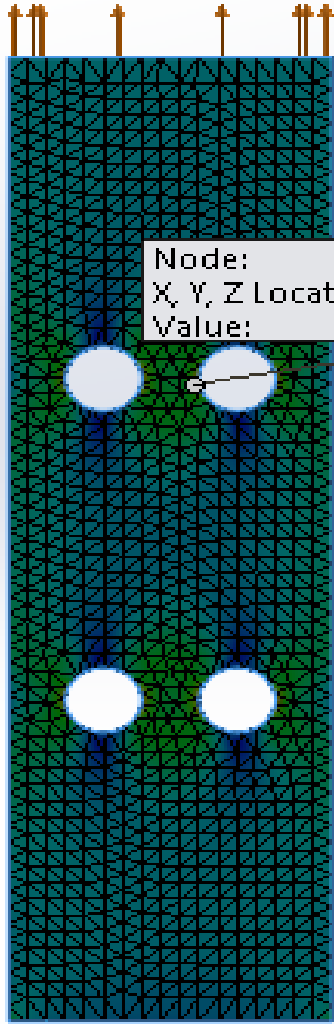

Análisis de Imagen

- Evaluar Punto
- Carga Aplicada: 750N
- Esfuerzo Aproximado: 38.0367MPa

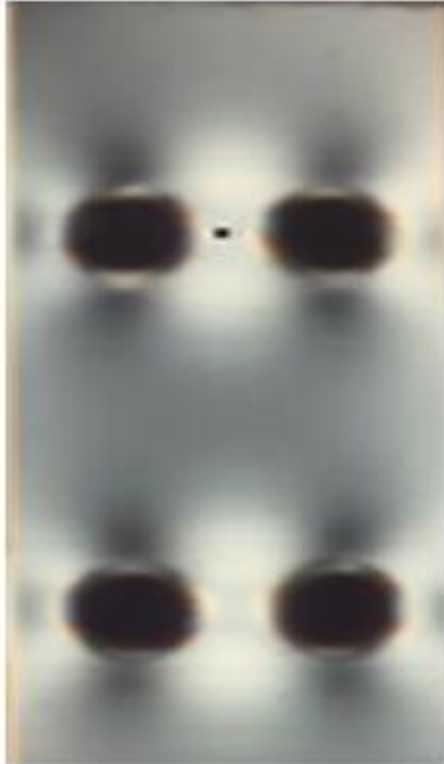
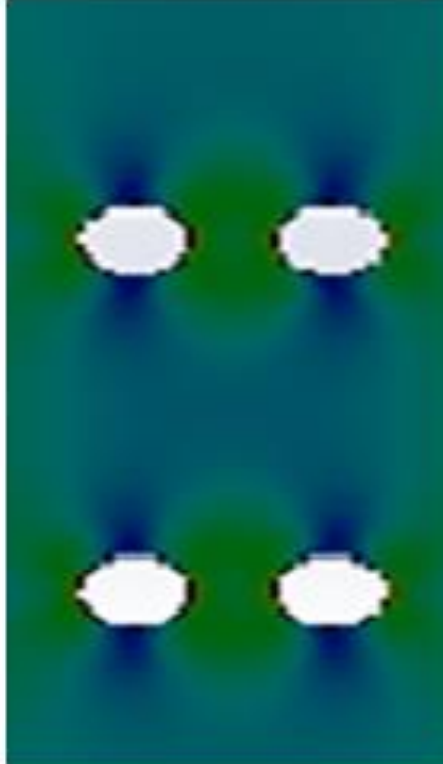

