



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Kaike Pastor Saavedra

**DIGITALIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DA IMAGEM OBTIDA
PELA TÉCNICA DA FOTOELASTICIDADE COM AS
TENSÕES EM MATERIAIS SUBMETIDOS A ESFORÇOS EM
REGIME ELÁSTICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GOIÂNIA
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome completo do autor: Kaike Pastor Saavedra

Título do trabalho: Digitalização e correlação da imagem obtida pela técnica da fotoelasticidade com as tensões em materiais submetidos à esforços em regime elástico

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)s autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Marlipe Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 01/07/2026, às 08:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kaike Pastor Saavedra, Discente**, em 02/07/2026, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6302811** e o código CRC **5EBC171E**.

Referência: Processo nº 23070.012790/2026-95

SEI nº 6302811

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Kaike Pastor Saavedra

**DIGITALIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DA IMAGEM OBTIDA
PELA TÉCNICA DA FOTOELASTICIDADE COM AS
TENSÕES EM MATERIAIS SUBMETIDOS A ESFORÇOS EM
REGIME ELÁSTICO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.

Orientador(a): Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

GOIÂNIA
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Saavedra, Kaike Pastor

DIGITALIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DA IMAGEM OBTIDA PELA
TÉCNICA DA FOTOELASTICIDADE COM AS TENSÕES EM MATERIAIS
SUBMETIDOS A ESFORÇOS EM REGIME ELÁSTICO [manuscrito] / Kaike
Pastor Saavedra. - 2026.

80 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal
de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC),
Engenharia Mecânica, Goiânia, 2026.

1. Fotoelasticidade. 2. Polariscópio. 3. Análise de Tensões. 4.
Digitalização de Imagens. 5. Mecânica Experimental.
I. Neto, Marlipe Garcia Fagundes, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao primeiro dia do mês de julho do ano de 2026 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Digitalização e correlação da imagem obtida pela técnica da fotoelasticidade com as tensões em materiais submetidos à esforços em regime elástico”, de autoria de Kaíke Pastor Saavedra, do curso de graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto - EMC/UFG com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Gino Bertolucci Colherinhas EMC/UFG e Eng. Mauro César da Silva. Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 6,5, tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marlipe Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 01/07/2026, às 09:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gino Bertolucci Colherinhas, Professor do Magistério Superior**, em 01/07/2026, às 09:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauro Cesar Da Silva, Discente**, em 01/07/2026, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6302752** e o código CRC **CABB4C63**.

*Dedico este trabalho à minha filha,
Rebeca, que é minha maior
inspiração de vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Julio e Carolina, e a toda a minha família, que sempre me apoiaram, nunca desistiram de mim e foram meu porto seguro ao longo de toda essa jornada. O suporte de vocês foi a base para que eu chegasse até aqui. Aos meus irmãos, Djairo e Julia, os meus eternos "salames", um agradecimento especial por sempre serem o meu ponto de alívio. Vocês garantiram os meus melhores momentos de risadas e descontração, tornando o peso do curso e dessa trajetória muito mais leve.

Um agradecimento muito especial à minha madrastra, Myrian Cristina Sousa Pacheco. Muito obrigado por ser a pessoa que mais me cobrou em relação aos estudos. Se hoje estou entregando este trabalho, é em grande parte graças aos inúmeros "puxões de orelha" que levei na época de escola. Sua exigência e sua persistência em não me deixar acomodar fizeram toda a diferença na minha formação.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Marlipe Garcia Fagundes Neto, pela paciência, pelas diretrizes e por me guiar com excelência no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também à professora Andreia Aoyagui Nascimento, que me auxiliou imensamente durante meu tempo no PET-Engenharias da UFG, sempre me oferecendo muito apoio e acreditando no meu potencial.

Aos meus amigos, que dividiram comigo os desafios do curso de Engenharia, as noites em claro estudando e os momentos indispensáveis de descontração, o meu muito obrigado pela parceria de sempre. A presença de vocês tornou essa caminhada muito mais fácil.

Por fim, o meu maior e mais profundo agradecimento vai para a minha filha, Rebeca. Você é a minha razão de existir e a maior motivação para que eu busque ser uma pessoa e um engenheiro melhor todos os dias. Tudo isso é por você e para você.

RESUMO

A técnica da fotoelasticidade utiliza filtros polarizadores de luz posicionados a jusante e a montante de um material com propriedades fotoelásticas para visualizar um padrão de franjas que está correlacionado com a tensão. Portanto, é uma técnica experimental para observar a tensão em peças submetidas a esforços. O Laboratório de Mecânica Aplicada – LabMEC/UFG possui uma bancada da técnica da fotoelasticidade, também conhecida como polariscópio, que foi produto do trabalho de conclusão de curso de Guimarães (2024) intitulado “PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA FOTOELASTICIDADE”. Além do projeto, o trabalho resultou na construção do polariscópio com comparações qualitativas da tensão em placas finas com diferentes detalhes geométricos com modelos numéricos obtidos via Autodesk Inventor. Contudo, ao final foram apresentadas sugestões para continuação do trabalho: [1] aprimorar o polariscópio plano para circular; [2] instrumentar o material submetido sob tensão com extensometria; [3] instrumentar e explorar outros modos de aplicação de carga como flexão, torção, cisalhamento e axial; [4] digitalizar a imagem da fotoelasticidade e correlacionar com modelos de tensões teóricos. Ainda, o presente projeto também contribuirá para o projeto de pesquisa “Desenvolvimento de Aparatos de Apoio Didático-Experimental para Engenharia Mecânica”, em que a bancada do polariscópio ajudará as disciplinas da linha de Projetos de Sistemas Mecânicos nas práticas experimentais de tensão. Além disso, a digitalização da imagem e correlação com modelos conhecidos representa uma inovação e tecnologia nos estudos de tensões experimentais. Por fim, o presente projeto almeja aprimorar o polariscópio do LabMEC/UFG e somar aos aparatos de apoio didático-experimental do projeto de pesquisa. Como resultado, a instrumentação da bancada mostrou-se satisfatória para a aplicação controlada dos carregamentos e para a obtenção dos padrões fotoelásticos. A comparação entre os arranjos ópticos indicou melhora significativa com o uso do polariscópio circular, que proporcionou melhor definição do contorno das franjas, transições cromáticas mais nítidas e menor interferência visual em relação ao polariscópio plano. Conclui-se que a adaptação do sistema, associada ao processamento digital das imagens, ampliou a confiabilidade da bancada como ferramenta didático-experimental para análise de tensões.

