



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VIVIANE DOS SANTOS PEDREIRA

**CONSTRUÇÃO DE POLARISCÓPIO LINEAR PARA ENSAIO DE  
TENSÃO EM VIGAS COM GEOMETRIAS BIOINSPIRADAS**

CRUZ DAS ALMAS- BA

2022

VIVIANE DOS SANTOS PEDREIRA

**CONSTRUÇÃO DE POLARISCÓPIO LINEAR PARA ENSAIO DE  
TENSÃO EM VIGAS COM GEOMETRIAS BIOINSPIRADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal do  
Recôncavo da Bahia como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Vânio Vicente S. de  
Souza

CRUZ DAS ALMAS- BA

2022

VIVIANE DOS SANTOS PEDREIRA

## CONSTRUÇÃO DE POLARISCÓPIO LINEAR PARA ENSAIO DE TENSÃO EM VIGAS COM GEOMETRIAS BIOINSPIRADAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do discente **Viviane dos Santos Pedreira**, apresentado à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharela em Ciências Exatas e Tecnológicas.

Aprovada em 04 de agosto de 2022.

### COMISSÃO EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente  
 VANIO VICENTE SANTOS DE SOUZA  
Data: 13/09/2022 11:29:30-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

---

**Profº Me. Vânio Vicente Santos de Souza UFRB**  
**Orientador**

*Jania Betania Alves Da Silva*

---

**Profª Dra. Jânia Betânia Alves da Silva**  
**Examinador 02**

Documento assinado digitalmente  
 MANASSES ALMEIDA GOMES  
Data: 14/09/2022 13:28:35-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

---

**Profº. Dr. Manassés Almeida Gomes**  
**Examinador 03**

*“Eis que Deus é a minha salvação; nele confiarei, e não temerei, porque o Senhor Deus é a minha força e o meu cântico, e se tornou a minha salvação.*

*Isaías 12:2*

## AGRADECIMENTOS

Agradecer depois de tantas lutas e batalhas vencidas, graças a cada um que aqui citarei, depois de todo apoio e força quando eu estava exausta, é muito fácil. Não tenho como não citar o Nome dentre todos os nomes. Obrigada meu Jeová Jireh, pois me honrastes com tamanha vitória. Obrigada a minha família: a minha mãe Maricelia, meu pai Vanderlan, a minha irmã Carina, meu irmão Vanderson e meu sobrinho João e a minha amiga Joana.

Agradeço também ao professor Vanio que aceitou o desafio de orientar-me mesmo no período da pandemia, de forma remota. Agradeço ao gestor/gerente da DIMAN na Cerb, onde estagiei, Endric. Também aos colaboradores da Cerb que me ajudaram de alguma forma na construção do equipamento para realização dos experimentos: sr. Jorge, Nilton, Waldik e as meninas, Sandrinha, Clay e Fernanda. Agradeço de todo coração ao coordenador do curso de Engenharia Mecânica, Abdon, e a todos aqueles que de alguma forma fizeram parte da construção desse capítulo da minha vida.

## RESUMO

O trabalho emprega a fotoelasticidade na análise das variações de deformação em componentes mecânicos através da construção de um polariscópio plano de transmissão. A técnica consiste na utilização de uma luz polarizada que transpassa elementos transparentes, polimetilmetacrilato (acrílico), submetidos a deformação, tendo como consequência a variação multi-cor do espectro de franjas relacionado à intensidade de tensão a qual a peça está sujeita. O polariscópio e os corpos de prova foram de ante-mão modelados em software 3D procedendo-se com sua construção em chapas de aço carbono e polimetilmetacrilato, respectivamente, descritos no capítulo Materiais e Métodos. Foram realizados ensaios de flexão com carga centrada biapojada, nos modelos curvos A e B, com furos em formatos elípticos baseados em mapeamentos das elipses de uma estrutura óssea real, observando de forma comparativa a distribuição de franjas ao longo de suas estruturas e as direções das tensões principais. O modelo C (de superfície lisa e sem furos), por se tratar de uma peça usada no trabalho de Melo (2019), foi usado apenas para calibrar o polariscópio. O modelo revisado do polariscópio mostrou-se eficaz para obtenção, através de imagens, das variações de deformação através dos corpos de prova. Foram escolhidas duas seções transversais para decomposição das franjas. Nas análises observou-se que a Seção 1 do modelo A tem coeficiente de concentração de tensão 19,1% menor comparado a Seção 1 do modelo B, e a Seção 2 de A apresentou 15,75% menor que a Seção 2 de B. Os modelos mostraram distribuições de tensões equilibradas, com variação de tensão-deformação que se estendem ao longo das mesmas direções longitudinais. No que tange a busca de sustentabilidade na utilização dos materiais, a concepção de projetos bioinspirados com materiais “vazados” podem contribuir com o decréscimo da quantidade de material de um modelo para o outro (C com  $0,019\text{Kg} \pm 0,001$  e A com  $0,018\text{Kg} \pm 0,001$ ) bem como seus valores de  $\delta_{méd}$ , indicam soluções economicamente mais viáveis em casos de projetos mecânicos com exigências baixas de concentrações de tensão, conservação das tensões admissíveis de projeto e redução de peso.

**Palavras-chave:** polariscópio; fotoelasticidade; tensões.

## ABSTRACT

The work employs photoelasticity in the analysis of strain variations in mechanical components through the construction of a transmission plane polariscope. The technique consists of using a polarized light that passes through transparent elements (acrylic) subjected to deformation, resulting in the multi-color variation of the fringe spectrum related to the intensity of tension to which the piece is subjected. The polariscope and the specimens were modeled beforehand in 3D software, proceeding with their construction in carbon steel and acrylic sheets, respectively, described in the chapter Materials and Methods. Flexion tests were carried out with a centered bi-supported load, in curved models A and B, with holes in elliptical formats based on mappings of the ellipses of a real bone structure, observing in a comparative way the distribution of fringes along their structures and the directions of the main tensions. The C model (smooth surface and without holes), as it is a part used in the work by Melo (2019), was used only to calibrate the polariscope. The revised model of the polariscope proved to be effective for obtaining, through images, the variations of deformation through the specimens. Two cross sections were chosen to decompose the fringes. In the analysis, it was observed that Section 1 of model A has a stress concentration coefficient 19.1% lower compared to Section 1 of model B, and Section 2 of A presented 15.75% lower than Section 2 of B. The models showed balanced stress distributions, with stress-strain variation extending along the same longitudinal directions. Regarding the search for sustainability in the use of materials, the design of bioinspired projects with "leaked" materials can contribute to the decrease in the amount of material from one model to the other (C with  $0.019\text{Kg} \pm 0.001$  and A with  $0.018\text{Kg} \pm 0.001$ ) as well as their  $\delta_{\text{avg}}$  values, indicate more economically viable solutions in cases of mechanical projects with low stress concentration requirements, conservation of admissible design stresses and weight reduction.

**Keywords:** polariscope; photoelasticity; tensions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01:	Partes integrantes do polariscópio.....	14
Figura 02:	Franjas Isoclínicas e Isocromáticas.....	18
Figura 03:	Ordem das franjas em relação à tensão.....	19
Figura 04:	Luz polarizada (a) plana, (b) circular e (c) elíptica.....	23
Figura 05:	Obtenção das elipses. ....	26
Figura 06:	Representação das elipsoides em 3D obtidas através da Eq. 2.6.....	27
Figura 07:	Luz atravessando polarizador e polaróides do polariscópio construído..	28
Figura 08:	Posicionamento dos eixos dos polarizadores.....	29
Figura 09:	Fluxograma do processo construtivo.....	30
Figura 10:	Corte do corpo de prova A.....	31
Figura 11:	Figura 11: Corte do corpo de prova B.....	31
Figura 12:	Corte do corpo de prova C.....	32
Figura 13:	Foto do polariscópio e seu desenho 3D.....	33
Figura 14:	Vista explodida do polariscópio.....	34
Figura 15:	Sistema de carregamento.....	35
Figura 16:	Etapas dos ensaios e análises.....	36
Figura 17:	Distribuição da cor branca nos quatro quadrantes das elipses.....	40
Figura 18:	Análise do deslocamento de 2 mm para os modelos A e B.....	42
Figura 19:	Análise do deslocamento de 4 mm para os modelos A e B.....	44
Figura 20:	Análise do deslocamento de 6 mm para os modelos A e B.....	46
Figura 21:	Análise do deslocamento de 8 mm para os modelos A e B.....	48
Figura 22:	Polariscópio linear feito em chapa metálica.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01:	Cores e a ordem das franjas fotoelástica .....	24
Tabela 02:	Outros arranjos dos elementos óticos para um polariscópio circular.....	29
Tabela 03:	Dimensões dos corpos de prova .....	32
Tabela 04:	Deformação aplicada aos modelos A, B e C.....	37
Tabela 05:	Valores máximos e médios de $\delta$ nas seções em A e B – deslocamento de 2mm.....	41
Tabela 06:	Valores máximos e médios de $\delta$ nas seções em A e B – deslocamento de 4mm.....	43
Tabela 07:	Valores máximos e médios de $\delta$ nas seções em A e B – deslocamento de 6mm.....	45
Tabela 08:	Valores máximos e médios de $\delta$ nas seções em A e B - deslocamento de 8mm.....	48
Tabela 09:	Valores dos deslocamentos a cada 2mm em quilograma.....	50
Tabela 10:	Valores dos deslocamentos a cada 2mm em Newton.....	50

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 01: PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ACRÍLICO (PMMA).....	32
QUADRO 02: PROPRIEDADES ÓPTICAS DO ACRÍLICO.....	33

## LISTA DE SIMBOLOS

$b$ : espessura do modelo

$c$  - velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s no vácuo)

$C1$  e  $C2$  – constantes ópticas

$\delta$ : Diferença de fase linear entre uma componente de luz em relação à outra

$\sigma_1$  e  $\sigma_2$  : tensões nas direções principais

$\delta_1$  : Diferença de fase linear no eixo da tensão principal maior

$\delta_2$  : Diferença de fase linear no eixo da tensão principal menor

$E$ : módulo de elasticidade

$f$  – frequência

$K$ : coeficiente ótico de deformação do material

$N$  - número da ordem da franja

$\Delta N$ : variação da ordem de franja

$\emptyset$  : parâmetro das isoclínicas

$\Delta P$ : variação do carregamento [N]

$P$ : carga aplicada [N]

$T$  - período (tempo necessária para a passagem de dois picos de onda)

$\lambda$  - comprimento de onda

$n_0$  - índice de refração do sólido no vácuo antes da aplicação dos esforços

$n_1$  e  $n_2$  - índice de refração para as vibrações que atravessam o sólido nas direções da tensão principal

$\nu$  - coeficiente de Poisson

$\omega$  - frequência angular

## Sumário

<b>1 Introdução</b> .....	<b>14</b>
1.1 Problema da Pesquisa .....	16
1.2 Justificativa .....	16
1.3 Objetivo Geral .....	16
1.4 Objetivos específicos .....	16
1.5 Estrutura da monografia .....	17
<b>2 Referencial Teórico</b> .....	<b>18</b>
2.1 Fotoelasticidade .....	18
2.2 Modelos estruturais bioinspirados .....	21
2.3 Conceitos teóricos .....	<b>23</b>
2.3.1 Polarização da luz .....	23
2.3.2 Índice de refração.....	25
2.3.3 Fotoelasticidade de transmissão plana .....	26
2.3.4 Fotoelasticidade de Reflexão .....	26
2.4 Anisotropia das elipses ósseas aplicadas as vigas .....	27
2.5 Polariscópio plano .....	28
2.5.1 Polariscópio circular .....	29
<b>3 Materiais e Métodos</b> .....	<b>31</b>
3.1 Modelagem e características dos corpos de prova .....	31
3.2 Propriedades mecânicas dos corpos de prova.....	33
3.3 Construção do polariscópio de transmissão plana .....	34
3.4 Sistema para aplicação de deformação .....	36
3.5 Aplicação do método experimental fotoelástico .....	37
3.7 Ensaio com os modelos A, B e C .....	38
3.8 Determinação dos parâmetros do espectro fotoelástico.....	39
<b>4 Perfil das distribuições das tensões</b> .....	<b>40</b>

<b>5 Resultados e discussões .....</b>	<b>41</b>
5.1 Ensaio de flexão com deslocamento de 2mm .....	42
5.2 Ensaio de flexão com deslocamento de 4mm .....	44
5.3 Ensaio de flexão com deslocamento de 6mm .....	46
5.4 Ensaio de flexão com deslocamento de 8mm .....	48
5.5 Distribuição de tensões .....	50
5.6 Revisão do polariscópio .....	53
<b>6 Conclusão.....</b>	<b>54</b>
<b>7 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>55</b>
<b>8 Referências Bibliográficas .....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>59</b>
<b>9 APÊNDICE.....</b>	<b>74</b>

## 1 Introdução

O estudo acerca da distribuição de cargas é fundamental para as mais diversas áreas da engenharia. No campo das análises estruturais, várias técnicas foram desenvolvidas com o passar dos anos. Em decorrência dos avanços tecnológicos o método que mais se destaca recentemente é a análise numérica, porém, as mesmas tecnologias computacionais e disponibilidade de softwares que tornam seu uso massivo atualmente, não desonera a utilização da técnica fotoelasticidade na análise de tensões de corpos, principalmente quando se trata de peças com geometrias e carregamentos complexos.

A fotoelasticidade é uma técnica experimental usada em diferentes áreas, com o objetivo de determinar com precisão as deformações em um componente mecânico submetido a tensões. O princípio básico desta técnica foi evidenciado por David Brewster em 1816, ele confeccionou um corpo de prova a base de vidro, o submeteu a uma carga e incidiu uma luz polarizada, observou-se o contorno colorido que se formou por causa das tensões atuantes no corpo de prova. O nome da técnica reflete a própria natureza do método experimental, que utiliza raios de luz e técnicas ópticas para o estudo das tensões e deformações. (MARTINS, 2005)

De Assis (2013) define a fotoelasticidade como um método experimental de análise, que utiliza o fenômeno conhecido como birrefringência por tensão, ou birrefringência mecânica, propriedade que alguns materiais apresentam ao serem submetidos à ação de esforços mecânicos.

A birrefringência ou a dupla refração é o ramo da óptica usado na investigação de materiais isotrópicos (que apresentam a dupla refração temporária) e materiais anisotrópicos (que possuem características intrínseca de dupla refração). Ou seja, quando uma onda linearmente polarizada incide no material, inicialmente, submetido a um esforço externos, ela se dividindo em duas ondas, uma é chamada de onda ordinária e a outra extraordinária, ambas possuindo índices de refração distintos e estado de polarização ortogonais entre si (DA SILVA, 2017).

A polarização da luz, necessariamente luz branca, se dá pela utilização de filtros polarizadores. Estes admitem apenas um plano de propagação do espectro eletromagnético da luz, sendo as demais ondas absorvidas pela lente.

Segundo Melo (2019) é possível realizar estudos, com resultados de alta relevância, usando técnicas fotoelásticas, com a possibilidade de visualização das tensões geradas na peça quando o mesmo está sob a influência de cargas. Sendo estas estruturas geométricas tridimensionais, como é o caso das vigas, somente os resultados das modelagens numéricas não são suficientes, por mais refinada que seja a malha, acrescentando incertezas ao projeto, pois não é possível prever as imperfeições resultantes do processo de fabricação ou variações nas multiplicidades das cargas reais, por vezes não disponíveis nas modelagens de softwares.

Para aplicação do método é necessário um equipamento denominado de polariscópio. Existem dois tipos desse equipamento que são usados para análise de tensão: o polariscópio plano e o circular. O polariscópio plano é o mais simples dos sistemas ópticos usados para esse estudo e de grande eficiência. Ele é composto por dois polarizadores lineares e uma fonte de luz.

Nesse contexto, o seguinte trabalho tem como principal objetivo a construção de um polariscópio de transmissão plana, feito em chapa de aço com 1,55mm de espessura, com objetivo de observar e analisar as tensões em três corpos de prova do tipo viga. Concomitante a construção do equipamento, faz parte do trabalho, a análise das tensões impostas às vigas, com geometrias não convencionais, confeccionadas com materiais poliméricos transparentes que, apresentam anisotropia óptica ou birrefringência ao serem deformados. O projeto colabora com a concepção de equipamento que pode fazer parte da prática de experimentos em análise de tensão no segmento óptico pelos cursos de engenharias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB).

## **1.1 Problema da Pesquisa**

A construção de um polariscópio de transmissão plana para a realização de ensaios em corpos de provas vazados com inspiração biomimética pode contribuir para análise da distribuição de deformação com menores concentrações de tensão e com otimização de peso.

## **1.2 Justificativa**

A proposta de projeto e construção do polariscópio de transmissão plana adveio da necessidade de um equipamento de fácil manejo e de baixo custo, para análises experimentais de peças com diferentes geometrias e volumes, inicialmente em forma de viga biapoiada com carga centrada, e comparar as deformações diante da mesma carga aplicada. Para assim confirmar se é viável construir peças com volumes menores, conseqüentemente peso menor, para projetos com mesmas tensões admissíveis.

Outra justificativa desse projeto é anexar o equipamento construído ao laboratório de Engenharia Mecânica da UFRB para uso didático dos professores e alunos dos cursos das engenharias.

## **1.3 Objetivo Geral**

Modelar e construir um polariscópio linear para ensaio de tensão em vigas poliméricas bioinspiradas, com geometrias baseadas no conceito da anisotropia estrutural tridimensional utilizando variações obtidas por furos elípticos bioinspirados na seção transversal dos corpos de prova.

## **1.4 Objetivos específicos**

- Fazer o levantamento bibliográfico de como será projetado o polariscópio e seus acessórios para realização dos estudos;

- Construir um polariscópio linear para análise de deformação a partir das franjas de espectros luminosos;
- Descrever o funcionamento do equipamento construído;
- Ensaiair corpos de provas transparentes, com geometrias não convencionais;
- Analisar o comportamento das deformações (franjas) em duas seções de cada corpo de prova;

## **1.5 Estrutura da monografia**

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco partes: introdução, metodologia, resultados e discussões, conclusão e referências bibliográficas. Na introdução é apresentada a contextualização a respeito do tema, os objetivos gerais e específicos e a justificativa do trabalho.

Na metodologia, foram apresentadas as modelagens dos corpos de prova e do polariscópio, a fabricação das peças do equipamento, a montagem do mesmo: processo de soldagem das peças, furação para fixação de peças parafusadas para facilitar a manutenção, a montagem de um compartimento para fixação de célula de carga entre a ponteira e o fuso de pressão para trabalhos futuros. Por fim, os métodos utilizados para cada experimento contêm imagens e fluxogramas para melhor entendimento.

Nos resultados e discussões, foram apresentados os gráficos com os resultados de cada experimento e a discussão do que ocorreu com cada peça, sobre as relações entre as leituras apresentadas pela célula de carga e as relações das franjas de acordo com cada, explicitando os resultados com base nas teorias.

Na conclusão foi apresentado as considerações sobre o trabalho realizado e também foram feitas sugestões de futuras melhorias a serem feitas no equipamento. Já na referência bibliográfica, encontram-se todos os autores e trabalhos fundamentais para a realização da pesquisas, os quais abordam assuntos relevantes ao tema na construção do trabalho.

## 2 Referencial Teórico

A técnica experimental de fotoelasticidade é muito usada para análise de tensões e deformações nas mais diversas áreas, ela é muito usada na validação ou verificação experimental de soluções numéricas no estudo de distribuição de tensões em problemas de geometrias e carregamentos complexos, bem como, na otimização de formas dos componentes dos projetos mecânicos.

### 2.1 Fotoelasticidade

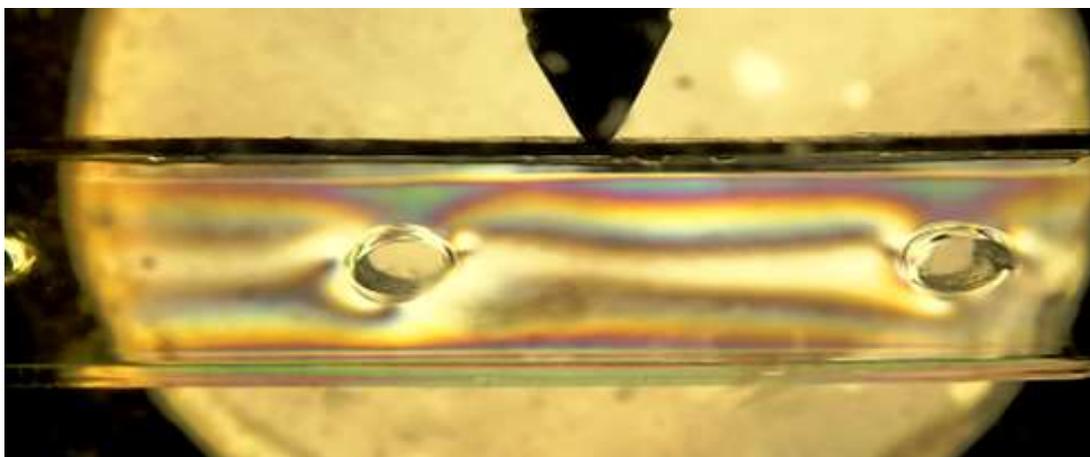
A fotoelasticidade é a técnica experimental para a análise de tensões e deformação utilizando modelos constituídos de materiais incididos por luz polarizada. Os materiais utilizados na técnica apresentam um fenômeno chamado de dupla refração dado a característica do material que tem birrefringência ou anisotropia ótica ao sofrerem uma deformação mecânica. Este fenômeno é observado através de uma luz polarizada plana ou circular.