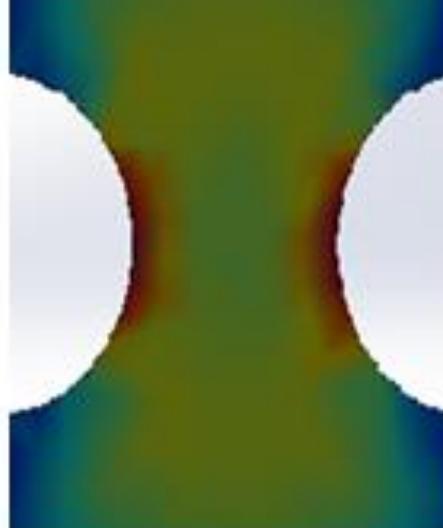
Parametros del Material

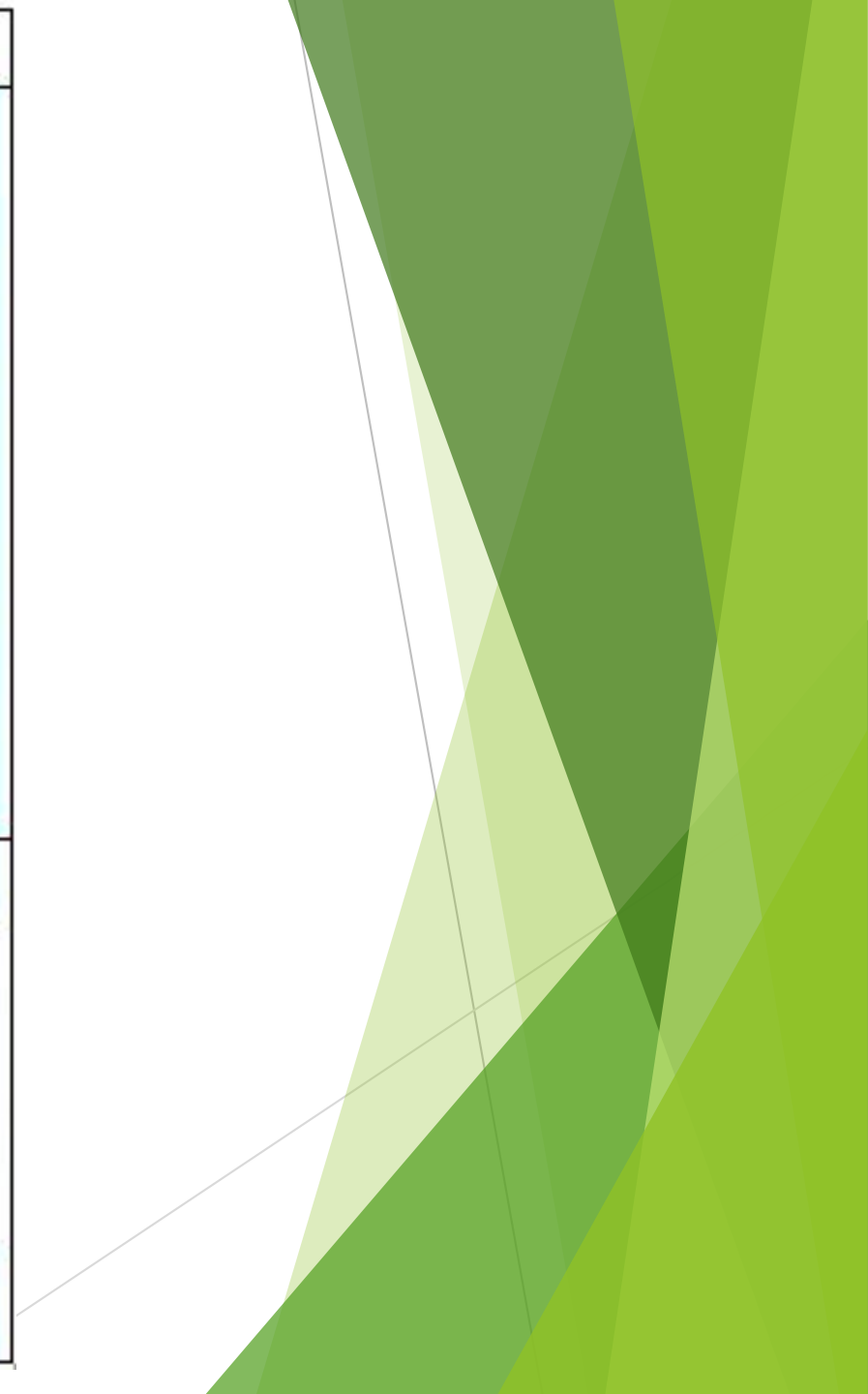
- Factor de Franja
- Espesor (3mm por defecto)