Palavras-chave: Fotoelasticidade. Polariscópio. Análise de Tensões. Digitalização de imagens. Mecânica Experimental.

ABSTRACT

The photoelasticity technique uses light polarizing filters positioned downstream and upstream of a material with photoelastic properties to visualize a fringe pattern correlated with stress. Therefore, it is an experimental technique for observing stress in components subjected to loads. The Applied Mechanics Laboratory – LabMEC/UFG has a photoelasticity bench, also known as a polariscope, which was developed as part of Guimarães' (2024) undergraduate thesis entitled “DESIGN OF A DIDACTIC BENCH FOR THE APPLICATION OF THE PHOTOELASTICITY TECHNIQUE”. In addition to the design, that work resulted in the construction of the polariscope, with qualitative comparisons of stress in thin plates with different geometric features against numerical models obtained using Autodesk Inventor. However, at the end of the study, suggestions were presented for future work: [1] improving the plane polariscope by converting it into a circular one; [2] instrumenting the material under stress using strain gauges; [3] instrumenting and exploring other load application modes, such as bending, torsion, shear, and axial loading; and [4] digitizing the photoelasticity image and correlating it with theoretical stress models. Furthermore, the present project will also contribute to the research project “Development of Didactic-Experimental Support Apparatuses for Mechanical Engineering,” in which the polariscope bench will support courses in the Mechanical Systems Design area through experimental stress analysis practices. In addition, image digitization and correlation with known models represent innovation and technology in experimental stress studies. Finally, the present project aims to improve the LabMEC/UFG polariscope and contribute to the didactic-experimental support apparatuses of the research project. As a result, the instrumentation of the bench proved satisfactory for the controlled application of loads and for obtaining photoelastic fringe patterns. The comparison between the optical arrangements indicated a significant improvement with the use of the circular polariscope, which provided better definition of the fringe contours, sharper chromatic transitions, and less visual interference compared to the plane polariscope. It is concluded that the adaptation of the system, associated with digital image processing, increased the reliability of the bench as a didactic-experimental tool for stress analysis.

Keywords: Photoelasticity, Polariscope, Stress Analysis, Image Digitization, Experimental Mechanics.

SUMÁRIO

1 Introdução	15
1.1 Objetivos	16
1.2 Estrutura do trabalho	17
2 Revisão Bibliográfica	19
2.1 Teoria da Fotoelasticidade	19
2.2 Fotoelasticidade de Transmissão Plana	20
2.3 Teoria da Onda de Luz	20
2.4 Polarização da Luz	23
2.5 Propagação da Luz Através de Meios Anisotrópicos	24
2.6 Polariscópio	27
2.7 Polariscópio de Transmissão Plana	27
2.8 Polariscópio de Transmissão Circular	30
2.9 Padrão de Franjas	31
2.10 Calibração	34
2.11 Materiais Fotoelásticos	36
2.12 Concentradores de Tensão	37
3 Materiais e Métodos	39
3.1 Desenvolvimento do Dispositivo Experimental de Flexão	39
3.2 Configuração do Sistema Óptico (Polariscópio Circular)	41
3.2.1 Identificação e orientação das lentes CPL	43
3.2.2 Aquisição e padronização das imagens experimentais	44
3.3 Modelagem e Simulação Numérica Computacional	45
3.3.1 Definição do material e propriedades mecânicas	45
3.3.2 Condições de contorno e carregamento	46
3.3.3 Geração da malha e critério de convergência	48
3.3.4 Critério de tensão adotado no pós-processamento numérico	50
3.4 Processamento Digital e Padronização Dimensional das Imagens	51
3.5 Análise Quantitativa e Correlação de Imagens	52
4 Resultados e Discussões	55
4.1 Estimativa Operacional da Constante Óptica e Correlação Com a Simulação Numérica	55
4.2 Análise Fotoelástica via Polariscópio Plano	61
4.2.1 Análise da Viga Tipo 1	61
4.2.2 Análise da Viga Tipo 2	63
4.3 Análise Fotoelástica via Polariscópio Circular	65
4.3.1 Análise da Viga Tipo 1 via Arranjo Circular	66
4.3.2 Análise da Viga Tipo 2 via Arranjo Circular	67
4.4 Comparação de Desempenho: Modelos Experimentais vs. Simulação Numérica (Inventor)	69