O método é uma das três técnicas de análise de tensão em materiais mais usadas pelos estudiosos, as outras duas são o método de extensometria (Experimental) e o método de Elementos finitos (MEF – modelagem). A fotoelasticidade tem como principal vantagem a facilidade em determinar o ponto de maior concentração de deformação mesmo em peças de geometrias mais complexas. No método de elementos finitos, os resultados nem sempre são atingidos ou satisfatórios, estes podem apresentar dificuldade de modelagem de cargas complexas e atribuições de propriedades mecânicas dos materiais não convencionais (ZHANG *et al.*, 2012). A extensometria também trabalha com análises práticas como a fotoelasticidade, mas o resultado dessa técnica depende de variáveis como: temperatura, umidade e a fixação linear dos extensômetros.

A técnica proporciona evidências quantitativas de regiões de maior tensão, ao mesmo tempo diferencia regiões menos tensionadas, ou seja, baseiam-se na anisotropia ótica, que é a propriedade que certos materiais transparentes apresentam quando submetidos a tensões, exibindo diferentes índices de refração de luz, com diferentes velocidades de propagação, ou seja, com atrasos relativos dos raios luminosos, tornando perceptíveis os vários fenômenos óticos denotados de

franjas, como é possível perceber na Figura 02, decorrentes da diferença dos índices de refração (DALLY; RILEY, 1978 apud CARMO, 2008).

Figura 02: Franjas Isoclínicas e Isocromáticas.



Fonte: A autora (2022)

Na Figura 02 é possível observar as faixas de cores ou franjas. Essas franjas se dividem em duas classes: isóclinas ou isoclínicas e as isocromáticas. A primeira apresenta regiões onde todas as tensões principais têm as mesmas direções, sendo que essas direções coincidem com o eixo de polarização do polarizador, fornecendo informações sobre as direções das tensões principais no modelo, quando combinadas com os valores das tensões principais a partir do padrão fotoelástico e a segunda é a diferença entre as tensões principais, apresentando a região na qual se obtém o ângulo entre as tensões principais e o eixo do analisador. (ARAÚJO, 2005; QUINAN, 2005).

Percebe-se que onde existem mudanças de geometria, com uma redução maior da seção, aparecem franjas com maior variedade de cores, o que indica à existência do aumento de tensão superior à tensão aplicada pela flecha nas áreas de mudanças bruscas de geometria. Esse aumento das tensões é um fenômeno conhecido como concentração de tensões, explicado pelo princípio de Saint Venant<sup>1</sup> que discorre sobre os efeitos das irregularidades geométricas.

Também, na confecção de peças por processos que envolvem grandes concentrações de calor em regiões de cantos vivos, surgem regiões de tensões residuais. O estado interno de tensão é causado quando um material é submetido a

---

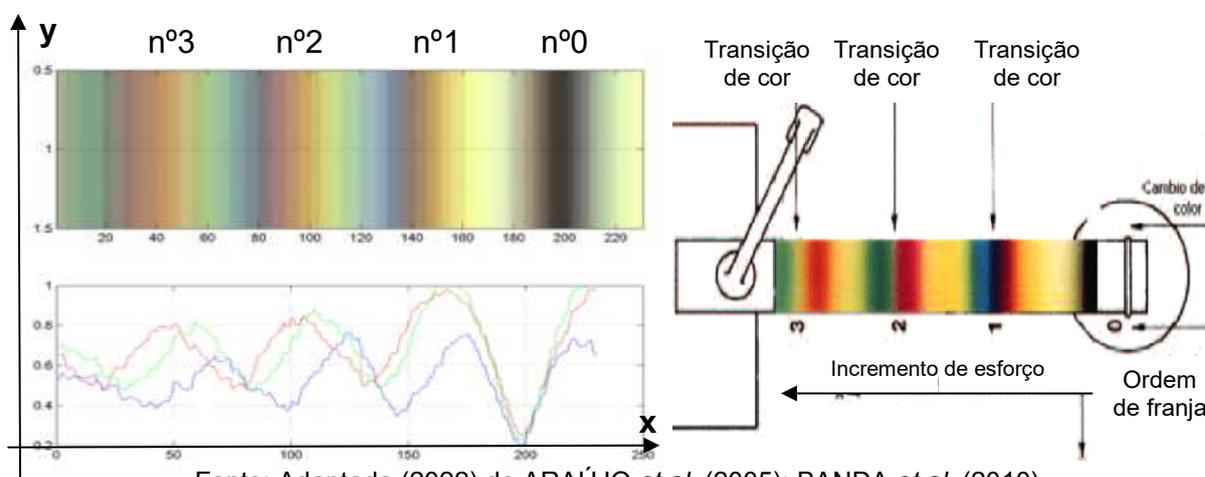
<sup>1</sup>O Princípio de Saint-Venant estabelece que nas regiões localizadas próximo à aplicação de carga ou restrições, o nível de tensão na peça atinge valores elevados e difunde na medida em que se afasta dessas regiões, tendendo ao valor médio de tensão (HORGAN, 1989).

processo térmico ou mecânico, como por exemplo, na estampagem, na laminação e corte à laser dos corpos de prova. Devido ao grande aporte térmico e a rápida solidificação da zona de fusão, essa geração de tensões pode resultar em distorções geométricas de um componente, tornando-se visível a olho nu (MIRIM *et al.*, 2011).

Considerando o modelo a ser testado, em que a matéria é constituída por uma rede de átomos ligados, por uma nuvem de elétrons, equivalente a molas com rigidez diferentes. Ocorrendo uma perturbação eletromagnética, como a que é causada por uma luz polarizada direcionada sobre a nuvem de elétrons, viajando com diferentes velocidades e orientação. Essa orientação diferente é responsável pelo surgimento de um leque de cores, representando as tensões e deformações no corpo de prova (CARMO, 2008).

A Figura 03 exprime a relação entre a distribuição das franjas isocromáticas, que são usadas para a análise, observando a ordem das franjas que se mostram diretamente proporcionais à diferença entre as tensões principais, possibilitando determinar os pontos mais críticos do modelo isotrópico.

Figura 03: Ordem das franjas em relação à tensão.



De acordo com Quinan (2005) a ordem das franjas na escala de cores fotoelástica aumenta de acordo com a intensidade da carga aplicada, a qual difere os vários níveis de carregamento. O valor da ordem de franja é obtido a partir da seguinte expressão:

$$N = \frac{\Delta N}{\Delta P} P \quad \text{Eq. 2.1}$$

## 2.2 Modelos estruturais bioinspirados

Por toda sua existência o homem inspirou-se na natureza. Ao longo da história, sempre a observou e aprendeu com ela, como exemplo comum tem-se o velcro criado por George de Mestral a partir do design das sementes de bardana<sup>2</sup>, assim como os winglets do avião Airbus A380, inspirado nas asas da águia-das-estepes (PICARD, 2010). As fontes de inspiração bioinspiradas contribuem na aplicação de tecnologias de energia passiva que reduzem significativamente as ações exploratórias, devastadoras, atitudes que desencadeiam, até os dias atuais, desequilíbrio de todo o ecossistema.

O campo da biomimética, também conhecida como mimetismo natural, relaciona formas e funções de produtos criados em conformidade com a natureza. O objetivo dessa ciência é explanar para a indústria, ao comércio, as empresas de modo geral, que o desenvolvimento sustentável não só é possível, mas também, apresenta meios econômicos, ferramentas para o desenvolvimento de produtos e soluções otimizadas, inter-relacionadas com a natureza.

O engenheiro biomédico Otto H. Shmitt foi o primeiro estudioso a usar o termo biomimetics em 1950. O termo continuou sendo usado por seus colegas na área de biomedicina e tinha como base dos estudos a imitação dos processos, métodos e mecanismos presentes na natureza, por meio de sintetização artificiais de mecanismos naturais. Em 1958 o major Jack Ellwood desenvolveu trabalhos e definiu o termo Biônica por “Ciência dos Sistemas em que o funcionamento é baseado nos sistemas naturais, ou que apresentem características específicas dos sistemas naturais, ou ainda que sejam análogas a estes.” Este termo atualmente é muito usado na robótica. (QUEIROZ; AGUIAR; ARAUJO, 2017)

Segundo os autores, citados no parágrafo anterior, somente na década de 70 o casal John Todd e Nancy Jack criaram um grupo chamado de The New Alchemy Institute defendiam que as necessidades humanas fundamentais poderiam ser supridas por soluções sustentáveis a partir do estudo das ciências naturais. Essa discussão ganhou força após o lançamento do livro “Biomimicry: Innovation Inspired by Nature” lançado em 1997 por Janine Benyus.

---

<sup>2</sup> A Bardana é uma planta medicinal, também conhecida como bardana-maior, erva-dos-pegamassos, pega-moço ou orelha de gigante, muito utilizada no tratamento de problemas dermatológicos.

O termo Biomimicry, no grego *bios* significa vida e *mimēsis*, imitação, se traduz no português Biomimética. A pesquisadora americana Janine Benyus (1997) aprimorou sua definição e difundiu o termo. Segundo ela a resolução dos problemas deve incluir aspectos de sustentabilidade, de conexão, de respeito à natureza e ser embasadas na tríade: natureza como modelo (inspiração e mimese nas soluções), medida (padrão ecológico como parâmetro para as inovações) e mentoria (nova forma de ver e valorizar a natureza, cujas bases se sustentam).

Usar a natureza como referência nas criações, a partir de observações de animais e estruturas presentes no meio ambiente, é imitar soluções de engenharia que tem implementações datadas de 3,8 bilhões de anos. Segundo Benyus (1997), quanto mais os modelos artificiais funcionarem e se parecerem com a natureza, maior a probabilidade de sucesso.

Os estudiosos da biomimética buscam na natureza modelos de inspirações, considerando que ela baseia-se num padrão evolutivo de otimização de recursos naturais e uso mínimo de energia. É nesse âmbito, da imitação, inspiração nos modelos, nos processos da natureza, que os biomimeticistas procuram respostas com vista a solucionar as questões atuais.

A Agência Brasil (2021) publicou que a escassez de insumos e matérias-primas nacionais para produção industrial atingiu cerca de 73% e para indústria da construção cerca de 72%. Portanto, buscando soluções para consumos sustentáveis em projetos mecânicos, os corpos de provas utilizados para as análises de deformação desse trabalho utilizou a biomimética na confecção peças com menor volume de matéria-prima (corpos de provas com furos), mas que suportem aplicações das mesmas tensões ou cargas próximas as suportadas por peças maciças.

## 2.3 Conceitos teóricos

### 2.3.1 Polarização da luz

Os olhos humanos conseguem enxergar a cor a partir da frequência e dos comprimentos de onda do vetor luz. A luz quando é dita branca possui sete intervalos de comprimentos de onda, cada uma corresponde a uma cor e a resposta fotoelástica é estudada a partir dos efeitos de cada um desses comprimentos de onda. As cores do espectro visível da luz variam entre o vermelho escuro, com frequência de  $390 \times 10^{12} \text{Hz}$ , e o violeta, ao qual corresponde uma frequência de  $770 \times 10^{12} \text{Hz}$ .

O físico James Clerk Maxwell em sua teoria mostra que a luz é uma perturbação eletromagnética que se propaga como um vetor normal à direção de propagação, essa excitação pode ser considerada como uma onda senoidal expressa numa direção preferencial. Quando um feixe de luz polarizada se propaga através de uma amostra fotoelástica sujeita a uma carga externa, o vetor de luz se divide em dois feixes com planos e vibrações diferentes, paralelos cada um a uma das tensões principais, conforme ilustrado na Figura 04. Esses feixes viajam ao longo dos dois caminhos, com velocidades dependentes das tensões a que o corpo está sujeito naquele ponto em análise (ARAÚJO, 2006).

Segundo Silva et al. (2008), a diferença entre as tensões principais é proporcional à diferença dos índices de refração nos dois planos principais, o qual o valor corresponde a tensão de cisalhamento no ponto, e esse fenômeno pode ser calculado com a Eq.2.2. O desenvolvimento da equação 2.2 encontra-se no Apêndice 9.1.

Eq. 2.2

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \tau = \frac{KN}{2b}$$

Onde:

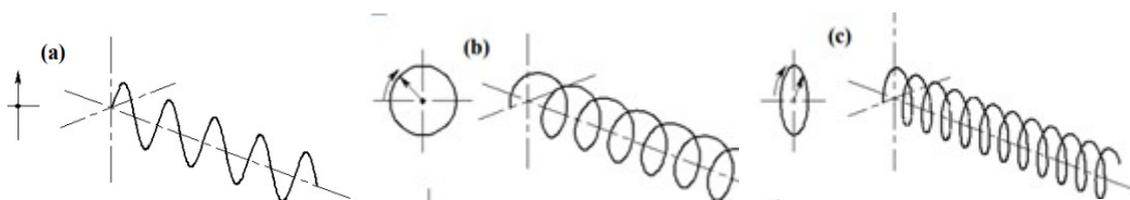
- \_  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ : Tensões principais [MPa];
- \_ K: Constante ótica do material fotoelástico [N/mm];
- \_ b: espessura do modelo em análise [mm];

- \_ N: é a ordem da franja isocromática que é lido no polariscópio;
- \_  $\tau$  : média da tensão de cisalhamento.

Segundo Silva *et al.* (2008) o fenômeno da dupla refração artificial se dá quando a onda sai do corpo com uma defasagem dada pela diferença do número de ciclos dos dois raios que passam pelo corpo. A luz ao passar pelo filtro escolhido, só permite a passagem da luz cujo plano de oscilação coincide com a direção do eixo filtro visualizador, onde ocorre a polarização da luz. A cor da luz que será possível ver a olho nu é determinada pela frequência da onda, descrito matematicamente pela Eq. 2.3.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Figura 04: Luz polarizada (a) plana, (b) circular e (c) elíptica



Fonte: Adaptada pela autora de HENDRY(1966).

Essa onda de luz orientada após passar pelo filtro é chamada de luz polarizada e tem as formas da Figura 04(a). Dessa polarização pode-se obter superposição de ondas no mesmo plano, com mesma frequência, mas com fases diferentes (polarização plana linear com ondas de fases diferentes), e ondas vibrando em planos ortogonais gerando ondas em formatos elípticas ou circulares (polarização circular). A intensidade de luz observada no analisador é representada pelas Eq. 2.4 e Eq. 2.5, descritas por Silva (2008) para o polariscópio plano e circular, respectivamente:

$$I = \text{sen}^2 \phi * \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$I = \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Onde:

- $\phi$ : ângulo entre a direção de polarização e a direção das tensões principais, denominado de parâmetro das isoclínicas;

- $\alpha$ : ângulo de fase entre os vetores de luz as direções das tensões principais, denominado de parâmetro das isocromáticas.

### 2.3.2 Índice de refração

A anisotropia ótica inerente a certos materiais transparentes apresentam diferentes índices de refração quando submetidos a um estado de tensão. O índice de refração de um objeto pode ser definido a partir da relação entre a velocidade de propagação da luz no vácuo e a velocidade de propagação da mesma em um material. Essa interação de propagação entre dois materiais diferentes chama-se de índice de refração relativo de um meio para um segundo material (SILVA, 2008).

O material homogêneo e isotrópico possui índice de refração constante e independente da direção de deslocamento da luz. Esses materiais que apresentam propriedades fotoelásticas como o acrílico, sofrem mudanças de índice de refração quando submetidos à tensão, deixando de se comportar como um material homogêneo, assumindo características mecânicas de um material heterogêneo na presença de carregamentos (CARMO, 2008).

O pesquisador Maxwell percebeu que as variações nos índices de refração em um elemento transparente acontecem de acordo com a variação das tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  em um corpo fotoelástico MARTINS (2005).

O uso de uma luz monocromática gera pontos claros, cinzas e negros. Já ao utilizar uma luz branca, as cores aparecem por causa da anulação de comprimentos de ondas específicos. Utilizando a Eq. 2.2, Ferreira e Bermudes (2004) descreveram valores de ordem de franjas isocromáticas N e as respectivas cores. Os valores são mostrados na Tabela 01.

Tabela 01: Cores e a ordem das franjas fotoelástica

Cor	Retardação (mm)	N
Preto	0	0
Cinza	160	0,28
Branco	260	0,45
Amarelo	345	0,6
Laranja	460	0,8
Vermelho opaco	520	0,9

Roxo	575	1,00
Azul escuro	620	1,08
Azul esverdeado	700	1,22
Verde/Amarelo	800	1,39
Laranja	935	1,63
ROSA	1050	1,82
Violeta	1150	2,00
Verde	1350	2,35
Verde amarelado	1440	2,50
Vermelho	1520	2,65
vermelho esverdeado	1730	3,00

---

Fonte: FERREIRA; BERMUDES (2004)

### 2.3.3 Foelasticidade de transmissão plana

O estudo das tensões em um modelo plano, ao ser deformado, é denominado método da fotoelasticidade de transmissão plana. As características estruturais do material devem ser isotrópica homogênea, transparente e com propriedades óticas que possibilitem a visualização da dupla refração temporária ou a anisotropia ótica (SPINELLI, 2004)

### 2.3.4 Fotoelasticidade de Reflexão

A técnica de reflexão permite uma visualização global do campo de tensão e deformação a que se submete o modelo ou o conjunto analisado. Esse método não exige uma confecção de corpos de prova, pois a obtenção dos parâmetros se dá diretamente na peça, ou estrutura, quando este se encontra sob carregamentos reais (ARAÚJO, 2006).

Com tudo, para a visualização das deformações, é imprescindível a aderência de uma película com propriedade fotoelástica sobre a superfície do material analisado com o auxílio de uma cola com propriedades reflexivas. Em seguida, o padrão de franjas poderá ser observado em um polariscópio, evidenciando o perfil das deformações no componente (SCHIAVON, 2010).

## 2.4 Anisotropia das elipses ósseas aplicadas as vigas

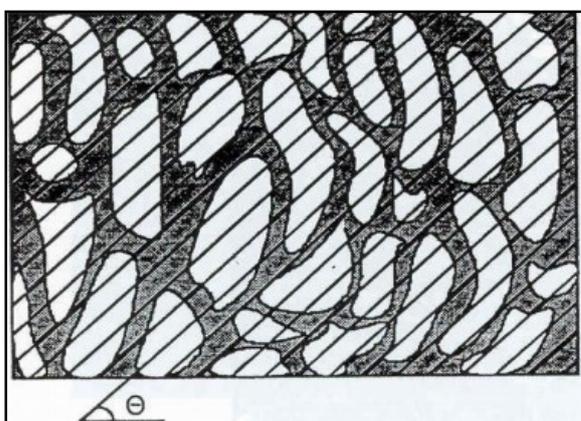
A anisotropia é a relação de dependência da propriedade física e mecânica dos materiais com a direção cristalográfica que for feita a medida, isto é, depende de como os elementos estruturais são orientados.

Pesquisas atuais sobre a anisotropia na estrutura óssea sugerem que existem preponderâncias de dois tipos de elipsóides em seu elemento estrutural, eles são elementos inspiradores para a análise de tensões em seu entorno durante o carregamento das vigas utilizadas neste trabalho em questão, as descrições sobre como foram obtidos tais elipses a serem utilizadas no trabalho, se encontram expostas neste tópico 2.4.

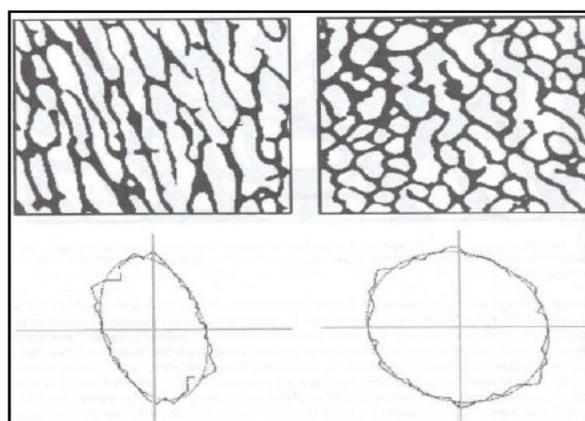
Segundo Da Silva (2009), em 1974 Whitehouse utilizou a medida do comprimento da interseção média para descrever a anisotropia microestrutural. O método baseia-se na contagem de interseção entre uma seção plana de osso trabecular (osso esponjoso) com uma grade de linhas paralelas a interface trabécula/medula óssea (Figura 05(a)). Fez-se a relação do comprimento médio entre duas interseções e o cálculo da razão entre o número de interseções em uma dada direção da grade, e o comprimento total da grade. Através desse método, com a generalização do conceito da anisotropia estrutural para três dimensões gera uma elipsóide, como é ilustrada na Figuras 05(b).

Figura 05: Obtenção das elipses.

a) Interseção seção plana de osso trabecular X grade de linhas



b) Representação das elipsoides



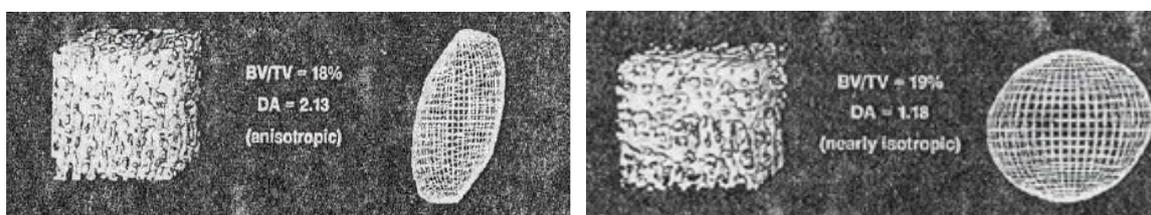
Fonte: DA SILVA (2009).