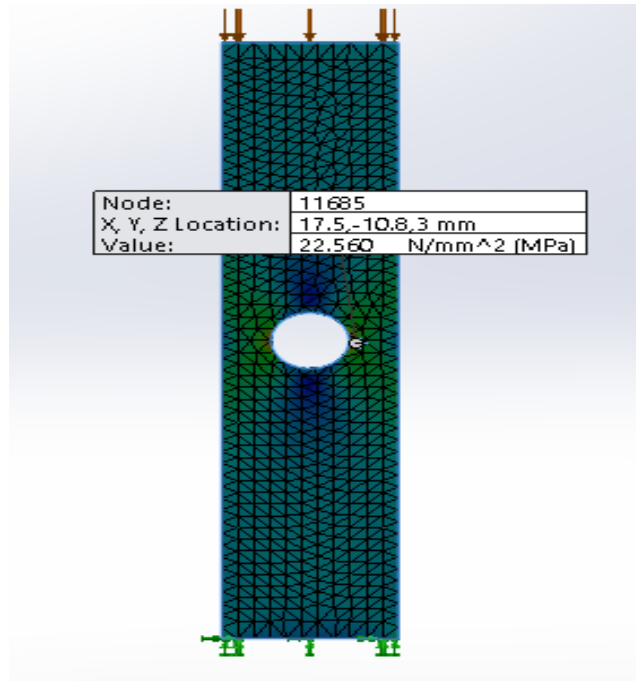
ESPE - MECATRÓNICA



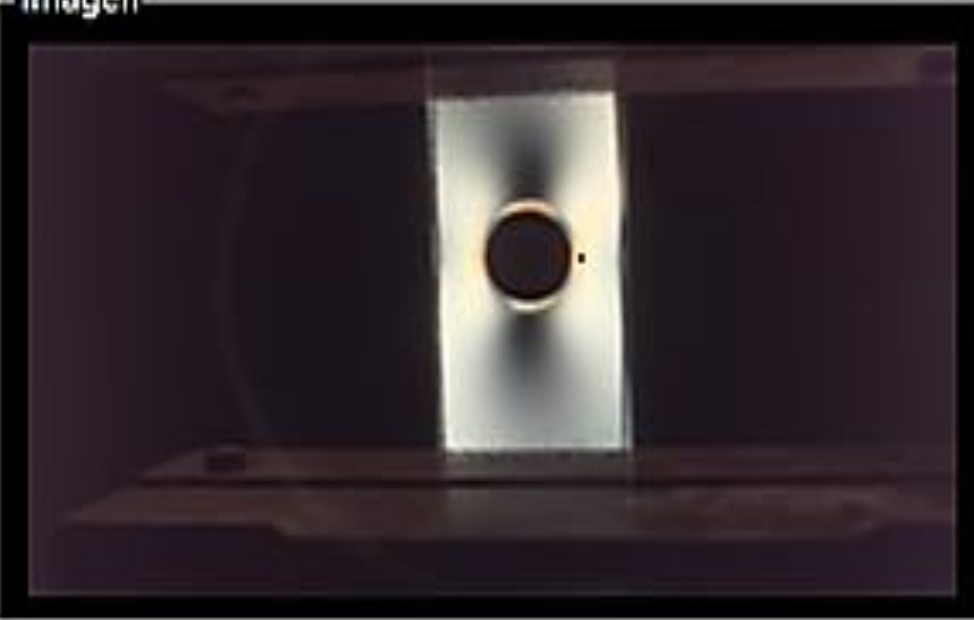
Node:	28177
X, Y, Z Location:	26.9, 16.2, 2.75 mm
Value:	37.044 N/mm ² (MPa)

Fotoelasticidad	Simulación
	
	