5 CONCLUSÃO	73
5.1 Sugestões para futuros trabalhos	74
6 Referências Bibliográficas	76
APÊNDICE A – SCRIPT EM PYTHON PARA REDIMENSIONAMENTO DE IMAGENS	79
APÊNDICE B – SCRIPT EM PYTHON PARA ANÁLISE DE CORRELAÇÃO (MSE, HISTOGRAMA E SSIM)	81
APÊNDICE C – PROPOSTA DE BANCADA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Relação de Diferença de Fase e Ordens de Franja das Cores	33
Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do policarbonato adotadas na simulação numérica.	46
Tabela 3.2: Estudo de convergência da malha.	49
Tabela 4.1: Comparativo do Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) entre os arranjos ópticos.	69
Tabela 4.2: Comparativo dos polariscópios	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Polariscópio do Bruno Guimarães.....	16
Figura 2.1: Representação da luz não polarizada atravessando lentes polarizadas.....	24
Figura 2.2: Divisão de onda linearmente polarizada em onda-o e onda-e.....	25
Figura 2.3: Polariscópio de Transmissão Plana.....	28
Figura 2.4: Polariscópio de Transmissão Circular.....	31
Figura 2.5: Padrão de isoclínicas em anel sob compressão.....	32
Figura 2.6: Barra plana sobre momento fletor.....	38
Figura 2.7: Análise fotoelástica da barra plana.....	38
Figura 3.1: Bancada com o display da balança.....	39
Figura 3.2: Detalhes das conexões.....	40
Figura 3.3: Polariscópio circular utilizado.....	42
Figura 3.4: Posicionamento do equipamento fotográfico com auxílio de tripé para padronização da captura de imagens.....	43
Figura 3.5: Condições de contorno.....	48
Figura 3.6: Simulação com 0,0015625 de tamanho médio.....	49
Figura 3.7: Análise preliminar.....	52
Figura 4.1: Ponto de referência selecionado na imagem fotoelástica experimental.....	56
Figura 4.2: Ponto de referência selecionado no campo de tensão equivalente de Von Mises obtido no Autodesk Inventor.....	56
Figura 4.3: Região correspondente ao Ponto 2 na imagem fotoelástica experimental.....	58
Figura 4.4: Ponto 2 de referência selecionado no campo de tensão equivalente de Von Mises obtido no Autodesk Inventor.....	58
Figura 4.5: Ponto 3 selecionado na simulação numérica, localizado na região intermediária entre a parte central da viga e o entalhe.....	60
Figura 4.6: Ponto 3 de referência selecionado no campo de tensão equivalente de Von Mises obtido no Autodesk Inventor.....	60
Figura 4.7: Viga Tipo 1.....	62
Figura 4.8: Padrão de franjas fotoelásticas no polariscópio plano para a Viga Tipo 1 sob carga de 22 N.....	62
Figura 4.9: Padrão de franjas fotoelásticas no polariscópio plano para a Viga Tipo 1 sob carga de 40 N.....	63
Figura 4.10: Viga Tipo 2.....	64
Figura 4.11: Padrão de franjas fotoelásticas no polariscópio plano para a Viga Tipo 2 sob carga de 40 N.....	64
Figura 4.12: Padrão de franjas fotoelásticas no polariscópio plano para a Viga Tipo 2 sob carga de 50 N.....	65
Figura 4.13: Padrão de franjas isocromáticas no polariscópio circular para a Viga Tipo 1 sob carga de 22 N.....	66
Figura 4.14: Padrão de franjas isocromáticas no polariscópio circular para a Viga Tipo 1 sob carga de 40 N.....	67
Figura 4.15: Padrão de franjas isocromáticas no polariscópio circular para a Viga Tipo 2 sob carga de 40 N.....	68

Figura 4.16: Padrão de franjas isocromáticas no polariscópio circular para a Viga Tipo 2 sob carga de 50 N.....	68
Figura C.1: Modelo esquemático da bancada proposta para ensaio de tração.....	84
Figura C.2: Balança de peixe proposta para utilização como dinamômetro no ensaio de tração.....	86

1 INTRODUÇÃO

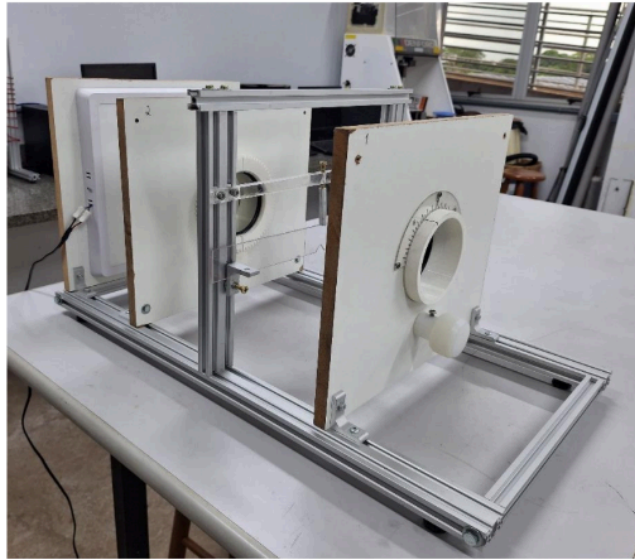
A compreensão do estado de tensões em materiais é fundamental para o dimensionamento e a análise de componentes mecânicos. Entre as diferentes técnicas experimentais aplicadas nesse campo, a fotoelasticidade destaca-se por permitir a visualização direta da distribuição de tensões em peças submetidas a esforços, por meio de padrões de franjas ópticas. Essa metodologia baseia-se na utilização de materiais fotoelásticos transparentes que, quando submetidos a carregamentos mecânicos, tornam-se birrefringentes. O processo funciona da seguinte forma: primeiro, a luz é polarizada linearmente antes de passar pela amostra, ao atravessar o material sob tensão, o feixe de luz se divide em dois, com velocidades e índices de refração diferentes. Por fim, um segundo polarizador (o analisador), posicionado após a amostra, permite que a interação entre a luz e o material crie um padrão de franjas observável.

Por meio da técnica da fotoelasticidade, um polariscópio plano retorna informações sobre dois tipos de tensões. A direção das tensões principais é revelada através das franjas isoclínicas, bandas escuras que se movem com a rotação da amostra em relação aos eixos polarizadores. Já a diferença entre as tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) é visualizada pelas franjas isocromáticas, bandas coloridas (ou escuras, sob luz monocromática) que indicam a magnitude da tensão.

Neste ponto, é importante notar a distinção entre os tipos de equipamento. O polariscópio plano permite visualizar tanto as franjas isoclínicas quanto as isocromáticas, o que pode tornar a análise complexa pela sobreposição de ambos os padrões. Em contrapartida, o polariscópio circular, por meio de lâminas de quarto de onda, elimina as franjas isoclínicas e exibe apenas as isocromáticas, facilitando significativamente a análise quantitativa das tensões.

O Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC/UFG) dispõe de um polariscópio construído a partir do trabalho de conclusão de curso de um discente de graduação, que resultou no projeto e montagem de uma bancada didática para aplicação da técnica da fotoelasticidade. Embora a versão inicial tenha contemplado o modelo de polariscópio plano e análises qualitativas das franjas, foram indicadas oportunidades de aprimoramento, como a adaptação para o modelo circular, a instrumentação do sistema e a digitalização das imagens obtidas.