A Eq. 2.6 é a equação da elipsóide encontrada na amostra de osso trabecular, analisada no trabalho de Da Silva (2009). O desenvolvimento de toda a equação Eq.2.6 encontra-se no Apêndice 9.2.

$$An_1^2 + Bn_2^2 + Cn_3^2 + 2Dn_1n_2 + 2En_1n_3 + 2Fn_2n_3 = \frac{1}{L^2(\theta)} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Ao observar o equacionamento da Eq. 2.6, que se encontra no Apêndice 9.2, encontra-se uma matriz 3x3 da equação, representa um tensor positivo de segunda ordem, que caracteriza a forma geométrica da microestrutura e as direções preferenciais do elipsóide.

Figura 06: Representação das elipsoides em 3D obtidas através da Eq. 2.6.



Fonte: Adaptado de GOLDSTEIN *et al.* (1993) Apud DA SILVA (2009)

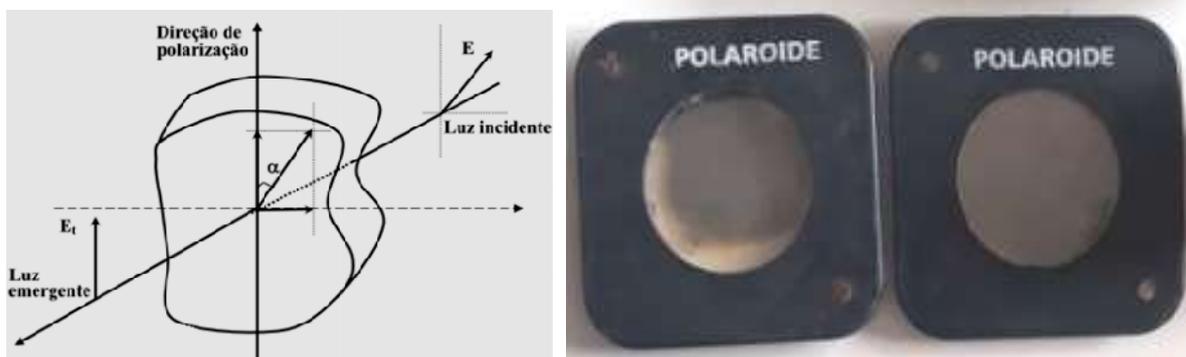
## 2.5 Polariscópio plano

O polariscópio de transmissão pode ser classificado como plano ou circular. O polariscópio plano consiste em dois polarizadores lineares e uma fonte de luz, posicionados ortogonalmente, como ilustrado na Figura 07. O linearizador mais próximo da fonte de luz é chamado de polarizador e o mais afastado analisador. É preciso analisar o arranjo do posicionamento dos eixos de polarização, pois se os linearizadores cruzarem-se nenhuma luz será transmitida através do polarizador analisador.

Observa-se na Figura 07 que é preciso um corpo tensionado entre os linearizadores, do contrário, a intensidade de luz emergindo do equipamento será zero, esse fenômeno é chamado de “campo escuro”. Mas se os eixos estiverem paralelos e não existir um corpo tensionado entre os polarizadores, toda luz passará, e esse fenômeno é conhecido como “campo claro” (CARMO, 2008). No polariscópio

plano as franjas aparecem como faixas escuras ou curvas pretas, denominadas isoclínicas.

Figura 07: Luz atravessando polarizador e polaróides do polariscópio construído.



Fonte: Modificada de ARAÚJO (2006) e a autora (2022)

### 2.5.1 Polariscópio circular

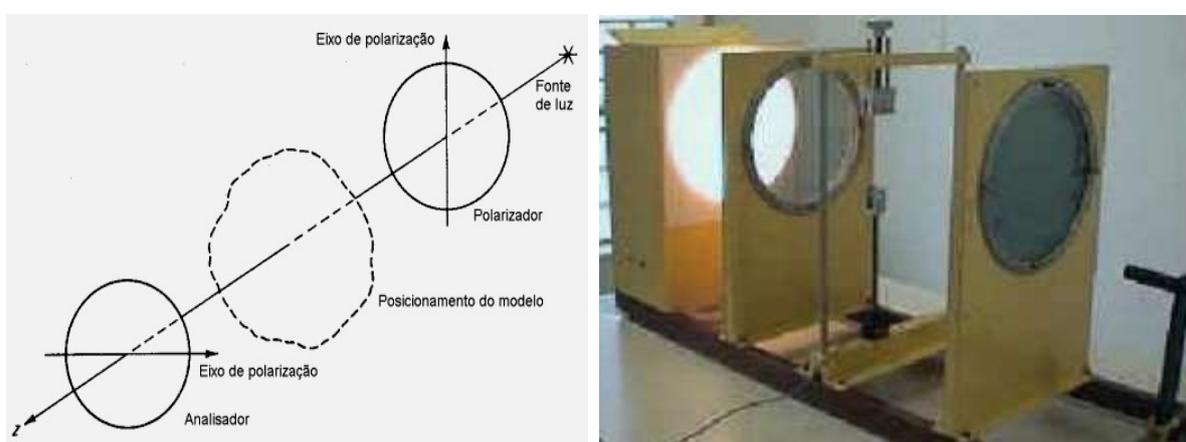
O polariscópio circular é composto por duas lentes retardadoras de  $\frac{1}{4}$  de onda, inseridas entre a lente polarizadora e a lente analisadora, fazendo um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo de polarização.

A luz passa pela primeira lente (polarizadora) que vai converter a luz branca em luz plano-polarizada. O segundo elemento é uma placa de  $\frac{1}{4}$  de onda posicionada em ângulo de  $\frac{\pi}{4}$  em relação ao eixo de polarização, e essa placa de onda polariza a luz plano-polarizada em luz circularmente polarizada. Em terceiro, a segunda placa de  $\frac{1}{4}$  de onda, é posicionada no eixo rápido paralelamente ao eixo lento.

Segundo Carmo (2008) o polarizador divide as luzes incidentes em componentes verticais e transmite as luzes plano-polarizadas remanescentes. O retardador de onda se comporta como um corpo fotoelástico com birrefringência uniforme, orientado com o plano principal em ângulo de  $45^\circ$  em relação ao eixo de polarização. Eles servem para proporcionar igual quantidade de luz ao longo de cada um dos dois planos de polarização em todos os pontos, cruzados em um ângulo de  $90^\circ$ , o plano das ondas de alta velocidade no primeiro retardador, coincide com o plano das ondas de baixa velocidade no segundo retardador.

Carmo (2008) ressalta que se o linearizador analisador for orientado com o eixo de polarização cruzado com o eixo da primeira placa polarizadora, um padrão isocromático de campo-escuro é formado, e o centro das franjas pretas são pontos de valores inteiros de  $N$ . Já se os eixos do polarizador e analisador estão paralelos, um padrão isocromático de campo claro é formado e os centros das franjas também são pontos de valores inteiros de  $N$ . Essa disposição dos elementos óticos constitui a formação padrão de um polariscópio circular que produz um campo. Logo abaixo, na Figura 08, segue a disposição dos elementos óticos num polariscópio circular.

Figura 08: Posicionamento dos eixos dos polarizadores.



Fonte: ANDRADE; SMITH NETO; RIBEIRO (2003).

Existem outros arranjos desses, o que vai variar é o posicionamento das lentes polarizadoras em conjunto com as placas de quarto de onda. Outros possíveis arranjos seguem na Tabela 2.

Tabela 02: Outros arranjos dos elementos óticos para um polariscópio circular

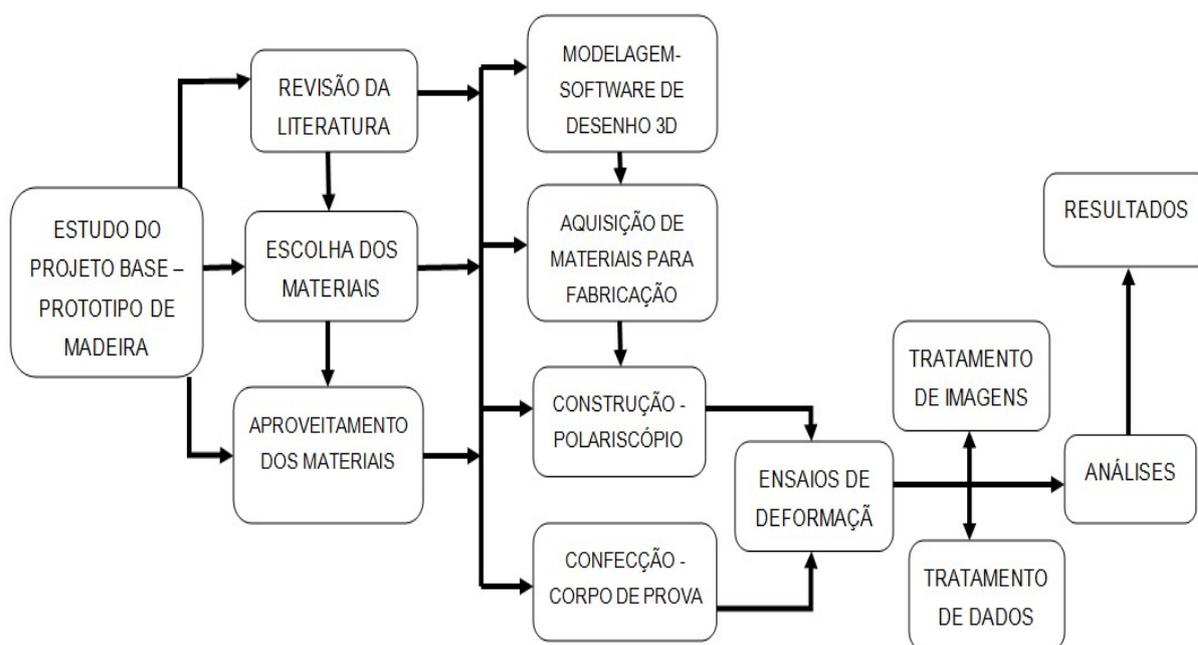
Arranjo	Placas de Quarto de Onda	Polarizador e Analisador	Campo
A	Cruzadas	Cruzados	Escuro
B	Cruzadas	Paralelos	Claro
C	Paralelas	Cruzados	Claro
D	Paralelas	Paralelos	Escuro

Fonte: ANDRADE; SMITH NETO; RIBEIRO (2003).

### 3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os corpos de prova feitos de polimetilmetacrilato, a modelagem e a construção de um sistema ótico de baixo custo (Polariscópio de Transmissão Plano) e os procedimentos experimentais para os ensaios de fotoelasticidade. Na Figura 09, é mostrado o fluxograma das etapas para a realização deste trabalho.

Figura 09: Fluxograma do processo construtivo



Fonte: A autora (2022).

#### 3.1 Modelagem e características dos corpos de prova

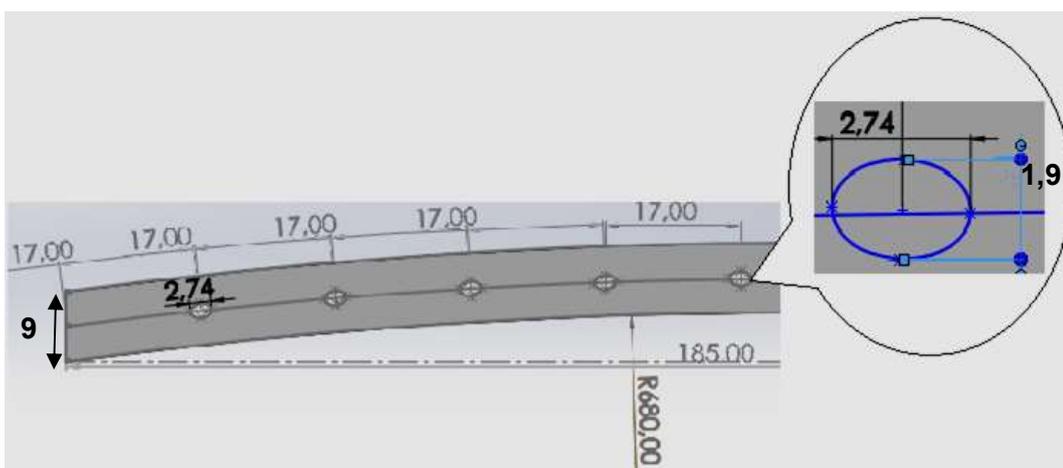
A seleção do material apropriado para a análise fotoelástica deve considerar as vantagens e desvantagem do componente. Sendo assim, os modelos dos corpos de prova são em material de acrílico, cortados à laser, por se tratar de um material com propriedades birrefringentes. Dentre as características relevantes à escolha estão:

- Transparência;
- Baixa fluência;
- Alto módulo de elasticidade;
- Isotropia;
- Homogeneidade;

Baixa influência da temperatura sobre as propriedades;

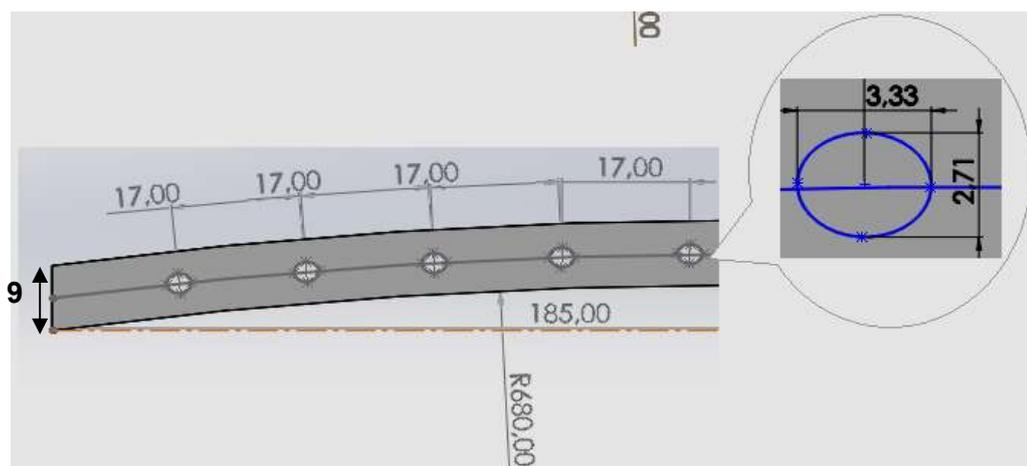
Os modelos ensaiados foram nomeados por corpos de prova A, B e C. Os corpos de prova A e B foram vazados transversalmente por elipses bioinspiradas nas estruturas internas dos ossos, citados no item 2.4. Já o corpo de prova C é de superfície lisa e sem furos, como se mostra na Figura 10, Figura 11 e Figura 12, respectivamente.

Figura 10: Corte do corpo de prova A.



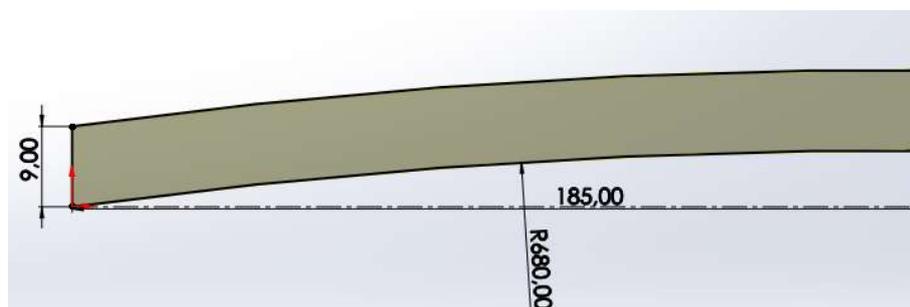
Fonte: A autora

Figura 11: Corte do corpo de prova B.



Fonte: A autora

Figura 12: Corte do corpo de prova C



Fonte: A autora

Os diâmetros dos orifícios presentes em A e B obedecem às equações do tópico 2.2 que diz sobre comprimento médio entre duas interseções e o cálculo da razão entre o número de interseções em uma dada direção da grade, e o comprimento total da grade.

Tabela 03: Dimensões dos corpos de prova

Modelo	Furos (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Peso (Kg)
A	2,74x1,91	9	10	185	16650	0,018
B	3,33x2,71	9	10	185	16650	0,017
C	-	9	10	187	16830	0,019

Fonte: A autora (2022)

### 3.2 Propriedades mecânicas dos corpos de prova

O modelo fotoelástico usado para o ensaio foi o PMMA (Polimetil-Metacrilato). Suas propriedades mecânicas e ópticas podem ser observadas nos QUADRO 01 e 02.

QUADRO 01: PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ACRÍLICO (PMMA)

Propriedades Mecânicas	Método do teste e Condições	Unidade de Medida	Resultado
Resistência Flexível	ASTM D-638:203	MPa	71
Alongamento à Ruptura	ASTM D-785:2003	%	4
Resistência Flexural	ASTM D-790:2003	MPa	98
Módulo de Flexão	ASTM D-790:2003	MPa	2800
Resistência ao Impacto Izod	ASTM D-256:2003	J/m	20
Dureza Rockwel	ASTM D-785:2003	M scake	104

Fonte: Bold Acílicos (2019)

QUADRO 02: PROPRIEDADES ÓPTICAS DO ACRÍLICO (CONT)

Propriedades Ópticas	Método do Teste e Condições	Unidade de Medida	Resultado
Deflexão de Calor	ASTM D-658	°C	105
Flamabilidade	ASTM D-635:2003	mm/min	30
Coefficiente de Dilatação Linear	ASTM D-831:2006	Mm/min/°C	$5,5 \cdot 10^{(-5)}$

Fonte: Canon (2019)

### 3.3 Construção do polariscópio de transmissão plana

Para a construção do equipamento foi utilizado um perfil retangular em chapa de aço como bancada, com dimensões de 400x400mm e espessura de 1,55mm para suporte do conjunto dos componentes do sistema ótico, o sistema de carga, a fonte de luz e a base para o dispositivo de registro de imagem.

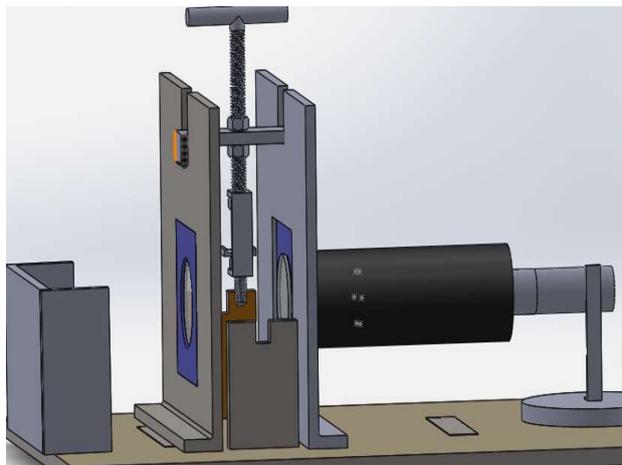
Nessa bancada foram fixadas peças retangulares, uma traseira e uma frontal com medidas de 215x190mm, estas tem furos quadrados de 85x85mm, onde os suportes das lentes linearizadoras foram acomodados. Na Figura 13(a) tem-se a foto do polariscópio e a Figura 13(b) traz a modelagem feita em um software de desenho 3D.

Figura 13: Foto do polariscópio e seu desenho 3D.

b) Foto do polariscópio construído



a) Desenho 3D do polariscópio



Fonte: A autora (2022)

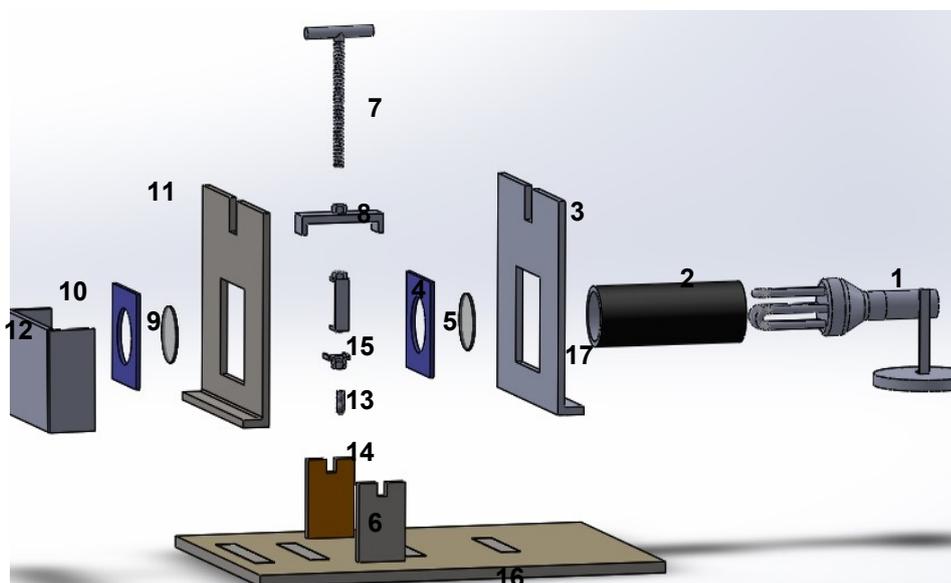
Para compor o conjunto da fonte de luz foi usada uma luminária Spot Sobrepôr para uma lâmpada, branco duto Franzin do formato bulbo com o soquete

E27 de acoplamento da lâmpada ortogonal a base, uma lâmpada fluorescente compacta 20w 220v branca, fria E27, um tubo de PVC de 25mm de diâmetro e uma lâmpada fluorescente. Já a polarização do feixe de luz foi feita através de uma lente e um filtro polarizador (em vidro óptico agc - taxa de polarização de até 99.9% e transmissão de até 99.7%.) circular com 25mm de diâmetro e 1,4mm de espessura, colocados logo após o tubo de PVC por onde a luz se propaga inicialmente, possibilitando, assim, a visualização das franjas que representam as tensões impostas à amostra com propriedades birrefringentes.