Imagen




Cámara

Encender Cámara

Capturar Imagen

Zoom

Guardar Captura

0 MPa

>75 MPa

Parámetros del Material

Factor de Franja ▼


Espesor (3mm por defecto) ▼

Análisis de Imagen

Evaluar Punto


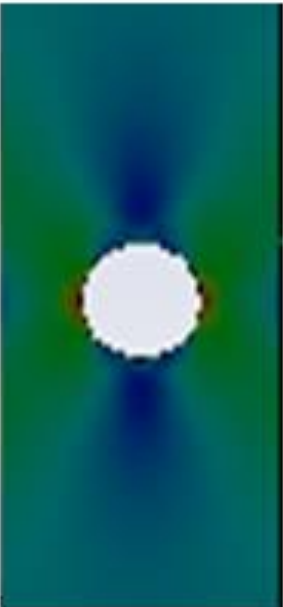

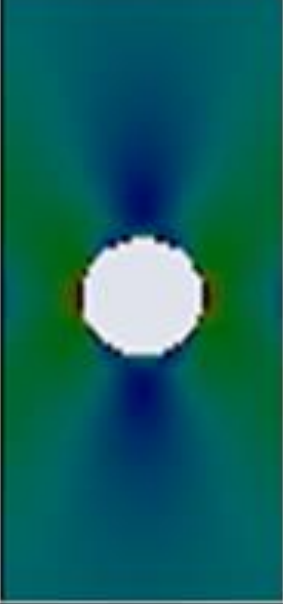
Carga Aplicada 500N

Esfuerzo Aproximado 22.822MPa



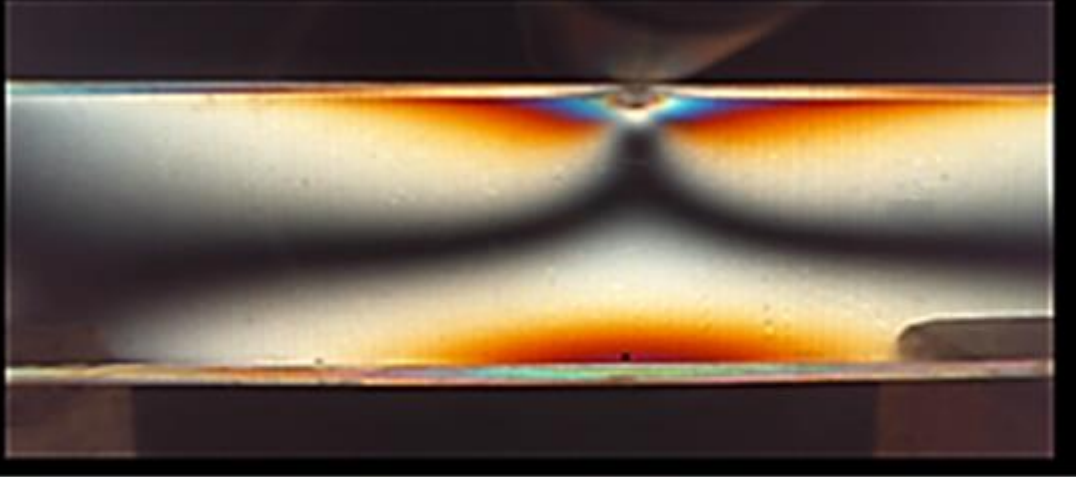
ESPE
INGENIERÍA
MECATRÓNICA

ESPE - MECATRÓNICA

Fotoelasticidad	Simulación
	
	