Figura 1.1: Polariscópio do Bruno Guimarães



Fonte: Guimarães (2024)

Nesse contexto, o presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de dar continuidade às propostas levantadas, promovendo avanços na aplicabilidade da técnica dentro de um ambiente acadêmico e de pesquisa. A adequação do polariscópio plano para circular, a instrumentação com célula de carga e a digitalização computacional das imagens visam ampliar a precisão, a qualidade e a confiabilidade das análises experimentais de tensões. Além disso, os resultados contribuem para o projeto de pesquisa “Desenvolvimento de Aparatos de Apoio Didático-Experimental para Engenharia Mecânica”, fortalecendo o ensino prático das disciplinas da linha de Projetos de Sistemas Mecânicos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver, instrumentar e validar uma bancada didática para análise experimental de tensões utilizando a técnica da fotoelasticidade de transmissão. O estudo propõe quantificar e correlacionar os campos de tensões de vigas poliméricas entalhadas, confrontando os dados ópticos experimentais obtidos na bancada com modelos teóricos gerados via simulação computacional por análise de elementos finitos.

Para viabilizar o alcance deste propósito, foram estabelecidas as seguintes metas estruturais e analíticas:

- Adaptar o sistema óptico do aparato físico de carregamento mecânico (flexão de três pontos), promovendo a conversão da configuração original de polariscópio plano para um arranjo de polariscópio circular;
- Instrumentar o aparato físico de carregamento mecânico (flexão de três pontos) mediante a incorporação de um sensor de força (balança digital), permitindo a aferição quantitativa e precisa das cargas aplicadas aos corpos de prova;
- Estimar uma constante óptica operacional para o policarbonato, f_G , estabelecendo uma correlação semiquantitativa entre a ordem de franja isocromática observada experimentalmente e o campo de tensão obtido por simulação numérica;
- Aplicar o Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) no processamento das imagens para atestar quantitativamente a convergência entre os métodos e comprovar a eficácia da adaptação para o polariscópio circular na supressão de ruídos visuais.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para contemplar os objetivos propostos de maneira lógica e sequencial, a presente pesquisa foi estruturada e dividida em cinco capítulos fundamentais, que descrevem o passo a passo desde a fundamentação teórica até a consolidação dos dados experimentais.

O Capítulo 1 introduz o tema da pesquisa, apresentando a contextualização da mecânica experimental de tensões, a justificativa para a construção do equipamento didático e os objetivos que norteiam o desenvolvimento do estudo.

O Capítulo 2 dedica-se à revisão da literatura e fundamentação teórica. São abordados os conceitos fundamentais da fundamentação teórica da fotoelasticidade, o embasamento fotomecânico da propagação da luz polarizada, as diferenças cruciais entre os polariscópios plano e circular, bem como a base matemática que rege o cálculo do Índice de Similaridade Estrutural (SSIM).

O Capítulo 3 detalha os Materiais e Métodos empregados. Esta seção descreve minuciosamente o projeto e a adaptação e instrumentação da bancada de ensaios e o arranjo

dos componentes ópticos. Adicionalmente, apresenta-se a configuração do software de simulação para a execução da análise de malha estrutural e os parâmetros computacionais utilizados para o processamento e correlação das imagens fotográficas.

O Capítulo 4 expõe os resultados e discussões do projeto. Inicialmente, apresenta-se uma estimativa operacional da constante óptica do policarbonato, obtida a partir da correlação entre o padrão fotoelástico experimental e o campo de tensão numérico. Em seguida, são discutidas as comparações entre os arranjos plano e circular, com ênfase na interpretação semiquantitativa dos resultados e na avaliação da similaridade estrutural entre as imagens.

O Capítulo 5 encerra o documento apresentando as conclusões finais do trabalho. Retomam-se as constatações mais relevantes acerca da precisão da bancada construída, comprovando sua eficácia como ferramenta didática e de validação em engenharia, e sugerem-se possíveis melhorias e trabalhos futuros derivados desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TEORIA DA FOTOELASTICIDADE

A técnica de fotoelasticidade consiste em um método óptico para análise de tensões fundamentado nas características de certos materiais que reagem a flutuações de tensão interna. Sob a ação de cargas mecânicas, tais materiais exibem fenômenos visuais proporcionais aos esforços aplicados. Essa abordagem é amplamente utilizada para a verificação empírica de modelos numéricos, bem como para investigar a distribuição de tensões em cenários com geometrias e carregamentos de alta complexidade (PEREIRA; SMITH NETO; ALMEIDA, 2007).

Um dos grandes benefícios desse método é a possibilidade de observar de forma imediata a magnitude das tensões, das deformações e de seus respectivos gradientes ao longo de todo o corpo em análise. Essa visualização de campo inteiro destaca-se como um atributo único da fotoelasticidade em comparação a outras metodologias de avaliação estrutural (DALLY; RILEY, 1991).

Segundo Redner (1980), a fotoelasticidade supera limitações de outras técnicas, como a extensometria, ao possibilitar a visualização direta das regiões de tensão, sendo esta uma vantagem da fotoelasticidade em relação a outros métodos. Na fotoelasticidade visualiza-se um campo de deformações unitárias para toda a extensão do próprio objeto a ser estudado e não somente em um ponto localizado como na extensometria (REDNER, 1980).

Historicamente, o fenômeno foi identificado em 1812 por Brewster, em meio a estudos voltados para as características ativas de corpos sólidos e translúcidos. O pesquisador constatou que materiais inicialmente isotrópicos adquiriam comportamento anisotrópico ao sofrerem a ação de cargas mecânicas, sendo o grau dessa anisotropia diretamente proporcional à deformação sofrida pela peça (ANDERSON et al., 2006).

Ao expor vidros tensionados à luz polarizada, Brewster percebeu o surgimento de franjas coloridas, evidenciando o efeito fotoelástico. Ele concluiu que o comportamento óptico desses materiais mudava conforme o estado de tensão ao qual eram submetidos. Contudo, o uso prático dessas constatações só ocorreu de fato em 1891, momento em que C. Wilson se baseou nas propostas de Brewster para analisar os esforços em vigas sujeitas a cargas concentradas.

O aprimoramento e a ampla difusão da técnica fotoelástica avançaram significativamente em 1925, através do trabalho de E. G. Coker, que inovou ao adotar o celuloide como matéria-prima na confecção de modelos para a realização dos ensaios (FERREIRA JUNIOR, 2003).