O Filtro polarizador projeta um campo elétrico de acordo com os eixos correspondentes às tensões principais dado um certo ponto. Com o segundo filtro, chamado de analisador, observa-se essas tensões. O sistema de carga funciona para diferentes alturas, sendo que a aplicação da carga é feita gradativamente, através de um fuso adaptável, e foi desenvolvido com a adição de uma célula de carga ao conjunto para comparação da tensão mensurada através da teoria da fotoelasticidade e a ddp (diferença de potencia) lido por um voltímetro.

Na região central, na câmara de ensaios, foram colocados os apoios para acondicionamento dos modelos e manteve-se os espaços laterais abertos para facilitar a manipulação dos componentes e variáveis do ensaio. Foi colocado um compartimento para o posicionamento do equipamento de registro das imagens dos ensaios, de maneira que a lente do equipamento de registro ficou concêntrica ao eixo de polarização. A Figura 14 mostra a vista explodida do equipamento.

Figura 14: Vista explodida do polariscópio.



Fonte: A autora (2022)

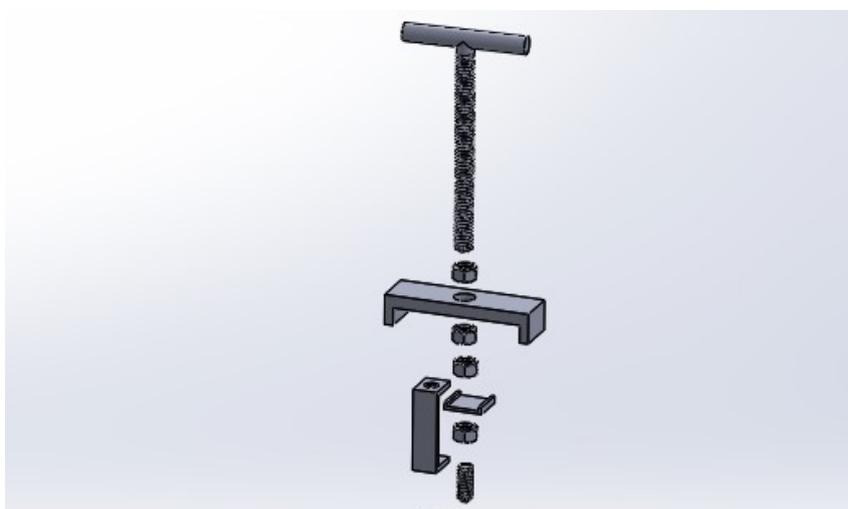
onde,

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1 – Luminária                        | 10 – suporte da lente                              |
| 2 – tubo de PVC                      | 11 – peça frontal da caixa de ensaio               |
| 3 – peça traseira da caixa de ensaio | 12 – suporte do equipamento de registro de imagens |
| 4 – suporte da lente                 | 13 – Chapa apoio da célula de carga                |
| 5 – lente polarizadora               | 14 – ponteira                                      |
| 6 – base-apoio para corpos de prova  | 15 – peça-junta da ponteira-fuso                   |
| 7 – fuso da carga                    | 16 – bancada em chapa                              |
| 8 – chapa guia do fuso               | 17 – Papel de seda de 20g                          |
| 9 – filtro analisador                |  |

### 3.4 Sistema para aplicação de deformação

A Figura 15 mostra o sistema modelado para a aplicação de cargas no corpo de prova. A flecha a ser aplicada ao corpo de prova foi obtida a partir de uma barra roscada de 6mm de diâmetro, uma ponteira, que permitiu aplicar deslocamento de 1mm em meia volta no fuso. O peso do conjunto foi desprezado uma vez que a chapa guia e as porcas são responsáveis por sustentar e suportar o peso das peças frontal e traseira da caixa de ensaio, não transferindo-o para o modelo durante o experimento. A chapa guia e as porcas também ajudam na calibração mais fina da deformação aplicada ao corpo de prova e limitam a movimentação na peça.

Figura 15: Sistema de carregamento



Fonte: A autora (2022)

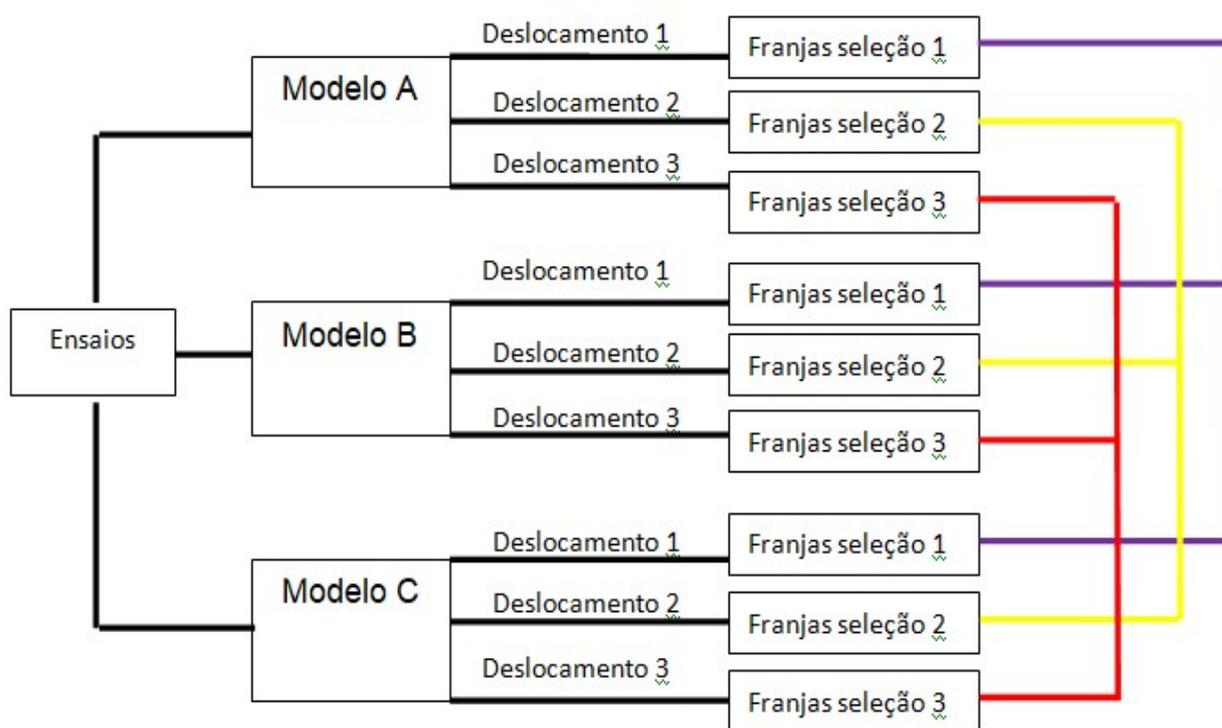
O suporte para a célula de carga foi posicionado de forma ortogonal a peça-junta que une a ponteira, que entra em contato direto com a amostra, e o corpo do fuso responsável por aplicar a flecha de deformação, que também pressiona a célula de carga, conhecida como ponte de Wheatstone, que fará parte de uma otimização futura do trabalho.

### 3.5 Aplicação do método experimental fotoelástico

Os ensaios foram feitos na bancada de chapa de aço, no ambiente com controle de luminosidade (escuro). Os corpos de prova usados foram confeccionados em polimetilmetacrilato. O modelo C foi reutilizado do primeiro trabalho realizado anteriormente por Melo (2019), e os modelos A e B foram corpos de prova novos.

Nos ensaios foram feitas aplicações do método de aplicação de carga em viga biapoiada em três corpos de prova a fim de inferir o comportamento das deformações de mesmo material, porém, com geometrias diferentes. A Figura 16 mostra o quadro esquemático das etapas e critérios de execução e análise dos ensaios.

Figura 16: Etapas dos ensaios e análises



Fonte: A autora (2022)

Dos ensaios realizados nos três corpos, observou-se que os esforços sofridos não superaram o regime elástico, de modo que os corpos retornaram a sua dimensão inicial. Verificou-se esse fato a partir da comparação das franjas evidenciadas antes e depois dos ensaios.

Os registros dos ensaios foram feitos com uma câmera digital Fuji Finepix S4000 superzoom com 14MP, display LCD de 3", zoom óptico de 30x e lente com 24mm a uma distância de 15 cm do corpo de prova.

### 3.7 Ensaios com os modelos A, B e C

Os ensaios começaram a ser feitos obedecendo a seguinte ordem: modelo A, modelo B e por último modelo C. O ensaio de flexão do modelo A consistiu inicialmente no posicionamento do modelo na base-apoio para corpos de prova. Em seguida deslocou-se o fuso até a ponteira encostar-se ao corpo de prova. Foi feito o primeiro deslocamento de 2mm equivalente a um giro completo do fuso. Este valor de deslocamento de 2mm em um giro de 360° no fuso foi relacionado através de medidas usando um paquímetro. Foram feitos quatro deslocamentos e seus valores seguem na Tabela 04. Os resultados obtidos dos ensaios com o modelo A foi comparado com o modelo B, pois os corpos de prova possuem as áreas das seções transversais máximas iguais. Para proteção dos corpos de provas durante a aplicação das cargas e a distribuição da carga na superfície, foi utilizada uma chapa metálica de 0,5mm de espessura e 5cm de comprimento e mesma largura da viga, ver Figura 02.

Tabela 04: Deformação aplicada aos modelos A, B e C

ETAPAS	MODELOS	DESLOCAMENTO (mm)
1	A; B; C	2
2	A; B; C	4
3	A; B; C	6
4	A; B; C	8

Fonte: A autora (2022)

O segundo corpo de prova a ser ensaiado foi o corpo de prova B. Assim como o modelo A, o corpo de prova B foi posicionado na base-apoio para corpos de prova e também ocorreu quatro deslocamentos de 2mm em 2mm, como segue na Tabela 04. O terceiro e último modelo exposto ao ensaio de flexão foi o modelo C. Foram feitas as mesmas etapas realizadas nos ensaios dos modelos A e B.

### **3.8 Determinação dos parâmetros do espectro fotoelástico**

Para caracterizar os parâmetros dos espectros presentes nas distribuições de tensões nos corpos de prova, adotou-se a Figura 03 do capítulo 2, onde foi exibido a faixa de cores e como se dá a distribuição de tensões em uma amostra fotoelástica.

Das imagens retiradas dos ensaios ficaram evidenciadas as distribuições da flecha aplicada aos modelos e com o auxílio de um software Microsoft Paint Clássico versão 21H1, foi possível identificar as cores mais visivelmente.

Segundo Melo (2019), fazendo a conversão da imagem de PNG para BMP, com auxílio do software Microsoft Paint Clássico versão 21H1, é possível aproximar a quantidade de tons da Figura 03 em 256 cores distintas. O formato BMP possibilitou determinar e separar os espectros da Figura 03. A ilustração dessa caracterização segue no Anexo A.

Esse procedimento foi utilizado nas imagens obtidas a partir dos ensaios dos corpos de prova, reduziram-se as cores mostradas nas imagens obtidas, possibilitando a determinação das cores RGB, tendo suas proporções de vermelho, verde e azul, exibidas através da lente do segundo filtro. Com os espectros de cores da distribuição de franjas na fotoelasticidade e espectros de cores em detrimento da aplicação de esforços nos corpos de prova, foi feita uma comparação entre os resultados dos três modelos para quantificar o comportamento da distribuição de tensões ao longo das estruturas analisadas.

## 4 Perfil das distribuições das tensões

Para determinar o perfil das distribuições de tensão foram feitos tratamentos das imagens feitas dos corpos de prova, convertendo as mesmas de PNG em BMP, possibilitando visualizar as regiões com faixas de cores próximas as exibidas no anexo A, mapeou-se e foram feitas investigações das regiões onde foram visualizadas maior concentração de tensões e os respectivos perfis de distribuição de franjas isocromáticas.

No início do século XIX, Thomas Young, através de seus experimentos com superposição de luzes, provou que todas as cores do espectro visível podiam ser representadas como uma soma de três cores primárias (o vermelho, o verde e o azul-violeta). Então, através do anexo A, com auxílio do software Point da Microsoft, foi determinado a quantidade proporcional de tons RGB (red, Green e blue), o número de franjas e o valor de  $\delta$  (diferença de fase linear entre uma componente de luz em relação à outra).

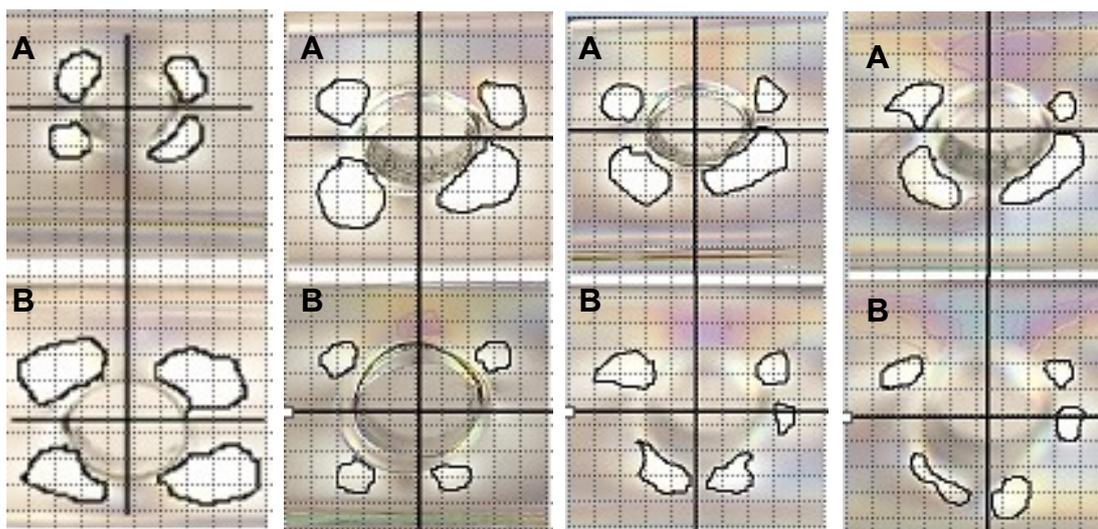
No estudo das imagens foram analisadas duas seções dos modelos com a finalidade de tornar conhecido e quantificar o perfil de cores e suas intensidades RGB ao longo de um pixel de seção das figuras. Assim, com a quantificação dos valores de delta para cada cor, foram construídos gráficos no capítulo 5 para melhor explicar o comportamento e variação de tensões em cada modelo.

## 5 Resultados e discussões

Dentre as análises feitas nesse estudo, observou-se a influência dos efeitos de borda sobre a concentração de tensões ocasionadas pela fabricação do corpo de prova polimérico, para isso, foram analisados três corpos de prova com geometrias distintas, como segue na Tabela 02. Ao analisar os modelos antes dos deslocamentos verticais e depois da execução dos ensaios, observou-se que: antes das realizações dos experimentos, já existiam tensões residuais nos elementos, nos locais dos cortes a laser. Tais fatos são possíveis de observar a uma pequena distância das bordas e dos furos dos modelos A e B e nas arestas do modelo C.

Existem nos quatro quadrantes das elipses uma distribuição da cor branca que muda sua proporção de acordo com o carregamento, essa distribuição tem relação com as variações dos eixos e raios das elipses, como segue na Figura 17.

Figura 17: Distribuição da cor branca nos quatro quadrantes das elipses.



d) A e B sem carregamento, c) A e B- desloc.- 2mm, b) A e B- desloc.- 4mm, a) A e B- desloc.- 6mm

Fonte: A autora (2022)

Medina (2014) afirma que o engenheiro Charles Edward Inglis demonstrou em um ensaio (utilizando uma placa infinita com furos elípticos) sobre mecânica da fratura, que o fator de concentração de tensões cresce à medida que o raio da elipse diminui e a maior tensão atua na extremidade do eixo maior da elipse. Isso quer dizer que furos devem ser mantidos com menor tamanho possível (menos oval possível), pois quanto maior o raio de curvatura, menor a severidade relativa da

concentração de tensões, gerando tensões lineares elásticas singulares em suas bordas.

Percebe-se que as tensões de deformação aparecem nos quatro quadrantes das elipses. O modelo B que possui a elipse mais oblonga exibe uma distribuição ou uma área maior com tensões residuais.

## 5.1 Ensaio de flexão com deslocamento de 2mm

Para realizar os experimentos vedou-se a caixa de ensaio para evitar outra fonte de luz que não fosse a utilizada no equipamento. Foi utilizada uma chapa de alumínio de 0,5mm de espessura, 1 cm de largura e 5 cm de comprimento para manter a pressão sobre a face do corpo de prova uniforme. Após o deslocamento (carregamento) surgiram as primeiras franjas isocromáticas exibindo linhas ao longo dos modelos. As tabelas que se encontram nos Anexos mostram os acréscimos de ordem, indo de uma ordem menor para uma maior em decorrência da deformação causada pela flecha do fuso nos corpos de prova A e B. Na tabela 05 mostra-se os valores dos  $\delta_{méd}$  e os  $\delta_{máx}$  das Seções 1 e 2 dos modelos A e B.

Tabela 05: Valores máximos e médios de  $\delta$  nas seções em A e B – deslocamento de 2mm

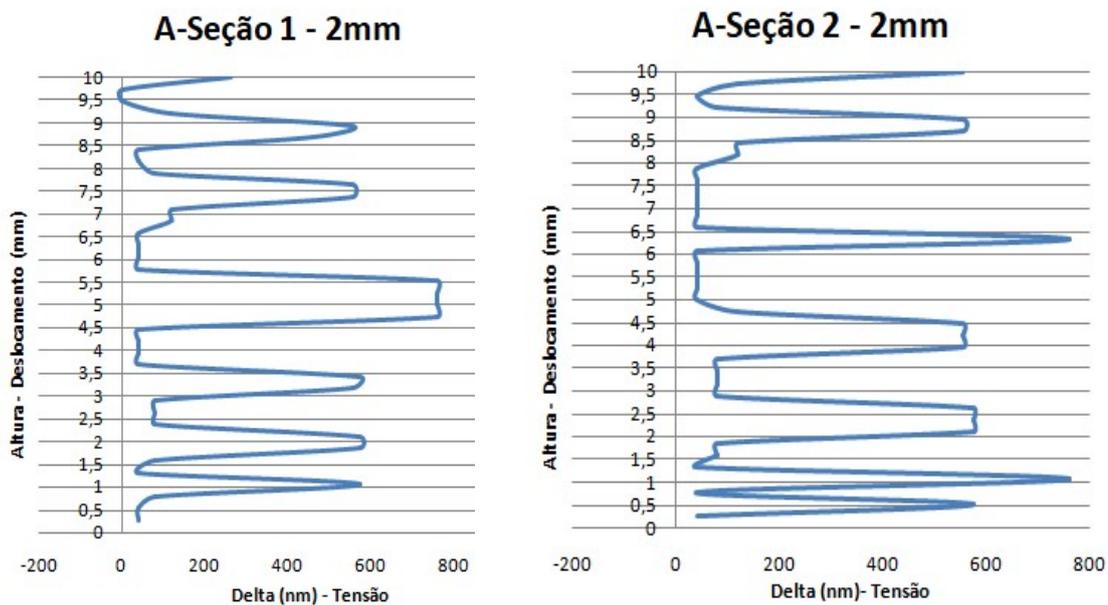
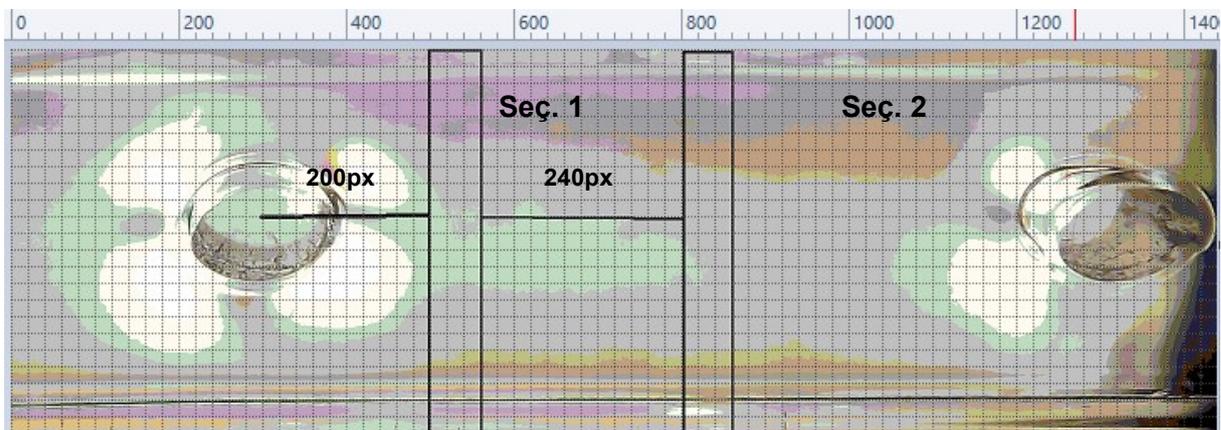
Seção/Modelo	$\delta_{máx}$ (nm)	$\delta_{méd}$ (nm)
Seção 1/Modelo A	760	253,7
Seção 1/Modelo B	1150	390,0
Seção 2/Modelo A	1150	231,3
Seção 2/Modelo B	1150	411,1

Fonte: A autora (2022)

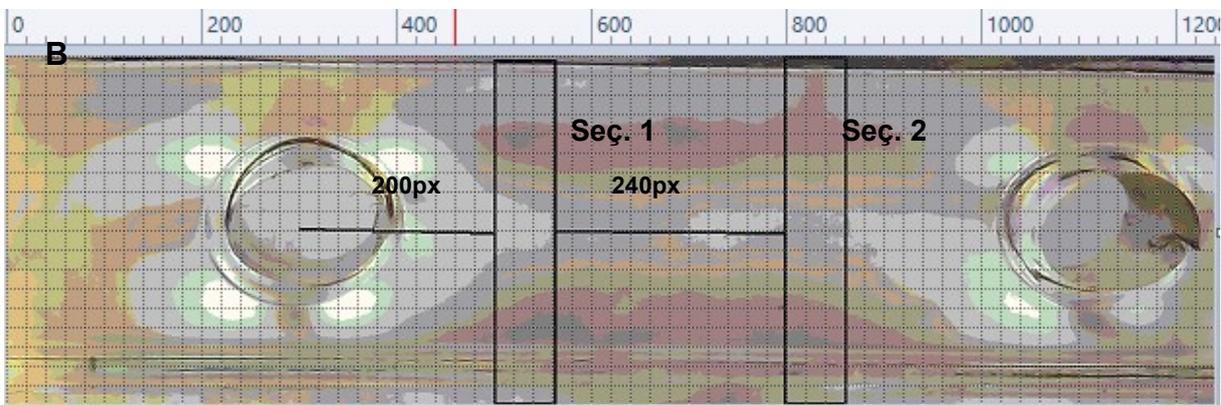
Para melhor compreensão da Tabela 5, é sugerido à leitura dos dados expostos em tabelas que seguem no Anexo E1 e E2.