Imagen



Cámara

Encender Cámara

Capturar Imagen

Zoom


Guardar Captura

Análisis de Imagen

Evaluar Punto

Carga Aplicada: 700N


Esfuerzo Aproximado: 12.6789MPa

0 MPa  >75MPa

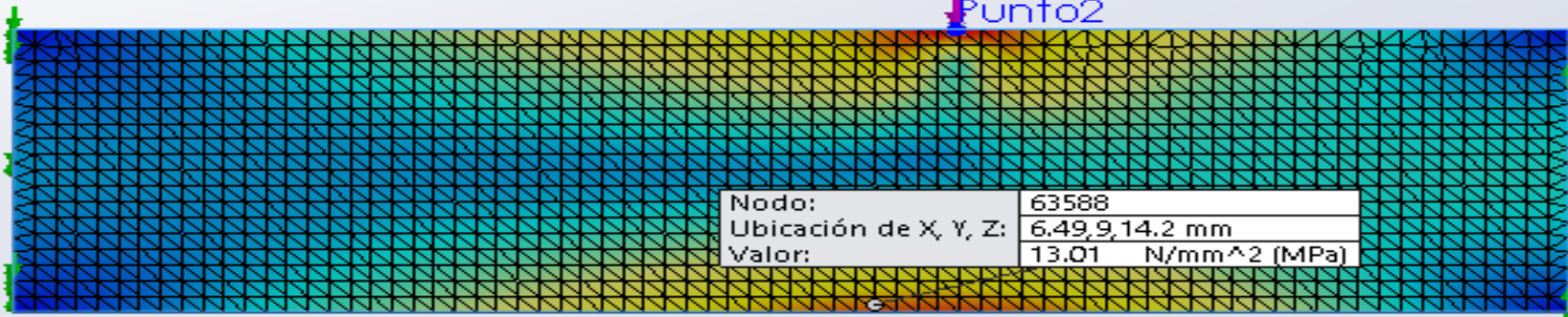
Parámetros del Material

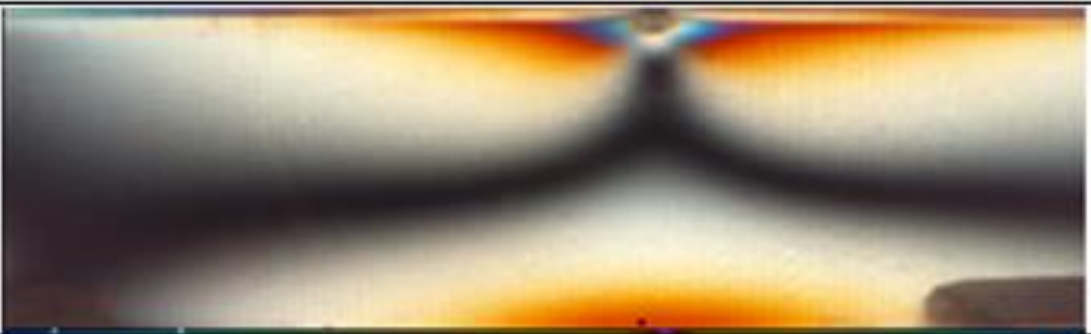
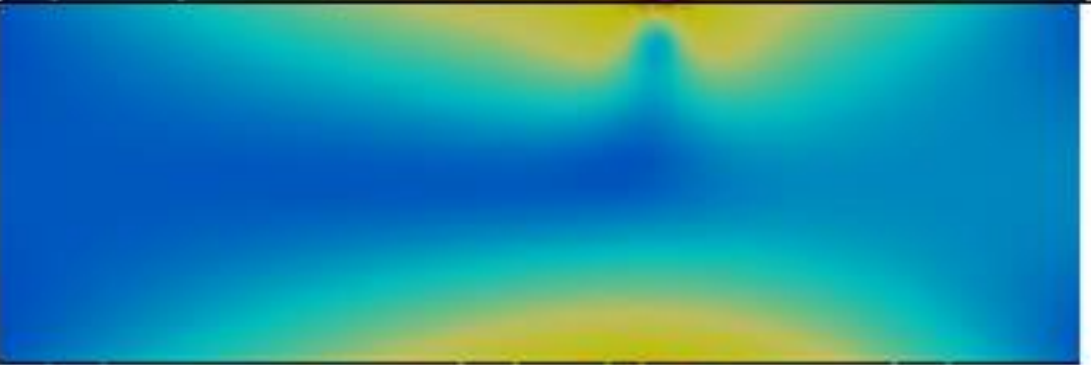

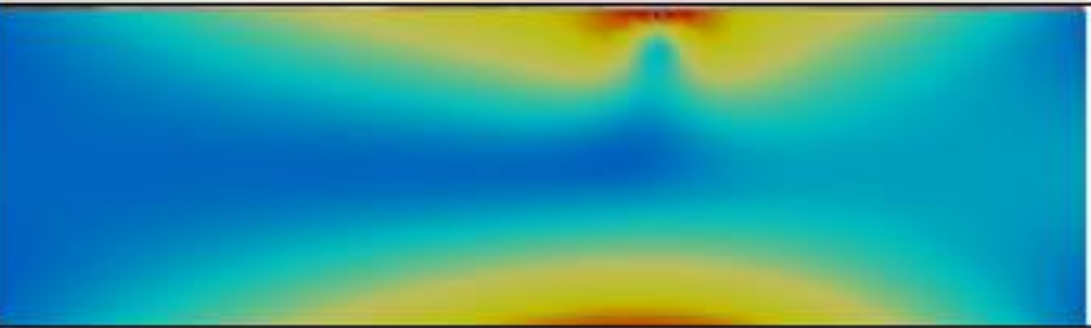
Factor de Franja:

ESPE - MECATRÓNICA

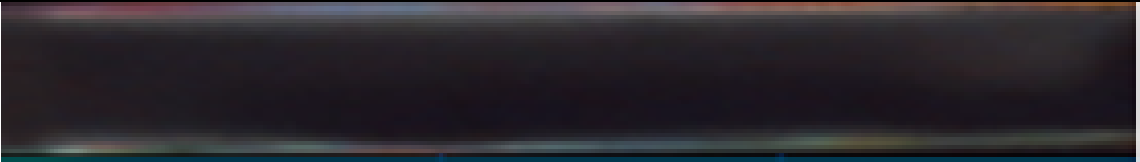
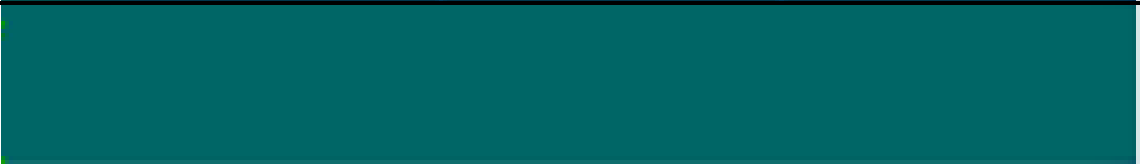