2.2 FOTOELASTICIDADE DE TRANSMISSÃO PLANA

A fotoelasticidade de transmissão plana destaca-se como um recurso metodológico fundamental para a análise de tensões. Esse procedimento fundamenta-se na passagem de luz por modelos bidimensionais confeccionados com materiais fotoelásticos. Para isso, a abordagem exige a criação de moldes planos dotados de características ópticas específicas que possibilitem a formação de franjas, as quais são elementos essenciais para a investigação das tensões atuantes na peça estudada (GOMIDE, 1990).

Para que a aplicação desta técnica seja rigorosa e bem-sucedida, o modelo de estudo necessita apresentar um conjunto de propriedades físicas e ópticas bem definidas. A literatura recomenda fortemente que o material utilizado seja transparente, homogêneo, isotrópico e de comportamento linear, sendo imprescindível que possua também a capacidade de dupla refração temporária.

É justamente essa característica do material que permite revelar o comportamento estrutural quando a peça é submetida a esforços mecânicos. Sob tensão, o modelo exhibe respostas ópticas por meio do surgimento de franjas, cujo aspecto visual varia conforme a fonte luminosa empregada: ao se utilizar luz branca, observam-se franjas isocromáticas coloridas; por outro lado, a exposição à luz monocromática gera um padrão visual composto por franjas alternadas entre tons pretos e brancos (GOMIDE, 1990).

2.3 TEORIA DA ONDA DE LUZ

Certos materiais presentes na natureza possuem a característica de filtrar a onda luminosa, permitindo a passagem de apenas uma parcela de sua radiação. O registro inicial a respeito do fenômeno da polarização foi feito pelo pesquisador dinamarquês Erasm Bartholin. Ele notou que um cristal de calcita era capaz de projetar duas imagens simultâneas

de um mesmo elemento e, ao rotacionar a peça, uma das imagens mantinha-se fixa enquanto a outra orbitava ao seu redor.

Posteriormente, investigações conduzidas pelo físico e matemático Christiaan Huygens demonstraram que, ao fazer feixes luminosos atravessarem dois cristais de calcita em sequência e rotacionar o segundo, encontrava-se uma orientação específica na qual apenas uma imagem era gerada (SOUZA, 2013). Tal constatação fundamentou a premissa de que a velocidade de propagação luminosa estava condicionada ao seu ângulo de entrada no material.

No ano de 1801, Thomas Young fortaleceu as bases da teoria ondulatória por meio de seu clássico experimento da fenda dupla. Quase uma década depois, em 1810, o pesquisador francês Augustin Fresnel recorreu a essa mesma base teórica para elucidar os efeitos de interferência e difração. O grande marco de sua contribuição, no entanto, foi a proposição de que a luz atua como uma onda de natureza transversal (SOUZA, 2013).

Embora a perspectiva ondulatória seja eficiente para detalhar os eventos atrelados à propagação luminosa, ela apresenta limitações diante de certas propriedades da luz, em especial aquelas que envolvem a interação direta entre a radiação e a matéria. A compreensão de tais fenômenos só se tornou viável ao se admitir o comportamento corpuscular da luz (SCHIAVON, 2010).

Essas unidades elementares que compõem a luz recebem o nome de fótons. A carga energética de um fóton (E_f) possui uma relação direta com a frequência (f) da onda luminosa. De acordo com os postulados de Einstein, essa correlação é expressa pela equação $E_f = h \cdot f$, sendo h a representação da constante de Planck (TIPLER, 1995).

Mais tarde, na década de 1920, os ensaios realizados por C. J. Davisson, L. Germer e G. P. Thompson evidenciaram que os elétrons também assumem características tanto ondulatórias quanto corpusculares, resultando em eventos de difração e interferência. Essa descoberta foi fundamental para consolidar a aceitação da dualidade onda-partícula da luz (TIPLER, 1995).

Conforme estabelecido por Dally e Riley (1991) em conjunto com Araújo e Neves (2003), a totalidade dos eventos fotoelásticos é passível de representação através do campo elétrico da luz. Com o intuito de modelar matematicamente as respostas fotoelásticas, a

radiação luminosa é tratada como uma onda do tipo senoidal, cuja propagação do vetor pode ser formulada por meio da expressão a seguir: (SCHIAVON, 2010).

$$y(x, t) = y_m \cdot \text{sen} \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot (x - c \cdot t) \right] \quad (2.1)$$

onde,

y_m = Amplitude do vetor [m];

λ = Comprimento de onda [m];

c = Velocidade de propagação da luz [m/s];

x = Coordenada ao longo do eixo de propagação [m];

t = Tempo [s].

Mensurada em Hertz (Hz), a frequência de uma onda é conceituada como a quantidade de ciclos ou oscilações que ocorrem em uma unidade de tempo. Matematicamente, esse parâmetro corresponde ao inverso do período $T(s)$, o qual representa a fração de tempo exigida para que a radiação luminosa percorra a distância equivalente a um comprimento de onda (FAKHOURI, 2008). Desse modo, o cálculo da frequência ondulatória é determinado pela seguinte equação:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

Como o método fotoelástico emprega a radiação luminosa como ferramenta central de análise, o domínio sobre a natureza e as propriedades da luz torna-se um pré-requisito para o entendimento da técnica. Sendo a luz uma radiação capaz de sensibilizar o olho humano, a

avaliação de sua frequência, quantificada em Hertz (Hz), atua como um fator indispensável para a correta interpretação dos fenômenos fotoelásticos (DALLY e RILLEY, 1991).

O intervalo do espectro eletromagnético que compreendemos como luz visível localiza-se na faixa de 400 a 700 nm, sendo o fator determinante para a maneira como o ser humano capta visualmente as cores. A tonalidade observada possui ligação direta com a frequência associada aos componentes do vetor luminoso. Dessa forma, esse espectro visível é delimitado por comprimentos de onda (λ) que se estendem desde o espectro do violeta, situado entre 400 e 450 nm, até a faixa do vermelho, que ocorre entre 630 e 700 nm (ARAÚJO, 2006).