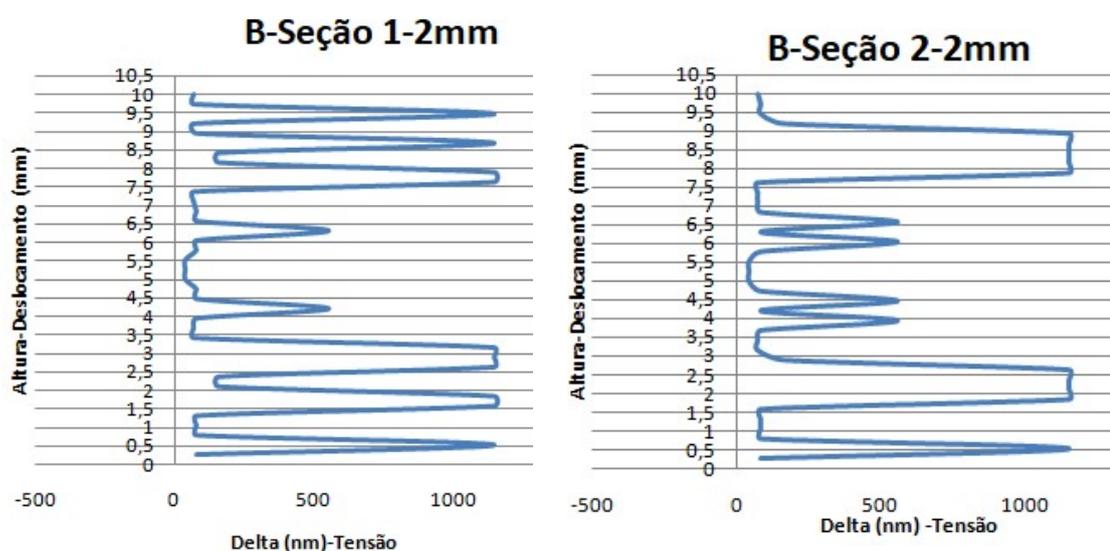
Figura 18: Análise do deslocamento de 2 mm para os modelos A e B

a) Corpo de prova A – cortes em seções transversais



b) Corpo de prova B – cortes em seções transversais





Fonte: A autora (2022)

Nota-se na Figura 18(a) que ocorrem concentrações nas proximidades das irregularidades (furos) no modelo A, motivo pelo qual as tensões mais distantes dessas, tendem a conservar o mesmo valor que teriam na seção da peça sem a irregularidade. Então, para que a resultante das tensões se mantenha igual à aplicada, é necessário que nas proximidades de um furo, como nas peças A e B, as tensões aumentem mais para compensar o menor aumento nas áreas afastadas (FERREIRA & BERMUDEZ, 2004)

## 5.2 Ensaio de flexão com deslocamento de 4mm

A figura 19 mostra o ensaio de flexão com deslocamento de 4mm, ou seja, dois giros de 360° no fuso.

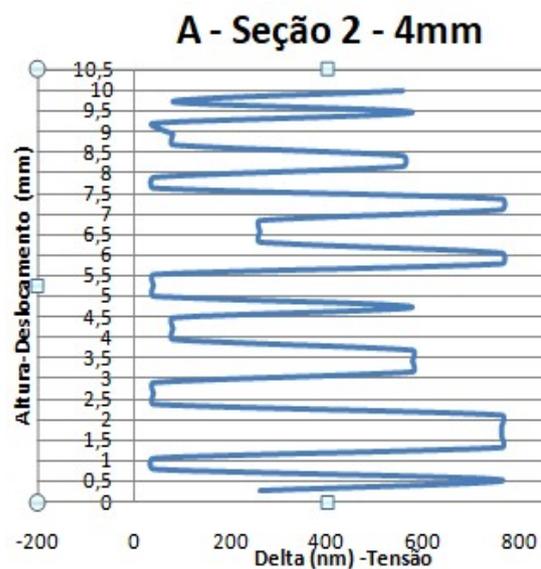
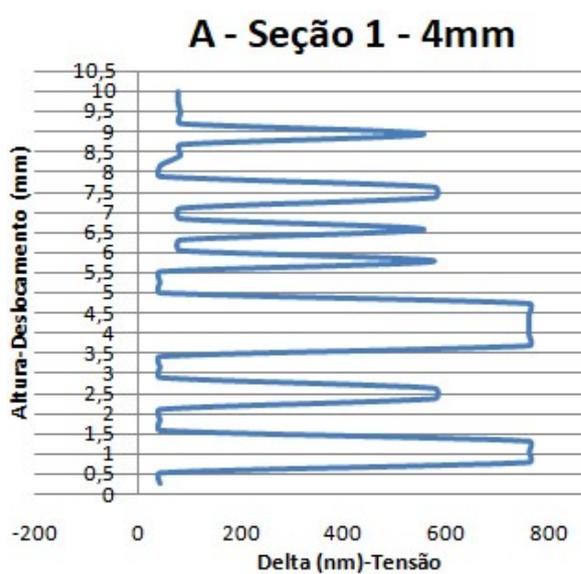
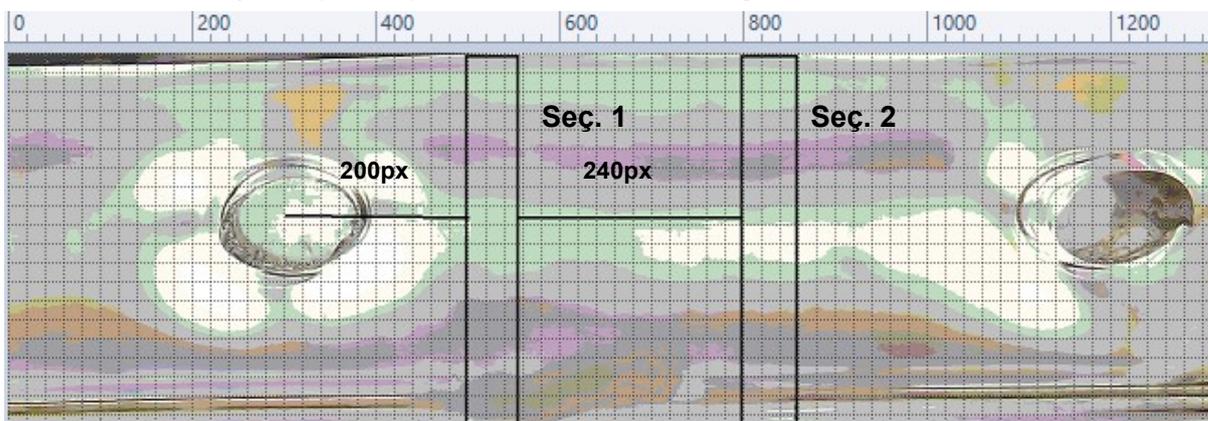
Tabela 06: Valores máximos e médios de  $\delta$  nas seções em A e B – deslocamento de 4mm

Seção/Modelo	$\delta_{m\acute{a}x}$ (nm)	$\delta_{m\acute{e}d}$ (nm)
Seção 1/Modelo A	760	299,3
Seção 1/Modelo B	760	319,5
Seção 2/Modelo A	760	351,1
Seção 2/Modelo B	1150	367,8

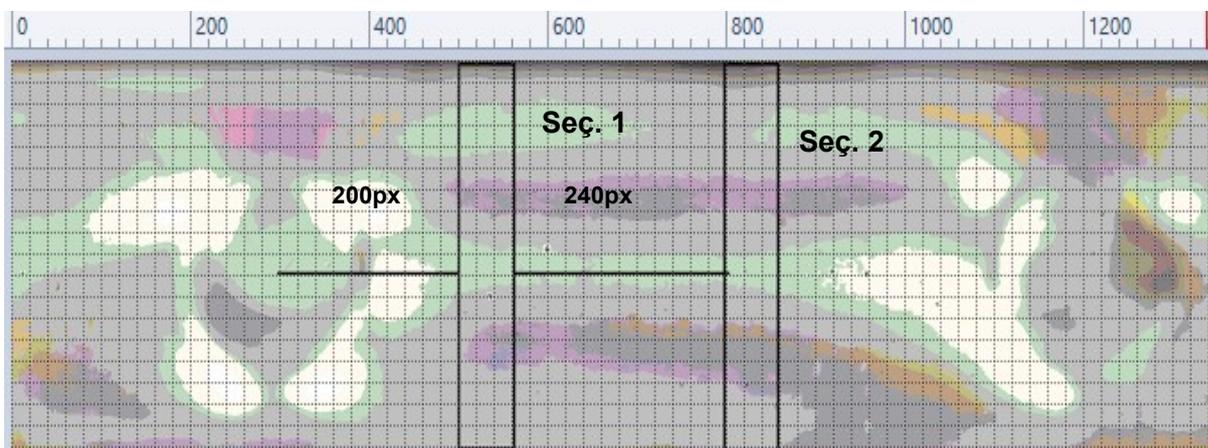
Fonte: A autora (2022)

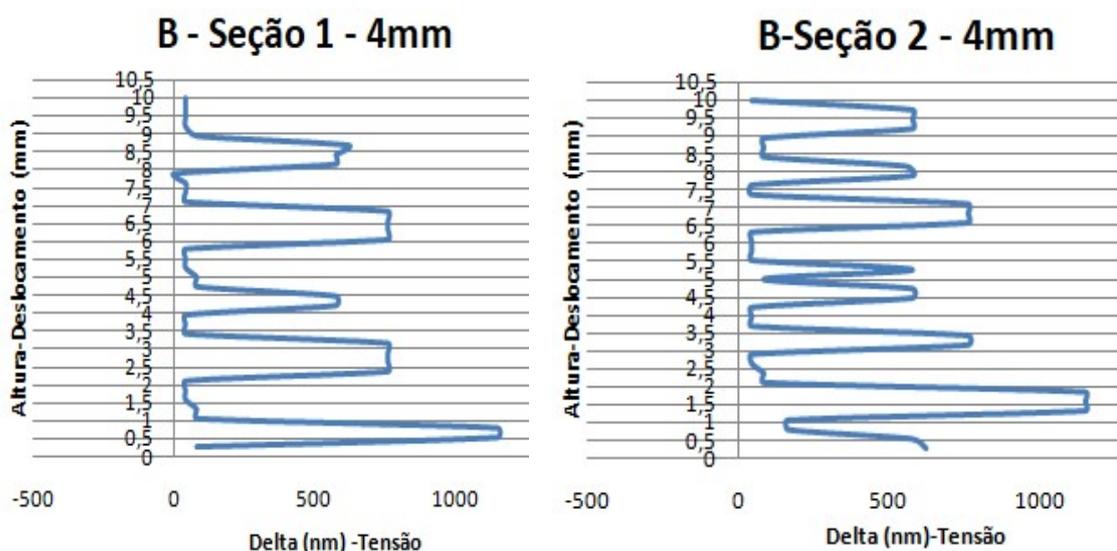
Figura 19: Análise do deslocamento de 4 mm para os modelos A e B

b) Corpo de prova A – cortes em seções transversais



b) Corpo de prova B – cortes em seções transversais





Fonte: A autora (2022)

Ao submeter os corpos de prova a deformações por flexão com deslocamento de 4mm na vertical, neles apareceram regiões de compressão e de tração, como esperado. Além disso, também há uma linha neutra (em cinza escuro) que divide as regiões de tração das regiões de compressão, onde as tensões atuantes tendem a zero.

### 5.3 Ensaio de flexão com deslocamento de 6mm

Em todos os ensaios foram observados diversos segmentos em cinza, visível de forma mais expressiva na Figura 20, para o deslocamento de 6mm, isso tem relação com o espectro de cores para fotoelasticidade. A região mais escura representa um nível menor de tensões, onde a cor preta representa o  $N=0$ .

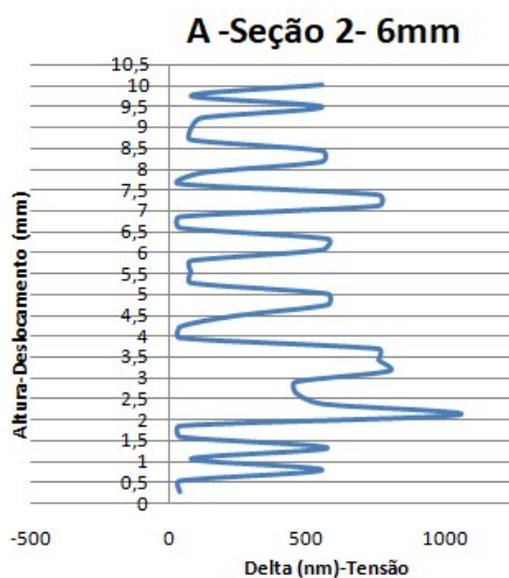
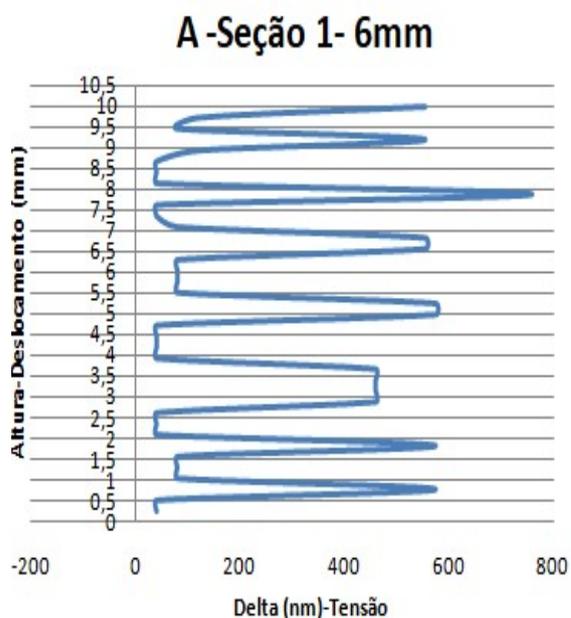
Tabela 07: Valores máximos e médios de  $\delta$  nas seções em A e B – deslocamento de 6mm

Seção/Modelo	$\delta_{m\acute{a}x}$ (nm)	$\delta_{m\acute{e}d}$ (nm)
Seção 1/Modelo A	760	227,5
Seção 1/Modelo B	1150	316,3
Seção 2/Modelo A	1050	352,5
Seção 2/Modelo B	1350	416,1

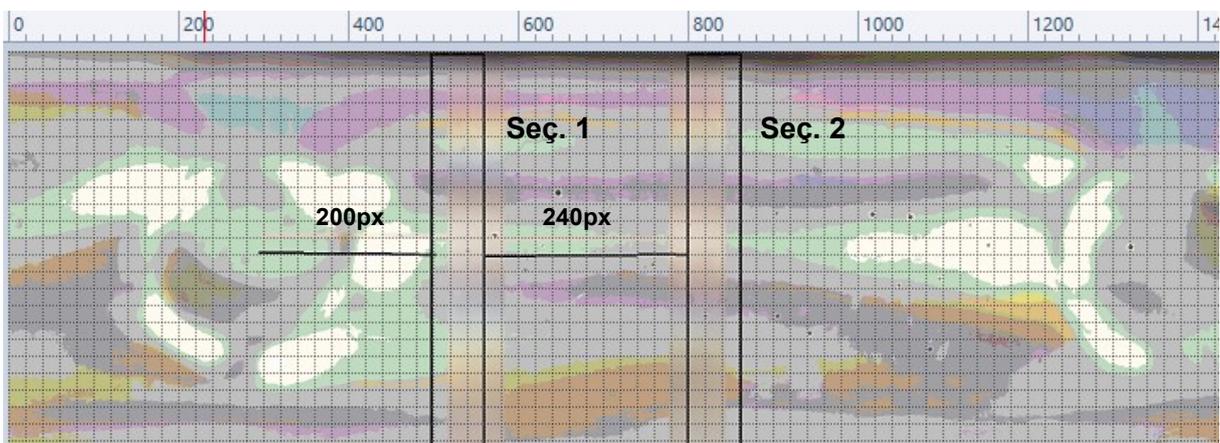
Fonte: A autora (2022)

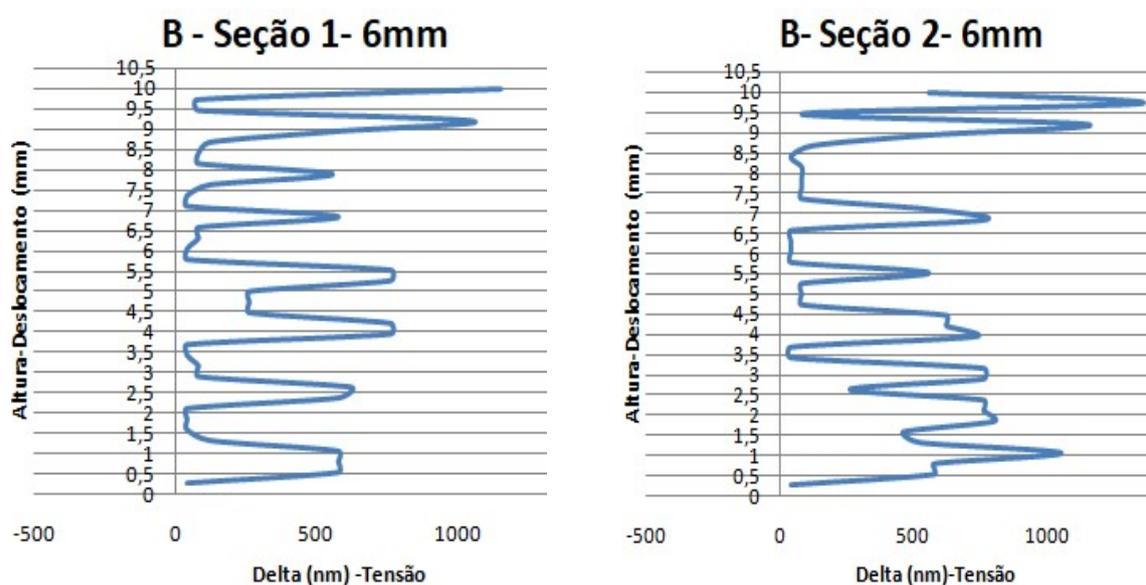
Figura 20: Análise do deslocamento de 6 mm para os modelos A e B

a) Corpo de prova A – cortes em seções transversais



b) Corpo de prova B – cortes em seções





Fonte: A autora (2022)

No carregamento equivalente ao deslocamento de 6mm as regiões de cor mais predominante em relação às outras, de intensidade menor, ficam perceptíveis pela diminuição da paleta de cores do espectro de luz visível aos olhos humano. As regiões em cinza ficam ainda mais evidentes em relação aos outros deslocamentos, reforçando a afirmação de que estas faixas representam a linha neutra.

Através da imagem percebe-se uma região de cor mais escura, posicionada entre as regiões onde ocorre tração (parte inferior do corpo de prova) e de compressão (parte superior do corpo de prova). Conforme os esforços são aumentados com os deslocamentos de 2 em 2mm, a intensidade da cor da linha escura aumenta e sua região diminui, em paralelo diferentes cores passam a ser percebidas na superfícies dos modelos. Em um ponto Isotrópico, a franja é zero e tem-se  $\sigma_1 = \sigma_2$ . A linha neutra representa um ponto isotrópico e pode ser visualizada na região central dos corpos, onde sua cor é cinza MARTINS (2005).

#### 5.4 Ensaio de flexão com deslocamento de 8mm

A Figura 21 mostra o ensaio de flexão com deslocamento de 8mm, ou seja, quatro giros de 360° no fuso.