Punto2



<p>Fotoelasticidad 1</p>	 A photelasticity image showing a central vertical crack in a horizontal specimen. The stress distribution is visualized using a grayscale color map, with the highest stress (white) concentrated at the sharp tip of the crack.
<p>Simulación 1</p>	 A finite element simulation of the same crack specimen. The stress distribution is visualized using a color map ranging from blue (low stress) to red (high stress), showing a peak of high stress at the crack tip.
<p>Fotoelasticidad 2</p>	 A second photelasticity image, showing a similar crack specimen with stress distribution visualized in grayscale.
<p>Simulación 2</p>	 A second finite element simulation of the crack specimen, showing stress distribution visualized in a color map from blue to red.

Fotoelasticidad	
Simulación	

Fotoelasticidad	
Simulación	

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the frame, creating a modern, layered effect. The rest of the background is plain white.

Costos

Costos Directos

Costos de 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

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



Costos de mano de obra directa

Costos Indirectos

Costos de mano de obra indirecta



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

Costos operativos




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

Costo Total

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

Equipos similares

				
SOLICITADO				
COTIZACION : JH0516-1A				
5.3.C ENERGÍAS RENOVABLES (Alternativas) (Versión Computarizada)				
ITEM	EQUIP	CANT.	DESCRIPCIÓN	PRECIO (PVP)
1	EFO	1	Equipo de Fotoelasticidad	13.493,50
Incluyendo las siguientes probetas:				
	EFO-K1	1	Kit de probetas básico	

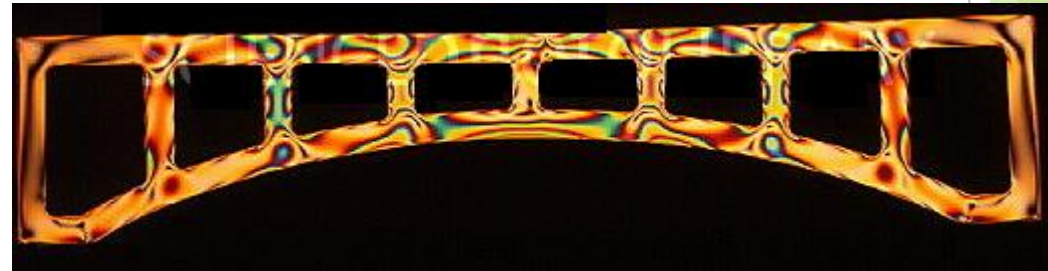
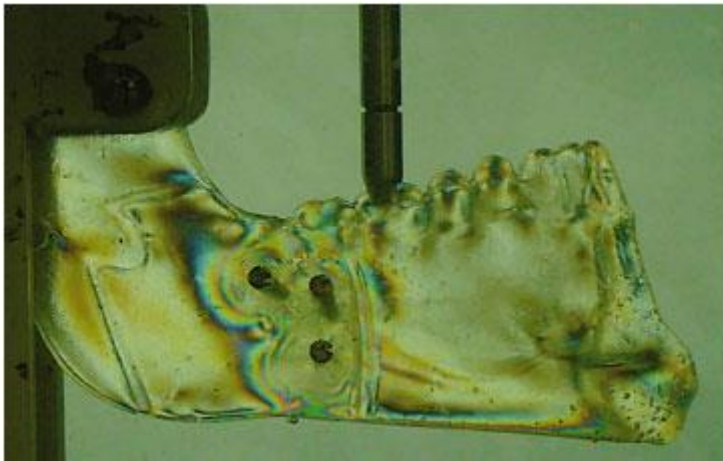
Aplicaciones

ASTM D-638

Tensile Properties of Plastics

ASTM D-882 Tensile Properties
of Thin Plastic Sheetin

FOTOELASTICIDAD



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.

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.

GRACIAS