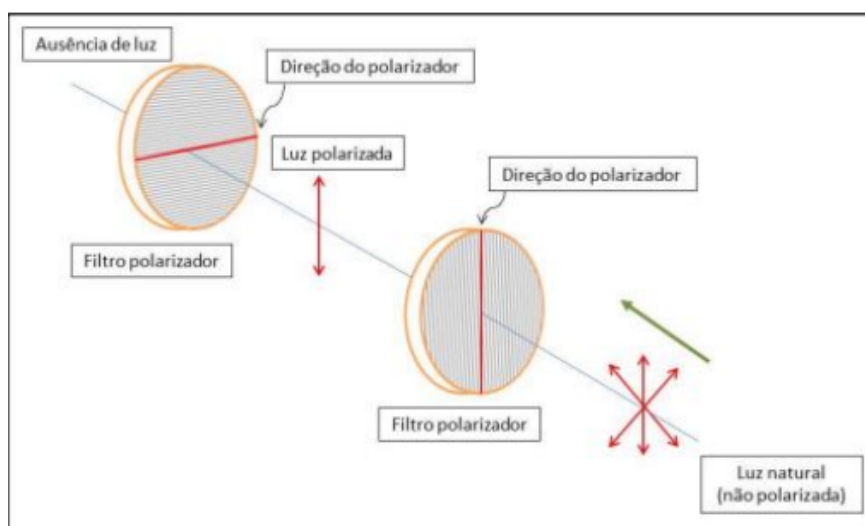
2.4 POLARIZAÇÃO DA LUZ

O entendimento do fenômeno da polarização luminosa é indispensável para a investigação de suas características básicas e utilidades práticas. Um feixe de luz proveniente do sol, por exemplo, é composto por um agrupamento de ondas que possuem frequências e planos de orientação totalmente dispersos e aleatórios (VASCONCELOS, 1947). Radiações provenientes de fontes como essa são categorizadas como não polarizadas, o que significa que, durante os processos de emissão, incidência e reflexão, suas ondas oscilam em múltiplos sentidos.

O mecanismo de polarização consiste justamente na triagem e filtragem dessas ondas a partir de seus eixos de vibração. Esse procedimento é realizado com o auxílio de um componente chamado polarizador, cuja função é operar como um filtro óptico capaz de converter a radiação natural difusa em um feixe de luz polarizada (COSTA, 2002).

Em um sistema contendo dois polarizadores, a passagem da luz dependerá do ângulo entre eles. Devido ao caráter transversal das ondas luminosas, caso os eixos de polarização desses filtros estejam desalinhados de forma cruzada (perpendiculares entre si), a intensidade luminosa que consegue atravessar o primeiro elemento será totalmente bloqueada e não emergirá do segundo. A representação visual do comportamento da radiação não polarizada ao interagir com essas lentes polarizadoras encontra-se ilustrada na Figura 2.1.

Figura 2.1: Representação da luz não polarizada atravessando lentes polarizadas.



Fonte: SANTOS (2020).

2.5 PROPAGAÇÃO DA LUZ ATRAVÉS DE MEIOS ANISOTRÓPICOS

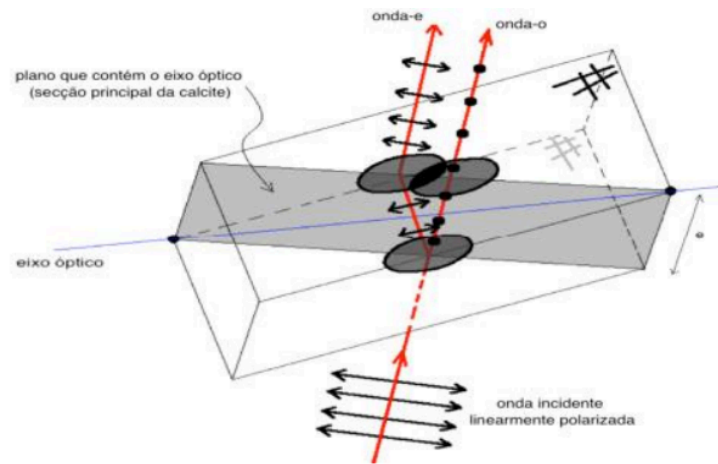
Os meios classificados como isotrópicos caracterizam-se por apresentar propriedades físicas, a exemplo da condutividade elétrica, da elasticidade e da velocidade de propagação luminosa, idênticas em qualquer direção analisada. Isso significa que a passagem de ondas, sejam elas sonoras ou luminosas, ocorrerá de maneira uniforme independentemente do eixo de deslocamento. Fluidos como a água e o ar, além de determinados materiais poliméricos, exemplificam bem esse tipo de comportamento (SCHIAVON, 2010).

Em contrapartida, os meios anisotrópicos distinguem-se pela variação de suas características ópticas e físicas dependendo da direção considerada. Nesses materiais, os valores de parâmetros como a elasticidade, o índice de refração e a condutividade elétrica sofrem alterações conforme o eixo de avaliação.

Quando um feixe luminoso incide sobre um corpo anisotrópico, ele sofre uma separação, originando duas ondas independentes: a onda ordinária (onda-o) e a onda extraordinária (onda-e). Pelo fato de apresentarem índices de refração diferentes, conforme pode ser observado na Figura 2.2, essas duas frentes de onda se propagam com velocidades distintas no interior do material (SILVA, 2017).

Determinados minerais, como é o caso do cristal de calcita, apresentam essa capacidade de dupla refração de forma intrínseca à sua natureza, enquadrando-se perfeitamente na categoria de materiais anisotrópicos. Na física óptica, a ocorrência desse fenômeno específico recebe o nome de birrefringência.

Figura 2.2: Divisão de onda linearmente polarizada em onda-o e onda-e.



Fonte: SILVA (2017)

De acordo com Fialho (1979), certos materiais de natureza transparente exibem a aptidão de manifestar o efeito da dupla refração ao serem submetidos a algum tipo de deformação mecânica. Esse comportamento recebe o nome de dupla refração temporária, consistindo no pilar conceitual que viabiliza o método da fotoelasticidade. Consequentemente, os corpos que desenvolvem essa característica óptica sob a ação de esforços são classificados como materiais fotoelásticos.