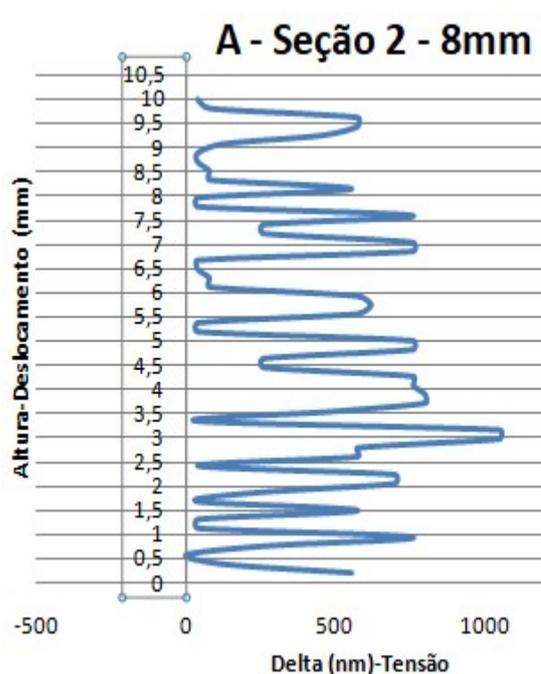
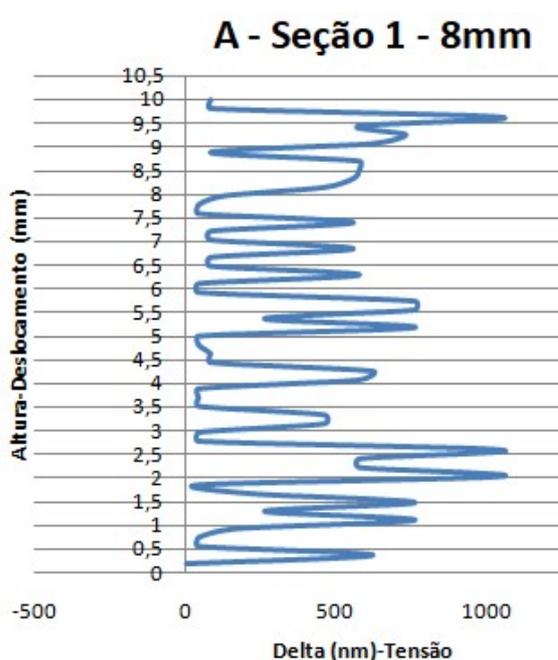
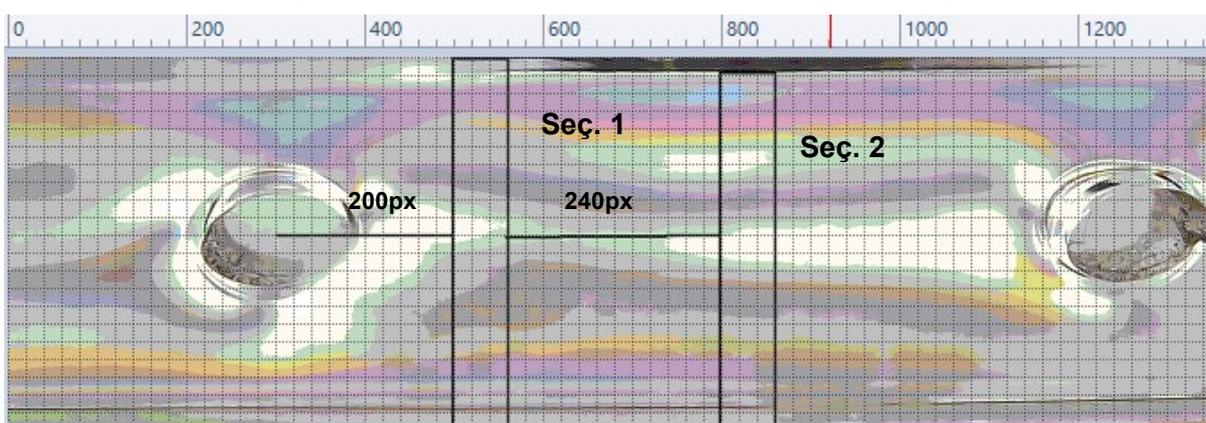
Tabela 08: Valores máximos e médios de  $\delta$  nas seções em A e B - deslocamento de 8mm.

Seção/Modelo	$\delta_{m\acute{a}x}$ (nm)	$\delta_{m\acute{e}d}$ (nm)
Seção 1/Modelo A	1050	350,0
Seção 1/Modelo B	1150	432,6
Seção 2/Modelo A	1050	381,4
Seção 2/Modelo B	1225	452,7

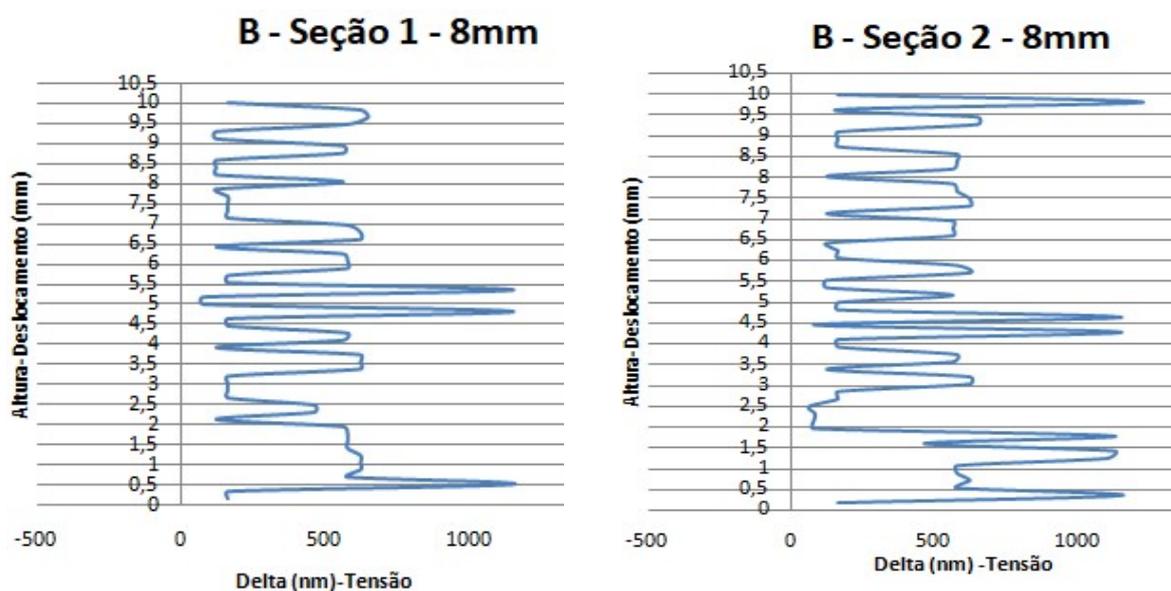
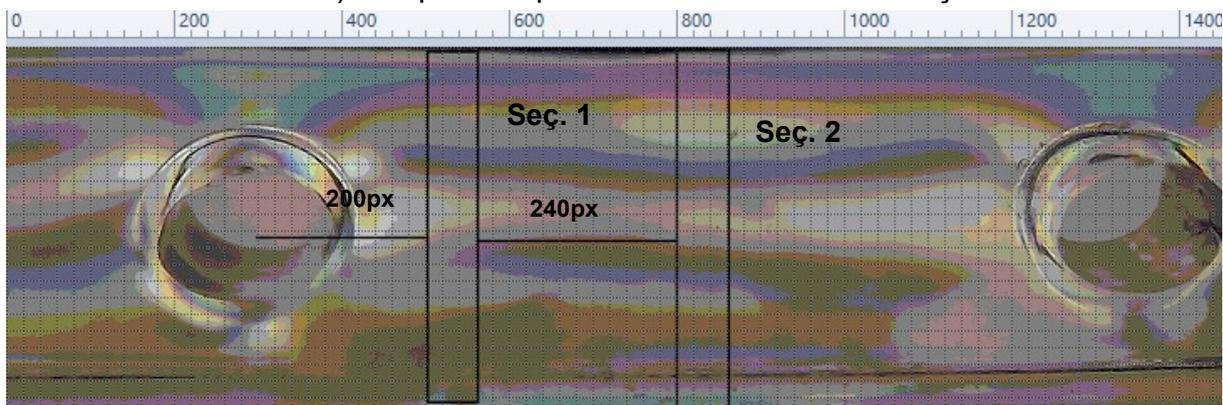
Fonte: A autora (2022)

Figura 21: Análise do deslocamento de 8 mm para os modelos A e B

b) Corpo de prova A – cortes em seções



## b) Corpo de prova B – cortes em seções



Fonte: A autora (2022)

De forma breve, o que aconteceu em todos os testes foi: a luz branca incidida sobre a primeira lente polarizadora é refletida pelo modelo de polimetilmetacrilato (acrílico) com direções segundo as tensões aplicadas e suas deformações. Depois de refletida, o feixe que atravessou o segundo filtro, o visualizador, foi visualizado exibindo as direções e as diferenças das tensões principais por meio de franjas isocromáticas (SOUZA, 2011).

## 5.5 Distribuição de tensões

Foram usadas as imagens dos ensaios com deslocamentos de 8mm para determinar a distribuição das tensões presentes nos modelos. Para tal, foram analisados os valores médios e máximos de  $\delta$  retirados dos Anexos B1 e B2.

Para quantificar a força aplicada em cada volta completa (a cada 2mm de deslocamento na vertical – eixo Y) foi utilizada uma balança para os testes, deslocando o fuso em 2, 4, 6 e 8 mm, utilizando os corpos de prova A e B, assim obteve-se os valores em Kg. Foram calculados os respectivos pesos utilizando a segunda lei de Newton ( $P = m \cdot g$ ). Os valores para cada deslocamento seguem na Tabela 09.

Tabela 09: Valores dos deslocamentos a cada 2mm em quilograma.

Deslocamento (mm)	Corpo A (Kg)	Corpo B (Kg)
2	1,19	0,977
4	1,885	1,826
6	2,769	2,718
8	3,555	3,424

Fonte: A autora (2022)

Analisando os gráficos a baixo é possível perceber que as curvas são aproximadamente lineares.

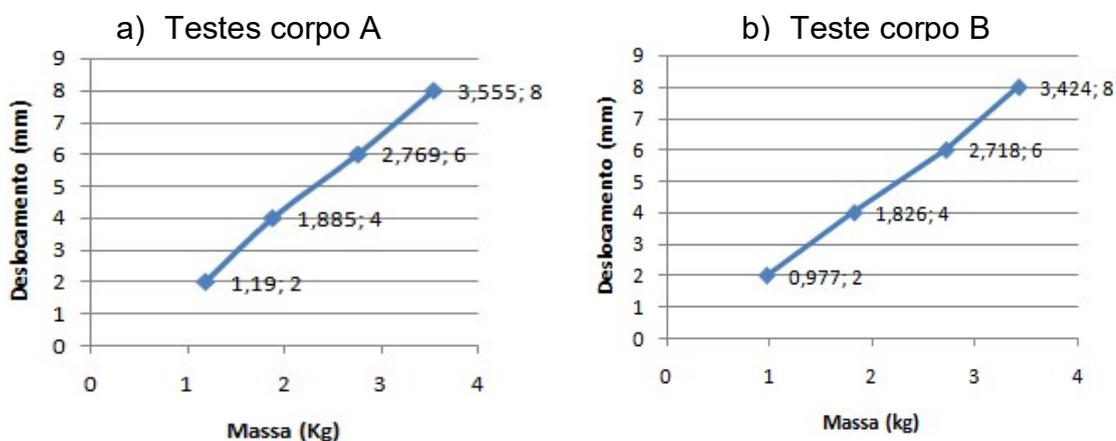


Gráfico 1: Deslocamento vertical (eixo-Y) x massa

Fonte: A autora (2022)

Tabela 10: Valores dos deslocamentos a cada 2mm em N.

Deslocamento (mm)	Corpo A (N)	Corpo B (N)
2	11,6739	9,58437
4	18,49185	17,91306
6	27,16389	26,66358
8	34,87455	33,58944

Fonte: A autora (2022)

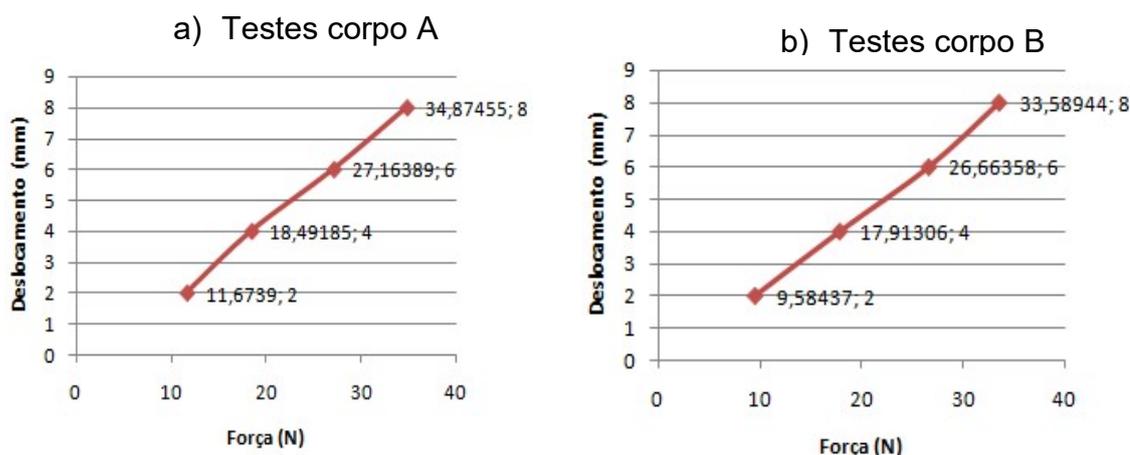


Gráfico 2: Deslocamento vertical (eixo-Y) x Força Peso

Fonte: A autora (2022)

Para o deslocamento de 8mm o carregamento máximo do corpo de prova A foi de aproximadamente 34,87 N e o carregamento máximo para o corpo de prova B foi de aproximadamente 33,59 N.

Da Tabela 8, infere-se que a seção 1 do corpo de prova A apresentou  $\delta_{méd}$  de 19,1 % menor que a Seção 1 do corpo do corpo de prova B, e a Seção 2 de A, apresentou um valor de  $\delta_{méd}$  de 15,75% maior que a Seção 2 do modelo B. As distribuições de tensões se apresentaram relativamente equilibradas, e as faixas de cores que foram mais evidenciadas foram: verde-azul ( $\delta = 1,32$ ), cinza-25 ( $\delta = 40$ ), o roxo++ ( $\delta = 1150$ ) e roxo ( $\delta = 575$ ), o laranja ( $\delta = 460$ ), o marrom ( $\delta = 555$ ), o azul escuro ( $\delta = 620$ ) e o vermelho-rosa ( $\delta = 1050$ ).

Fundamentado na relação de proporcionalidade entre a diferença de fase linear e as tensões, exposto na Figura 03 e na Tabela 2, é possível afirmar que a tensão média em B é maior que a tensão média em A. Como os furos das elipses em A possuem o raio em seu eixo maior, menor que o eixo maior do corpo de prova B, o modelo A apresenta menor fator de concentração que B.

Nas seções onde identificou-se a cor preta, cinza-50% ou cinza-25%, ou seja, onde a intensidade da luz observada é igual a zero, indica que o ângulo  $\alpha$  entre o eixo de polarização é paralelo às direções das tensões principais.

As cores transmitidas pela lente analisadora são componentes das ondas paralelas ao eixo de transmissão (que é ortogonal ao eixo de polarização). A intensidade da luz é função do  $\delta$  e do ângulo formado pelo eixo da lente analisadora

e as direções das tensões principais, ou seja, com o polariscópio plano também é possível perceber as direções das tensões principais ao longo do modelo.

## 5.6 Revisão do polariscópio

A revisão do equipamento construído em chapa metálica mostrou-se eficaz para a realização dos ensaios propostos. As imagens obtidas foram de boa qualidade e fundamentais para a realização das análises do trabalho.

Na Figura 22 mostra-se o polariscópio construído em chapa metálica. Tanto a base como a caixa de teste, a base de apoio para o corpo de prova, a chapa guia para o fuso, todas as peças são metálicas e poderão ser reutilizadas em trabalhos futuros. No Apêndice encontram-se mais imagens do polariscópio.

Figura 22: Polariscópio linear feito em chapa metálica



Fonte: A autora (2022)

## 6 Conclusão

Na literatura existente, observou-se que existem muitos estudos sobre a fotoelasticidade (desde 1816, com David Brewster até os dias atuais) e sobre a engenharia por traz do equipamento polariscópio. Por se tratar de um equipamento de difícil acesso por existirem poucos fabricantes, e por necessitar de poucos itens (de fácil aquisição – ver Apêndice 9.3) para sua fabricação, os pesquisadores das universidades acabam fabricando seus próprios polariscópios.

A construção e montagem do polariscópio foram promissoras, assim como a modelagem e fabricação dos corpos de prova com furos elípticos mapeamentos das elipses de uma estrutura óssea real (A:  $a_1 = 2,74$  mm e  $a_2 = 1,91$  mm; B:  $b_1 = 3,33$ mm e  $b_2 = 2,71$  mm). Através do polariscópio construído foi possível a obtenção as franjas de espectros luminosos em cada ensaio de deformação dos corpos. Vale salientar que os modelos fotoelásticos após os ensaios não sofreram deformação plástica observável, atuando na fase elástica.

A metodologia apresentada se mostrou efetiva para determinação dos perfis de distribuição de tensões e deformação em corpos de prova. Dos ensaios de flexão, feitos em duas seções de cada corpo de prova, após análise das imagens, notou-se que o corpo de prova com furos elípticos com valores  $2,74 \times 1,91$  de (modelo A) apresentou regiões de menores concentrações quando comparado ao modelo de medidas  $3,33 \times 2,71$  (modelo B).

O custo de fabricação do equipamento foi relativamente baixo (soma total de R\$ 863,00) e é estimado no Apêndice 9.3. As lentes e o tubo de PVC foram reutilizados do modelo anterior construído em madeira para a realização de outra análise de Melo (2019). Caso fosse usar análise numérica para fazer as análises dos modelos precisaria de mais tempo para preparação dos modelos e de grande aporte computacional. A análise feita neste trabalho (com uso do método fotoelástico) tem detalhes que não poderiam ser identificados pelos métodos computacionais, como as concentrações de tensão de fabricação, dada a geometria das peças.

Através dos dados, entende-se também que modelos baseados em perfis bioinspirados na estrutura de ossos trabeculares se mostraram com distribuições de tensões relativamente equilibradas, com faixas de cores relativas às tensões que se estendem horizontalmente da borda de uma elipse a outra. A partir da utilização dos conceitos expostos neste trabalho, outros trabalhos de pesquisas poderão ser feitos

com o uso dessa técnica, como por exemplo: comparar os corpos com furos elípticos aos modelos convencionais de furos circulares; e o equacionamento dos campos de tensão, que não foram feitos devido ao pouco tempo disponível.

Conclui-se então, que o projeto de transição do modelo de polariscópio de madeira para o polariscópio em chapa de aço foi satisfatório, possibilitando as análises de tensão-deformação nos corpos de provas.

## **7 Sugestões para trabalhos futuros**

Buscando otimizar o equipamento (polariscópio plano de transmissão), sugere-se as seguintes ações futuras:

- Estudar registro fotoelástico com outros comprimentos de onda.
- Ensaiai outras formas biomiméticas;
- Automatizar a aquisição de dados;
- Automatizar a aplicação de força;
- Adicionar um adaptador de incidência oblíqua para separação de tensões;
- Fazer leitura de imagens a partir de softwares específicos;
- Modelagem matemática dos campos de tensão do corpo de prova;
- Proceder com modelagem computacional dos mesmos corpos de prova para levantamento de parâmetros de projeto;
- Fazer software para leitura dos arquivos de imagem de forma a calcular a variação das tensões no componente;
- A partir da leitura de imagens fazer software para Análise de tensões.

## 8 Referências Bibliográficas

ANDRADE, Cristiano Antônio; SMITH NETO, Perrin; RIBEIRO, José Luiz Silva. **Projeto e construção de um polariscópio modelo para disseminação da técnica fotoelástica em engenharia e em cursos biomédicos**. International Conference on Engineering and Computer Education. São Paulo, 2003.

AGÊNCIA BRASIL. Brasília. Empresa Brasil de comunicação, 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-04/mais-de-70-das-industrias-tem-dificuldades-em-conseguir-materia-prima>. Acesso em: 11 de julho de 2022.

ARAÚJO, C.A. **Fotoelasticidade de Transmissão Plana**. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner Alberto Gomide, Uberlândia, 2006. 87p. Apostila.

ARAÚJO, Claudmar Amaral *et al.* **Determinação Automatizada de Parâmetros Fotoelásticos**. In: POSMEC – Simpósio do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. 15º, 2005. Uberlândia, Minas Gerais.

ASSIS, Altair de *et al.* Uma História de Inovação Tecnológica no Espectro da Luz. Publicação Research Gate, 2013.

BANDA, Hugo et al. Escuela politécnica nacional facultad de ingeniería eléctrica y electrónica quito, Septiembre 2010.

BENYUS, Janine. **Introdução – Biomimicry Toolbox**. Biomimicry Institute, 1997. Disponível em: <https://biomimicry.org/>. Acesso em: 04 de novembro de 2021.

**Bold – Propriedades mecânicas da chapa de acrílico fundido** – Disponível em: Acesso: 13 de abril de 2021.

Canon – **Principais características Canon PowerShot SX520**. Disponível em: <https://www.canon.com.br/produtos/produtos-para-voce/cameras/linha-powershot/serie-sx/powershot-sx520-hs>. Acesso: 10 de março de 2022.

CARMO, Leonardo Henrique. **Fotoelasticidade, método experimental de análise de tensões em pesquisas biomecânicas**. 2008. Monografia para graduação em Física. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.

MELO, Lucas da Rocha. **Análise de tensão de parede cilíndrica submetida à pressão interna através de fotoelasticidade**. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharel em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB. Cruz das Almas –BA, 2019.

FATEC SP – **Materiais para Construção Civil III** – Apostila FERREIRA A. L. S & BERMUDEZ R. L. Projeto de Graduação. Análise fotoelástica: construção e utilização de um polariscópio plano de transmissão. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória – ES, 2004.

FERREIRA A. L. S & BERMUDEZ R. L. **Análise fotoelástica: construção e utilização de um polariscópio plano de transmissão**. Projeto de Graduação- Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória – ES, 2004

MARTINS, Geraldo de P. **Fotoelasticidade – Primeiros passos**. Publicação CTD944/2005. Belo Horizonte, 2005.

MEDINA, Jorge Arturo Hinostroza. **Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica**. 2014. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MIRIM, Denilson de Carvalho *et al.* **Estudo da tensão residual na soldagem laser entre o aço carbono AISI 1010 e o aço inoxidável AISI 304**. ABCM; 6º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, Caxias do Sul – RS, 2011.

HORGAN, C. O. **Recent developments concerning Saint Venant's principle: an update**, Appl. Mech. Rev., v.42, p.295-303, 1989.

PICARD, Frederic. **Biomimetismo, quando a indústria aprende com a natureza**. Revista Planeta, ed. 459, dezembro de 2010. Disponível em: <https://www.revistaplaneta.com.br/biomimetismo-quando-a-industria-aprende-com-a-natureza/>. Acesso em: 11 de julho de 2022.

QUEIROZ, Natália; AGUIAR, Rafael Rattes Lima Rocha de; ARAÚJO, Rodrigo Barbosa de. **Biônica e Biomimética no Contexto da Complexidade e Sustentabilidade em Projeto**. p. 127 -144. In: Design & Complexidade. São Paulo: Blucher, 2017.  
ISBN: 9788580392159, DOI 10.5151/9788580392159-07

QUINAN, Marco Antônio Dutra. **Uma metodologia para determinação do fator de intensidade de tensões causado por tensões térmicas utilizando a Fotoelasticidade**. Tese de Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – IPEN – São Paulo, 2005.

SILVA, Alessandro Marcio Hakme da. **Análise morfométrica 2D e 3D de amostras de osso trabecular utilizando microtomografia tridimensional por raio-X**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Medicina e Instituto de Química – São Carlos, São paulo, 2009.

SILVA, Sidney Leal *et al.* **Análise quantitativa de tensões em amostras fotoelásticas por meio de fotoelasticidade**. Revista Brasileira de Física Tecnologia Aplicada, Ponta Grossa, v. 4, n. 1, p. 34-51, mai./jun. 2017.

SILVA, Joaquim Paulino *et al.* **Projeto e construção de um polariscópio portátil utilizado na técnica da fotoelasticidade de transmissão plana**. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, agosto de 2008.

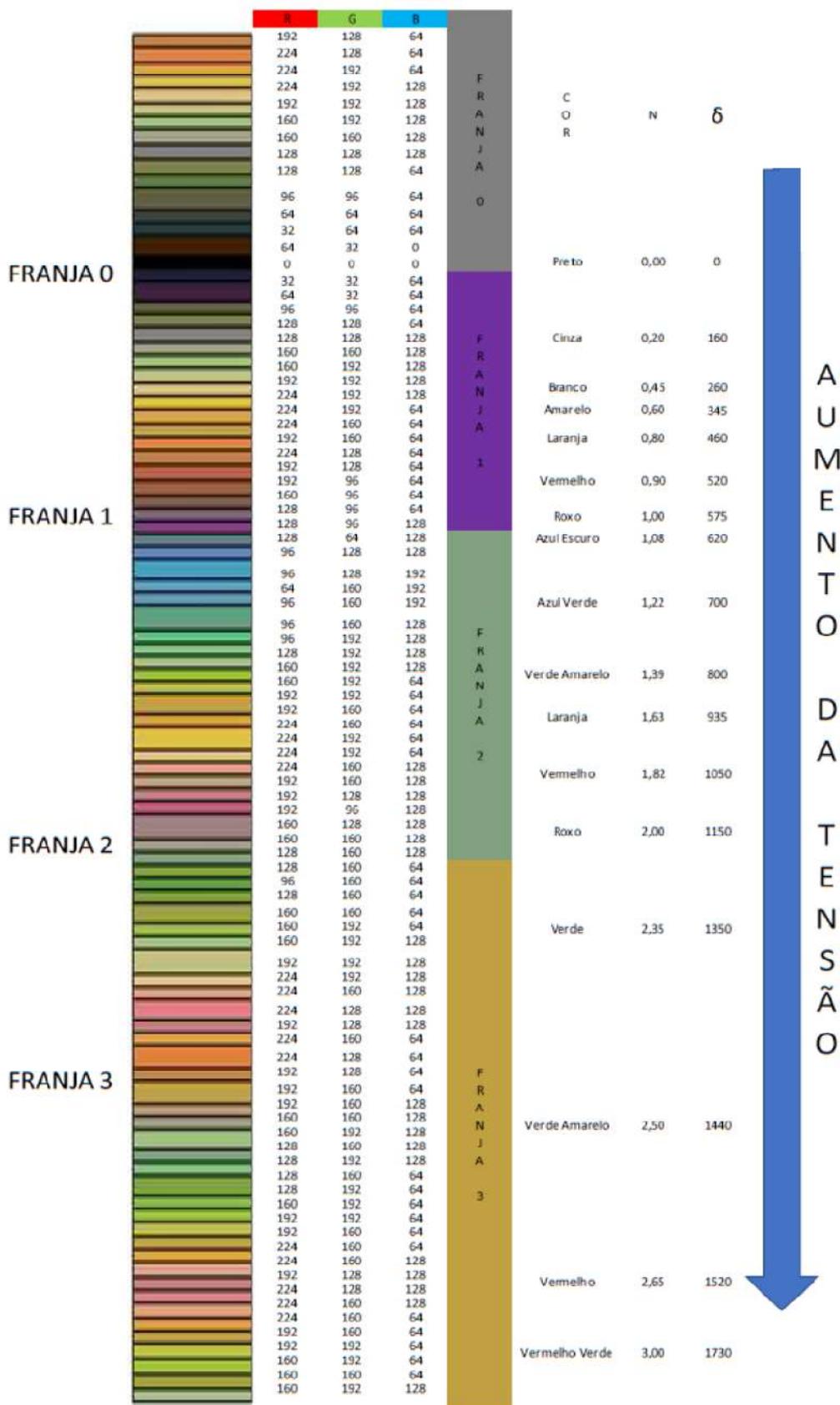
SCHIAVON, José Antônio. **Aplicação da técnica da fotoelasticidade na análise de fundações por estacas helicoidais**. Universidade de São Paulo – USP, 2010.

SOUZA, Joelmir Mariano de. **Estudo do Ensaio de Determinação da Tenacidade à Fratura em Deformação Plana (*K<sub>IC</sub>*) em PMMA e Análise das Tensões Desenvolvidas por Fotoelasticidade**. Tese de Doutorado em Engenharia – USP - São Paulo – 2011

SPINELLI, H. A. **Aplicação da Fotoelasticidade na Análise Estrutural de uma Junta Rebitada de Uso Aeronáutico**. 2004, FEG, UNESP.

ZHANG, Y *et al.* **Branch Cutting Algorithm for Unwrapping Photoelastic Phase Map with Isotropic Point**. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 50, p. 619-631, 2012.

## ANEXOS ANEXO A



AUMENTO DA TENSÃO

## Anexo B

A-Seção 1 – 8mm



A - Seção 2 – 8mm



B-Seção 1 – 8mm



B - Seção 2 – 8mm



## Anexo B1

Análise da seção 1 do corpo de prova A					
R	G	B	DELTA	N	COR
32	32	64	0	0	preto
96	96	128	620	1,08	azul escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
128	128	128	160	0,2	cinza
192	220	192	760	1,32	verde-azul
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	220	0,35	verde azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	128	120	0,15	verde-sum
224	192	128	460	0,8	laranja
192	160	128	555	0,95	Marrom
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	192	192	730	1,27	Azul++
192	128	192	575	1	roxo
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc

350

Análise da seção 2 do corpo de prova A					
R	G	B	DELTA	N	COR
128	96	64	555	0,95	marrom-
96	96	64	120	0,15	marrom--
64	64	64	0	0	preto
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
160	192	192	240	0,4	azul
166	202	240	700	1,22	azul-verde
166	202	240	700	1,22	azul-verde
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	192	128	460	0,8	laranja
224	224	128	800	1,39	verde-amar
224	224	128	800	1,39	verde-amar
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
255	251	240	260	0,45	branco
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
160	160	192	620	1,08	azul escur
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
255	251	240	260	0,45	branco
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	192	128	460	0,8	laranja
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	192	128	460	0,8	laranja
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%

381,4

## ANEXO B2

Análise da seção 1 do corpo de prova B					
R	G	B	DELTA	N	COR
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
160	128	128	1150	2	roxo++
128	96	128	575	1	roxo
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	128	620	1,08	azul escuro
128	96	128	575	1	roxo
128	96	128	575	1	roxo
128	96	128	575	1	roxo
128	96	64	561	0,98	marrom
128	128	64	120	0,15	verde-sum
160	128	64	460	0,8	marrom--
160	128	128	460	0,8	marrom--
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	64	120	0,15	marrom--
128	96	64	561	0,98	marrom
128	96	128	575	1	roxo
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
160	128	128	1150	2	roxo++
160	160	128	75	0,09	marrom+
160	160	128	75	0,09	marrom+
160	128	128	1150	2	roxo++
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	96	128	575	1	roxo
128	96	128	575	1	roxo
128	96	64	561	0,98	marrom
96	96	64	120	0,15	marrom--
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	128	620	1,08	azul escuro
128	96	128	575	1	roxo
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	64	120	0,15	verde-sum
128	96	64	561	0,98	marrom
96	96	64	120	0,15	marrom--
96	96	64	120	0,15	marrom--
96	96	64	120	0,15	marrom--
128	96	64	561	0,98	marrom
128	96	64	561	0,98	marrom
96	96	64	120	0,15	marrom--
96	96	64	120	0,15	marrom--
128	96	128	575	1	roxo
128	96	128	575	1	roxo
96	128	128	647	1,13	azul esc+
96	128	128	647	1,13	azul esc+
96	96	128	620	1,08	azul escuro
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza

406,57

Análise da seção 2 do corpo de prova B					
R	G	B	DELTA	N	COR
128	128	128	160	0,2	cinza
160	128	128	1150	2	roxo++
128	96	128	575	1	roxo
96	96	128	620	1,08	azul escuro
128	96	128	575	1	roxo
128	96	128	575	1	roxo
160	96	128	1100	1,91	roxo+-
160	128	128	1125	1,95	roxo+
160	128	64	460	0,8	marrom--
160	128	128	1125	1,95	roxo+
160	160	128	75	0,09	marrom+
160	160	128	75	0,09	marrom+
160	160	164	80	0,1	cinza esc
128	160	128	60	0,075	verde-
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	64	120	0,15	marrom--
128	96	64	561	0,98	marrom
128	96	128	575	1	roxo
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
160	128	128	1150	2	roxo++
160	160	128	75	0,09	marrom+
160	128	128	1150	2	roxo++
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	96	64	561	0,98	marrom
96	96	64	120	0,15	marrom--
96	96	64	120	0,15	marrom--
96	96	128	620	1,08	azul escuro
128	96	128	575	1	roxo
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	64	120	0,15	verde-sum
128	96	64	561	0,98	marrom
128	96	64	561	0,98	marrom
128	96	64	561	0,98	marrom
96	96	64	120	0,15	marrom--
96	96	128	620	1,08	azul escuro
96	96	128	620	1,08	azul escuro
128	96	128	575	1	roxo
128	96	64	561	0,98	marrom
96	96	64	120	0,15	marrom--
128	96	64	561	0,98	marrom
128	96	128	575	1	roxo
128	96	128	575	1	roxo
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
96	128	128	647	1,13	azul esc+
96	128	128	647	1,13	azul esc+
128	128	128	160	0,2	cinza
96	128	64	1225	2,13	verde ----
128	128	128	160	0,2	cinza

452,7

**ANEXO C**

C - Seção 1 – 8mm



C - Seção 2 – 8mm



## ANEXO C1

Análise da seção 1 do corpo de prova C					
R	G	B	DELTA	N	COR
192	220	192	760	1,32	verde-azul
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	128	128	1150	2	roxo++
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
255	251	240	260	0,45	branco
255	251	240	260	0,45	branco
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
224	224	128	800	1,39	verde-amare
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	192	192	240	0,4	azul
160	192	192	240	0,4	azul
160	192	192	240	0,4	azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	192	128	120	0,15	verde-sum
224	192	128	460	0,8	laranja
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
255	251	240	260	0,45	branco

358,75

Análise da seção 2 do corpo de prova					
R	G	B	DELTA	N	COR
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
160	192	192	240	0,4	azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	192	620	1,08	azul escuro
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	160	128	555	0,95	marrom
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	192	192	240	0,4	azul
160	192	192	240	0,4	azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	128	120	0,15	verde-sum
224	192	128	460	0,8	laranja
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%

293,39

**Anexo D**

A- Seção 1 – 2mm



A - Seção 2 – 2mm



B- Seção 1 – 2mm



B - Seção 2 – 2mm



## Anexo D1

Análise da seção 1 do corpo de prova A						Análise da seção 2 do corpo de prova A					
R	G	B	DELTA	N	COR	R	G	B	DELTA	N	COR
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo	192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo	255	251	240	260	0,45	branco
192	160	192	575	1	roxo	192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo	192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza escuro	192	220	192	760	1,32	verde-azul
160	160	164	80	0,1	cinza escuro	160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro	160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	192	575	1	roxo	160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	220	192	760	1,32	verde-azul	160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	220	192	760	1,32	verde-azul	160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	220	192	760	1,32	verde-azul	160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	220	192	760	1,32	verde-azul	160	128	128	1150	2	roxo ++
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	160	128	128	1150	2	roxo ++
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	160	160	128	70	0,09	cinza-marr
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	160	160	128	70	0,09	cinza-marr
192	192	128	120	0,15	verde-sum	192	160	128	555	0,95	marrom
192	192	128	120	0,15	verde-sum	192	160	128	555	0,95	marrom
192	160	128	555	0,95	marrom	192	160	128	555	0,95	marrom
192	160	128	555	0,95	marrom	192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza escuro	192	192	128	120	0,15	verde-sum
160	160	164	80	0,1	cinza escuro	192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul	192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	192	128	460	0,8	laranja	192	192	128	120	0,15	verde-sum
224	192	128	460	0,8	laranja	192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	160	128	555	0,95	marrom
192	192	192	40	0,05	cinza-25%	192	160	128	555	0,95	marrom
192	192	128	120	0,15	verde-sum	224	192	128	460	0,8	laranja
192	192	128	120	0,15	verde-sum	192	160	128	555	0,95	marrom
255	251	240	260	0,45	branco	160	160	164	80	0,1	cinza escuro
64	32	0	0	0	marrom escu	192	192	128	120	0,15	verde-sum

272,8

306,45

## Anexo D2

Análise da seção 1 do corpo de prova B					
R	G	B	DELTA	N	COR
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	160	128	70	0,09	cinza-marr
160	160	128	70	0,09	cinza-marr
160	160	128	70	0,09	cinza-marr
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	128	70	0,09	marrom esc
160	160	128	70	0,09	marrom esc
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	128	70	0,09	marrom esc
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	160	128	70	0,09	marrom esc
160	160	128	70	0,09	marrom esc

390

Análise da seção 2 do corpo de prova B					
R	G	B	DELTA	N	COR
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
128	128	128	160	0,2	cinza
160	160	128	70	0,09	cinza-marr
160	160	128	70	0,09	cinza-marr
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25
192	192	192	40	0,05	cinza-25
192	192	192	40	0,05	cinza-25
192	192	192	40	0,05	cinza-25
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	128	70	0,09	cinza-marr
160	160	128	70	0,09	cinza-marr
160	160	128	70	0,09	cinza-marr
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
160	128	128	1150	2	roxo ++
128	128	128	160	0,2	cinza
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	128	70	0,09	cinza-marr

411,05

**Anexo E**

C- Seção 1 – 4mm



A - Seção 2 – 4mm



D- Seção 1 – 4mm



B - Seção 4 – 4mm



## Anexo E1

Análise da seção 1 do corpo de prova A					
R	G	B	DELTA	N	COR
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	128	75	0,09	marrom+
160	160	128	75	0,09	marrom+

299,3

Análise da seção 2 do corpo de prova A					
R	G	B	DELTA	N	COR
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
255	251	240	260	0,45	branco
255	251	240	260	0,45	branco
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	128	555	0,95	marrom
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	128	555	0,95	marrom

351,05

## Anexo E2

Análise da seção 1 do corpo de prova B					
R	G	B	DELTA	N	COR
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	128	128	1150	2	roxo++
160	160	128	1150	2	roxo++
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
96	96	64	0	0	marrom --
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%

319,49

Análise da seção 2 do corpo de prova B					
R	G	B	DELTA	N	COR
96	96	128	620	1,08	azul escuro
128	96	128	575	1	roxo
128	128	128	160	0,2	cinza
128	128	128	160	0,2	cinza
160	128	128	1150	2	roxo++
160	160	128	1150	2	roxo++
160	160	128	1150	2	roxo++
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%

367,821



## ANEXO F1

Análise da seção 1 do corpo de prova A					
R	G	B	DELTA	N	COR
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	128	555	0,95	marrom
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	160	128	555	0,95	marrom

227,4

Análise da seção 2 do corpo de prova A					
R	G	B	DELTA	N	COR
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
224	160	128	555	0,95	marrom
224	192	128	460	0,8	laranja
224	192	128	460	0,8	laranja
224	224	128	800	1,39	verde amarel
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
160	192	192	240	0,4	azul
160	160	192	575	1	roxo
160	160	192	575	1	roxo
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	160	128	555	0,95	marrom
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	160	128	555	0,95	marrom
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza esc
160	160	164	80	0,1	cinza esc
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	160	128	555	0,95	marrom

352,5

## ANEXO F2

Análise da seção 1 do corpo de prova B					
R	G	B	DELTA	N	COR
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
255	251	240	260	0,45	branco
255	251	240	260	0,45	branco
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	192	575	1	roxo
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	160	128	555	0,95	marrom
224	160	192	1050	1,82	vermelho-ros
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	128	75	0,09	marrom+
160	128	128	1150	2	roxo++

316,32

Análise da seção 2 do corpo de prova B					
R	G	B	DELTA	N	COR
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	160	192	575	1	roxo
192	160	192	575	1	roxo
224	160	192	1050	1,82	vermelho-rosa
224	160	128	520	0,9	vermelho
224	192	128	460	0,8	laranja
224	224	128	800	1,38	verde-amar
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
255	251	240	260	0,45	branco
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
160	192	192	730	1,27	Azul++
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	160	192	620	1,08	azul escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	160	128	555	0,95	marrom
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	220	192	760	1,32	verde-azul
192	160	128	555	0,95	marrom
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
192	192	192	40	0,05	cinza-25%
192	192	128	120	0,15	verde-sum
192	160	128	555	0,95	marrom
160	128	128	1150	2	roxo++
160	160	164	80	0,1	cinza escuro
160	192	128	1350	2,35	verde
192	160	128	555	0,95	marrom

416,1

## 9 APÊNDICE

### 9.1 Equação da tensão

Segundo Araújo (2006), o físico James Clerk Maxwell percebeu que as variações nos índices de refração em um elemento transparente acontecem de acordo com a variação das tensões principais em um corpo fotoelástico, e essa variação pode ser determinada pelas seguintes equações:

$$n_1 - n_0 = C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2 \quad \text{Eq. 9.1}$$

$$n_2 - n_0 = C_1\sigma_2 + C_2\sigma_1 \quad \text{Eq. 9.2}$$

A constante fotoelástica do material é calculada através da igualdade das equações Eq. 9.1 e Eq.9.2, dessa igualdade obtém-se:

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2) * (\sigma_1 - \sigma_2) = C * (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Eq. 9.3}$$

Já a diferença de fases linear  $\delta$  entre uma componente de luz em relação à outra no eixo de propagação devido a diferença de velocidade entre o eixo rápido e o lento, é dada pelas equações:

$$\delta_1 = b(n_1 - n_0) \quad \text{Eq. 9.4}$$

$$\delta_2 = b(n_2 - n_0) \quad \text{Eq. 9.5}$$

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = b(n_1 - n_2) \quad \text{Eq. 9.6}$$

onde  $b$  é a espessura do corpo de prova.

Sendo as intensidades de tensões nas direções principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  e as velocidades da luz vibrando nessas direções são  $v_1$  e  $v_2$ , o tempo para a luz transpassar a placa para cada componente será  $\frac{b}{v}$ , e  $\delta$  a retardação entre os eixos é representada pela equação:

$$\delta = c \left( \frac{b}{v_1} - \frac{b}{v_2} \right) = b(n_1 - n_2) \quad \text{Eq. 9.7}$$

Igualando as equações Eq. 9.3 e Eq.9.6, dá a diferença de fase linear em função das tensões principais:

$$\frac{\delta}{b} = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Eq. 9.8}$$

A diferença de fase angular  $\Delta$  pode ser calculada a partir da fase linear  $\delta$ , dada a equivalência ao feixe de luz que gira ao longo do eixo de propagação com frequência angular  $\omega$  e do comprimento de onda  $\lambda$ :

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} K(n_1 - n_2) \quad \text{Eq. 9.9}$$

Igualando as equações Eq.9.8 a Eq.9.9, encontra-se a diferença de fase angular  $\Delta$  em função da diferença das tensões principais:

$$\frac{\Delta}{2\pi} \frac{\lambda}{c} \frac{1}{b} = (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Eq. 9.10}$$

As quantidades de tensões de uma isocromática são identificadas pela constante  $K$  (constante óptica do material) e as ordens de franjas isocromática  $N$ , são dadas respectivamente pelas equações:

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} \quad \text{Eq. 9.11}$$

$$K = \frac{\lambda}{c} \quad \text{Eq. 9.12}$$

Obtendo essas variáveis acha-se a diferença das tensões principais:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N * K}{b} \quad \text{Eq. 9.13}$$

$$\tau_{máx} = \frac{N * K}{2b} \quad \text{Eq. 9.14}$$

Substituindo as variáveis nas Eq. 9.13 e Eq.9.14, tem-se:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \tau = \frac{KN}{2b}$$

## 9.2 Equação da elipse através da técnica de contagem de interseção.

Utilizando a técnica de contagem de interseção, Whitehouse (1974) descreveu a anisotropia microestrutural, através da medida do Comprimento da Interseção Média. Ele provou que os pontos de interseção podem ser interpolados e representados por elipses.