No contexto dos materiais fotoelásticos que manifestam o efeito da birrefringência temporária, Maxwell demonstrou que existe uma correlação direta entre as mudanças nos índices de refração e a deformação mecânica imposta ao corpo. Ele constatou que essa associação se comporta de maneira linearmente proporcional, podendo ser representada por meio da seguinte equação (SCHIAVON, 2010):

$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2 \quad (2.3)$$

$$n_2 - n_0 = C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1 \quad (2.4)$$

Nessa formulação, n_0 designa o índice de refração do material no vácuo, enquanto n_1 e n_2 representam os índices de refração referentes às ondas que se propagam pelo meio anisotrópico. Os termos σ_1 e σ_2 , cujas unidades são dadas em Pascal (Pa), correspondem às tensões principais máxima e mínima, nessa ordem. Por sua vez, C_1 e C_2 referem-se às constantes fotoelásticas, que são propriedades inerentes ao material avaliado para um comprimento de onda (λ) específico. A partir da combinação dessas equações, obtém-se a seguinte relação:

$$n_1 - n_2 = C \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.5)$$

Considerando um modelo confeccionado em material fotoelástico que possui uma espessura h , as tensões principais atuantes na peça podem ser determinadas por meio da seguinte expressão:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{(f_\sigma \cdot N)}{h} \quad (2.6)$$

Nessa relação, a variável N recebe a denominação de ordem de franja. Esse parâmetro indica a sequência de surgimento do fenômeno óptico, conhecido como franja isocromática, o qual é contabilizado progressivamente através de valores numéricos inteiros (1, 2, 3, e assim sucessivamente).

Conhecido como constante óptica, o parâmetro f_σ tem a função de mensurar o valor de tensão correspondente a uma determinada franja isocromática. Trata-se de uma

propriedade intrínseca do material analisado, servindo como um indicador do seu nível de rigidez (ARAÚJO, 2006).

De maneira equivalente, é possível estabelecer uma formulação matemática destinada a calcular a diferença entre as deformações principais atuantes no material:

$$\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2\right) = \frac{\left(f_{\varepsilon} \cdot N\right)}{h} \quad (2.7)$$

onde f_{ε} é a constante óptica em termos da deformação.

2.6 POLARISCÓPIO

O equipamento projetado especificamente para a condução de ensaios fotoelásticos recebe o nome de polariscópio. Sua montagem consiste em um arranjo de componentes ópticos cuja finalidade é emitir e guiar a luz polarizada. No que tange à avaliação do estado de tensões por meio desse fenômeno, a literatura destaca o emprego de duas configurações principais do aparelho: o polariscópio plano e o polariscópio circular (DALLY; RILEY, 1991). A utilização desse instrumento viabiliza a investigação aprofundada das características ópticas de corpos tensionados. Consequentemente, a sua capacidade de quantificar a defasagem entre as ondas luminosas fornece informações essenciais a respeito da resposta mecânica e estrutural dos materiais fotoelásticos frente à aplicação de esforços.

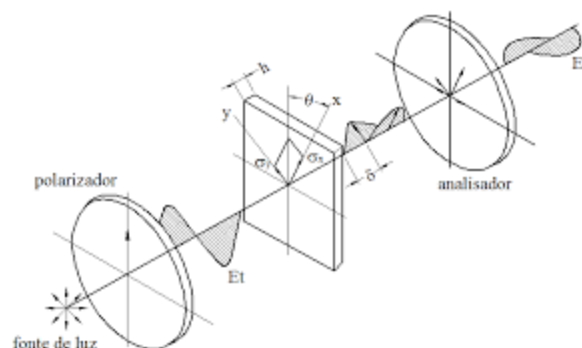
2.7 POLARISCÓPIO DE TRANSMISSÃO PLANA

O polariscópio de transmissão plana, conforme ilustrado na Figura 2.3, representa a configuração mais elementar desse tipo de instrumento óptico. Sua estrutura básica é composta por uma fonte luminosa direcional e um par de lentes polarizadoras (FERREIRA JUNIOR, 2003). Dependendo do objetivo da análise, a iluminação empregada pode ser de luz branca ou monocromática, o que influenciará diretamente no tipo de padrão visual gerado pelo material.

Nesse sistema, o primeiro filtro posicionado após a fonte de luz atua como o polarizador propriamente dito, enquanto o segundo componente óptico assume a função de analisador. O modelo fotoelástico que será submetido aos esforços mecânicos deve ser obrigatoriamente posicionado no espaço intermediário entre essas duas lentes.

Durante a montagem e calibração do equipamento, o filtro analisador é rotacionado de modo que o seu eixo de polarização fique estritamente perpendicular ao eixo do polarizador inicial. Essa disposição, conhecida na óptica como arranjo de campo escuro, bloqueia a passagem da radiação luminosa quando não há um modelo tensionado no sistema, resultando em uma intensidade de luz emergente nula (HENDRY, 1966). É exatamente esse bloqueio prévio que garante o contraste necessário para que as franjas de tensão se destaquem visualmente assim que o material começa a ser deformado.

Figura 2.3: Polariscópio de Transmissão Plana



Fonte: Modificado de Measurements Group, (1981)

Ao empregar luz branca polarizada em um polariscópio para analisar um modelo tensionado, constata-se a formação de padrões coloridos definidos como franjas isocromáticas. Esse efeito visual decorre da interação da luz branca com a deformação: a defasagem óptica gerada no material anula determinados comprimentos de onda por interferência destrutiva, permitindo que o observador visualize apenas as cores complementares. Geometricamente, essas franjas mapeiam todos os pontos da peça que estão submetidos a uma mesma diferença de tensões principais.

Em contrapartida, existem regiões no modelo onde os eixos de direção das tensões principais se alinham com exatidão aos eixos ortogonais dos filtros polarizador e analisador. Nesses locais, o plano de vibração da luz não sofre rotação ao passar pelo material, resultando em um bloqueio total dessa radiação ao encontrar o filtro analisador cruzado. Isso provoca o surgimento de faixas escuras denominadas franjas isoclínicas, cuja função é indicar a direção exata em que as tensões principais estão atuando ao longo da estrutura.