A equação geral de uma elipse no sistema cartesiano ( $x$ ,  $y$  e  $Z$ ) é dada por:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Exz + 2Fyz = 1 \quad \text{Eq. 9.2.1}$$

O Silva (2009) define  $L(\theta)$  como o comprimento da interseção média na direção  $\theta$ , no plano  $\alpha$  com uma direção aleatória. O encontro desse plano com uma amostra óssea gera uma seção, com  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  sendo projeções no sistema de coordenadas cartesiano  $(x, y, z)$  de um vetor unitário  $\mathbf{n}$  com direção  $\theta$  pertencendo ao plano  $\alpha$ . Sendo as coordenadas do vetor  $L(\theta)$  nos eixos  $x, y, z$  dadas por:  $x = L(\theta)n_1$ ,  $y = L(\theta)n_2$  e  $z = L(\theta)n_3$ , a equação pode ser reescrita como:

$$An_1^2 + Bn_2^2 + Cn_3^2 + 2Dn_1n_2 + 2En_1n_3 + 2Fn_2n_3 = \frac{1}{L^2(\theta)} \quad \text{Eq.9.2.2}$$

ou,

$$[n_1 \ n_2 \ n_3] * \begin{bmatrix} A & B & E \\ D & B & F \\ E & F & C \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{L^2(\theta)} \quad \text{Eq.9.2.3}$$

A matriz (Eq.9.2.3) é um tensor positivo de segunda ordem. (SILVA, 2009)

### 9.3 Cotação do valor final do polariscópio e ensaio

Para construir o polariscópio foi necessário: chapa de aço, tubo PVC, Luminária Spot Sobrepor 1 lâmpada, lâmpada, barra rosqueada, porcas, lentes polarizadoras, suportes para a lente e corpos de prova feito em acrílico. Na Tabela 7 estão os valores dos respectivos itens.

Tabela 11: Itens e custo do equipamento e corpos de provas

Item	Quantidade	Valor (r\$)
Chapa de aço 16	2m x 1m x 1,55mm	400,00
Tubo pvc	25mm x 1m	5,00
Luminária spot sobrepor 1 lâmpada	1	13,00
Lâmpada fluorescente compacta 20w 220v branca, fria E27	1	20,00

Barra roscada	6mm x 1m	4,00
Porcas	4	1,00
Lentes polarizadoras	2	300,00
SUPORTES PARA A LENTE	2	70,00
CORPOS DE PROVA FEITO EM ACRÍLICO	3	50,00

#### 9.4 Imagens do polariscópio e ensaios

Figura 23: Luminária



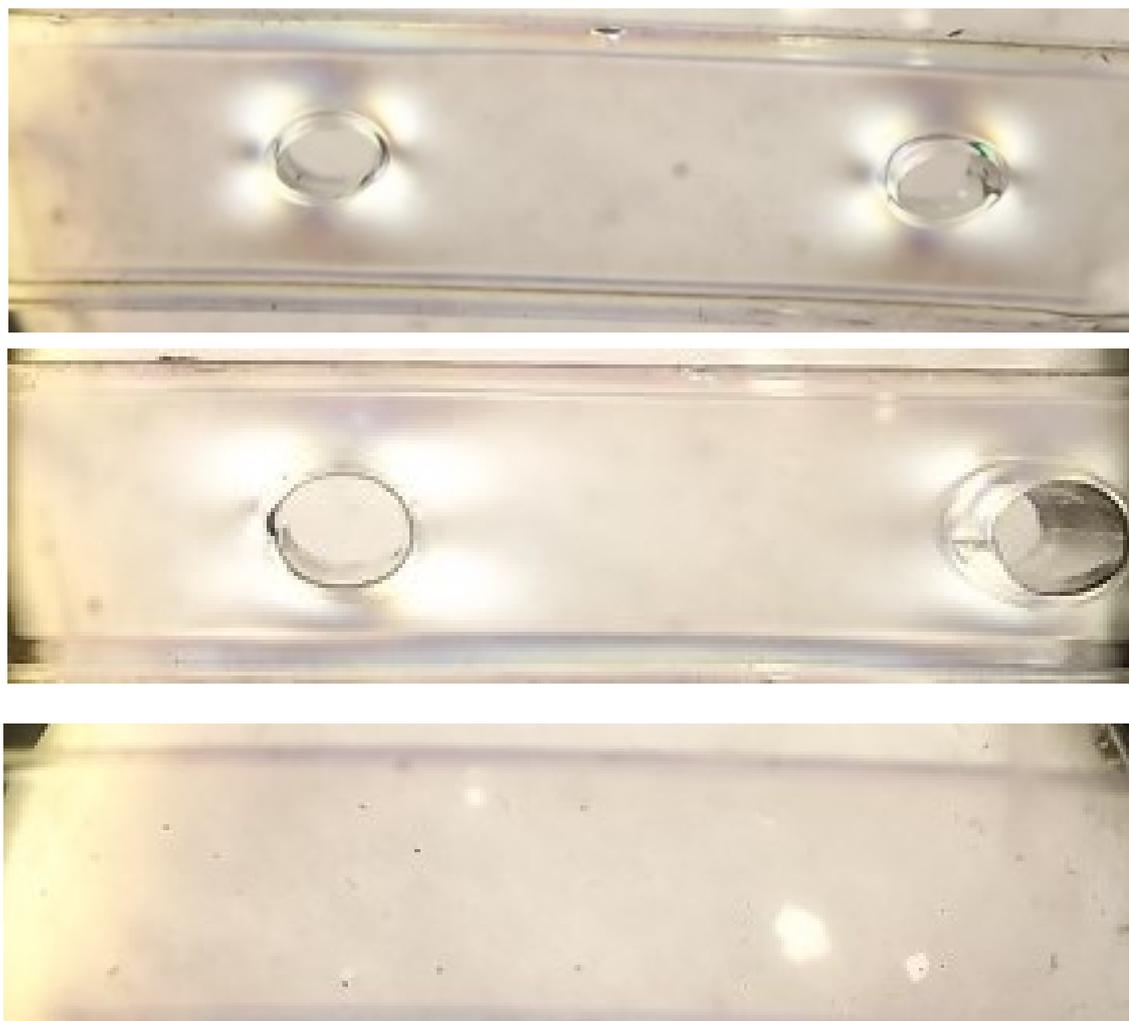
Fonte: A autora (2022)

Figura 24: Chapas para apoio do corpo de prova e fuso aplicador de carga.



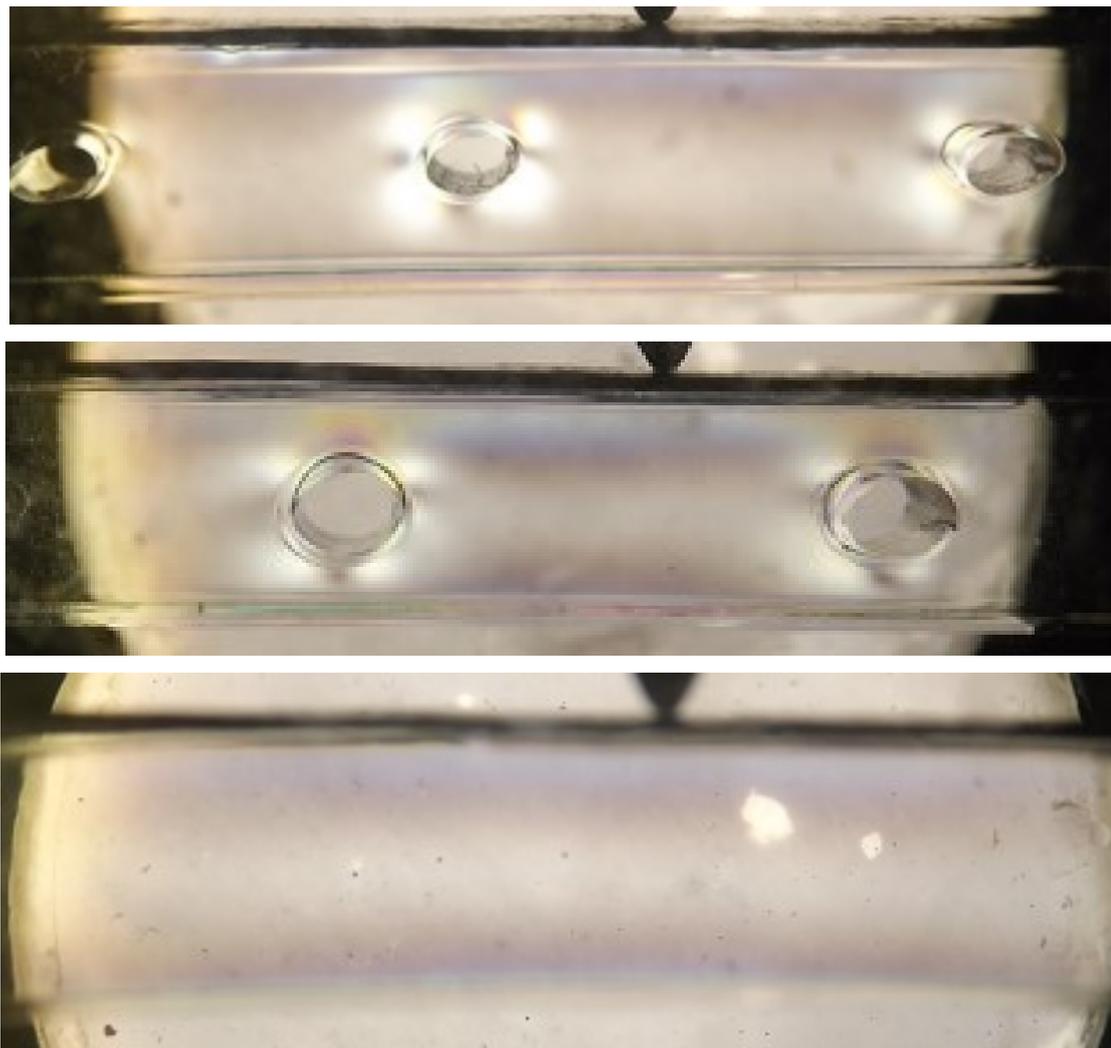
Fonte: A autora (2022)

Figura 25: Corpos de prova antes dos ensaios- A, B e C respectivamente



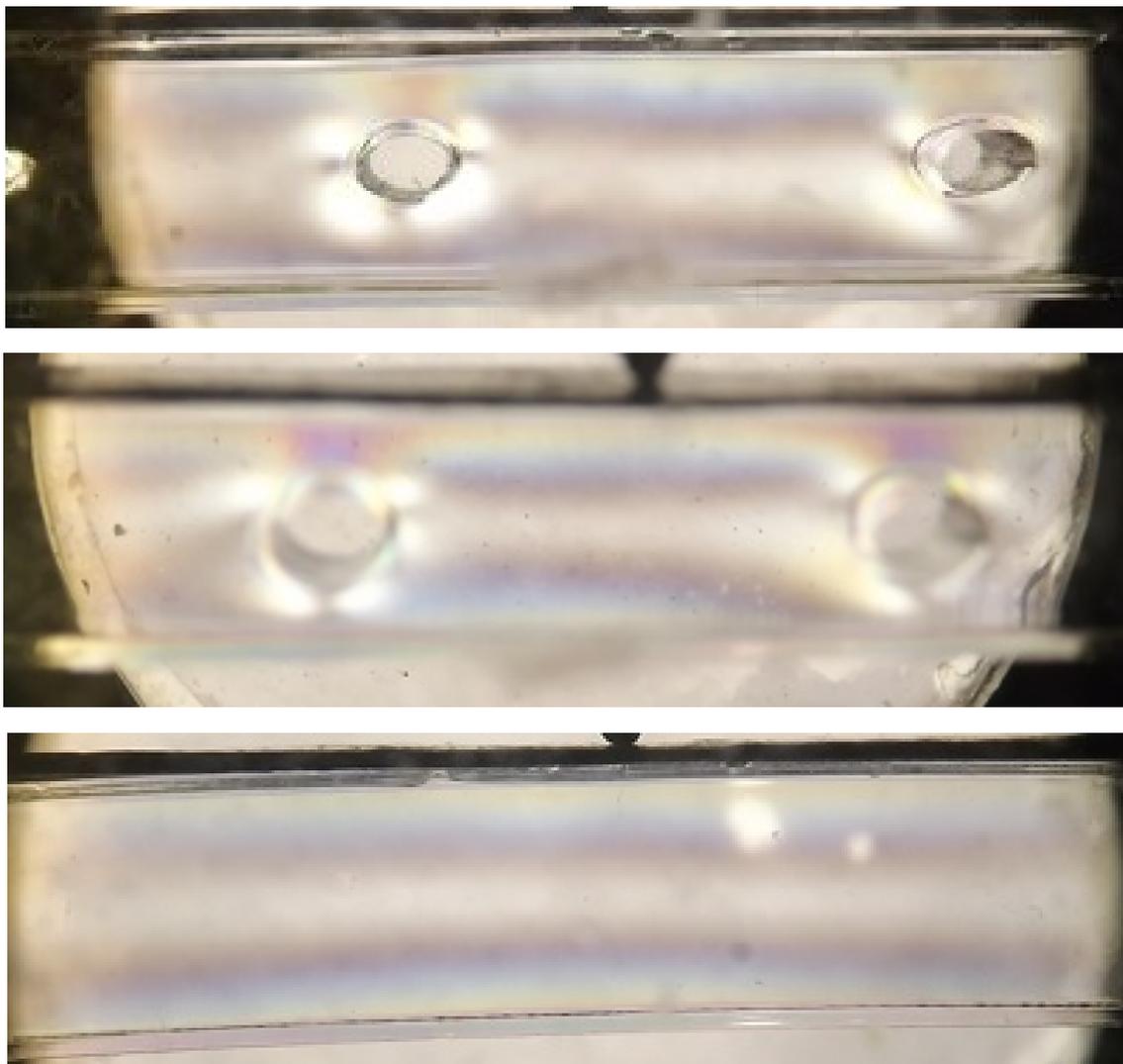
Fonte: A autora (2022)

Figura 26: Corpos de prova com deformação de 2mm- A, B e C respectivamente



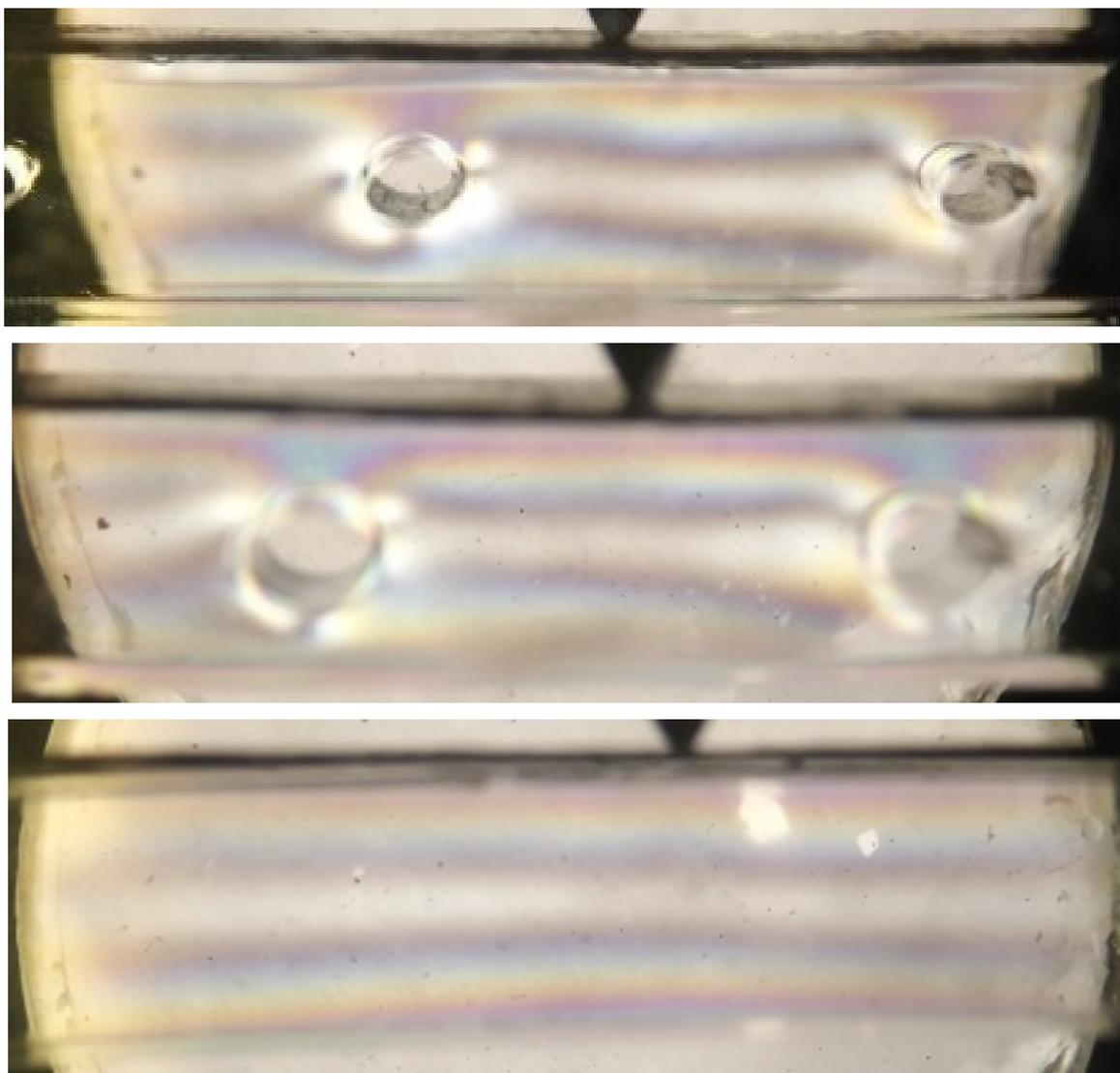
Fonte: A autora (2022)

Figura 26: Corpos de prova com deformação de 4mm- A, B e C respectivamente



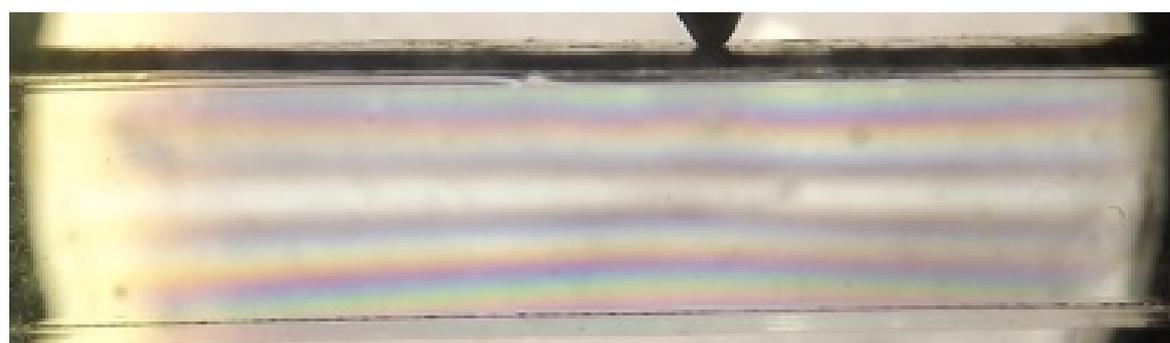
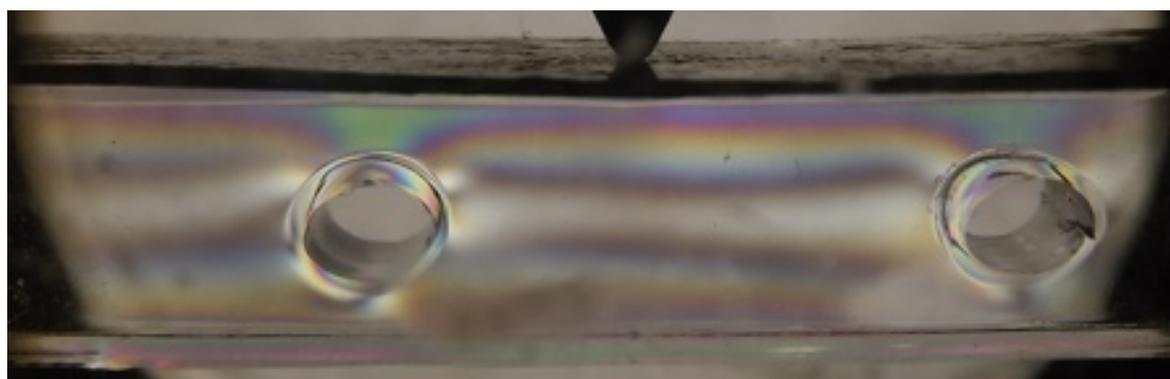
Fonte: A autora (2022)

Figura 27: Corpos de prova com deformação de 6mm- A, B e C respectivamente



Fonte: A autora (2022)

Figura 28: Corpos de prova com deformação de 8mm- A, B e C respectivamente



Fonte: A autora (2022)