Do ponto de vista óptico, o mecanismo que fundamenta a formação de ambos os fenômenos ocorre quando o feixe luminoso adentra o material fotoelástico e sofre uma separação, dividindo-se em duas ondas que oscilam em planos mutuamente perpendiculares (acompanhando os eixos das tensões principais). À medida que interagem com a estrutura interna tensionada, essas frentes de onda passam a se propagar com velocidades distintas. Essa diferença de velocidade culmina em um atraso relativo, ou seja, uma diferença de fase, entre os feixes no instante em que emergem da peça (BICALHO, 2003).

A partir da compreensão e modelagem matemática desse comportamento óptico, a intensidade da luz emergente que consegue ser transmitida na saída de um polariscópio de transmissão plano é descrita pela seguinte expressão:

$$I = \text{sen}^2\left(\frac{\pi \cdot \delta}{\lambda}\right) \quad (2.8)$$

Na referida equação, o parâmetro λ denota o comprimento de onda da radiação luminosa utilizada, ao passo que δ simboliza a diferença de fase gerada entre os feixes.

Sempre que a diferença de fase atingir um valor correspondente a um múltiplo inteiro do comprimento de onda, relação expressa por $\delta = N\lambda$, em que $N = 0, 1, 2, 3$, ocorrerá o fenômeno de extinção da luz. As áreas do corpo fotoelástico que compartilharem essa mesma defasagem óptica apresentarão uma tonalidade idêntica. Esse agrupamento visual dá origem às franjas isocromáticas, funcionando como um mapa onde cada faixa formada traduz um determinado estado de tensão presente no interior da peça.

Caso o ensaio seja conduzido utilizando luz branca, esses padrões isocromáticos manifestar-se-ão de forma multicolorida. Esse comportamento deve-se ao fato de que o atraso

óptico anula apenas o comprimento de onda correspondente a uma cor específica por vez. Com a supressão dessa parcela do espectro visível por interferência destrutiva, a região em questão passa a exibir a mistura das ondas restantes, revelando o que a óptica denomina como cor complementar.

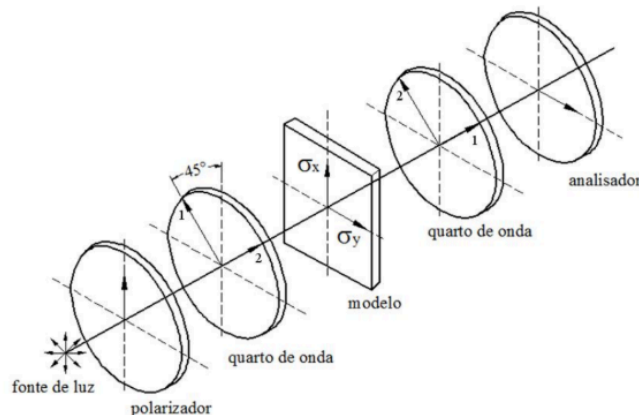
2.8 POLARISCÓPIO DE TRANSMISSÃO CIRCULAR

O arranjo do polariscópio de transmissão circular, ilustrado na Figura 2.4, constitui-se de quatro componentes ópticos essenciais. Na prática, essa configuração é estruturada a partir de um polariscópio plano, mediante a adição de duas lâminas de atraso de um quarto de onda ($\lambda/4$). Para garantir o comportamento óptico desejado, essas placas devem ser instaladas de modo que seus eixos principais formem um ângulo exato de 45° em relação aos eixos dos filtros polarizador e analisador.

A dinâmica luminosa nesse equipamento assemelha-se, no início, à do modelo plano: o feixe emitido pela fonte passa pelo primeiro filtro (polarizador), adquirindo uma polarização plana. A distinção ocorre no passo seguinte, quando essa radiação incide sobre a primeira placa de um quarto de onda, alterando seu estado para luz polarizada circularmente. Após atravessar o modelo sob tensão e alcançar a segunda lâmina de um quarto de onda (o terceiro componente do sistema), a radiação retoma a sua condição de luz plano-polarizada. Por fim, o feixe atinge o filtro analisador, que atua como o último estágio do conjunto e desempenha a função de extinguir a luz com base na sua orientação.

A grande vantagem operacional na adoção do polariscópio circular reside na sua capacidade de suprimir opticamente as franjas isoclínicas. Com o desaparecimento dessas faixas que indicam a direção, o observador passa a visualizar exclusivamente as franjas isocromáticas, o que proporciona um mapeamento do campo de tensões significativamente mais nítido e isento de sobreposições ou interferências visuais (FAKHOURI, 2008).

Figura 2.4: Polariscópio de Transmissão Circular



Fonte: Modificado de Measurements Group, (1981)

2.9 PADRÃO DE FRANJAS

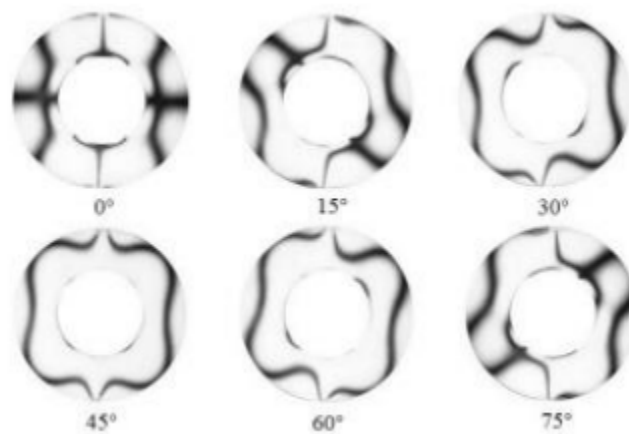
Durante a condução de uma análise fotoelástica com o emprego de luz branca, o pesquisador observa simultaneamente a formação de dois padrões distintos de interferência óptica: as franjas isoclínicas e as franjas isocromáticas. A distinção visual entre esses dois fenômenos é bastante nítida e direta no polariscópio plano, visto que as isoclínicas manifestam-se estritamente como faixas escuras, enquanto as isocromáticas exibem um espectro de cores que reflete a magnitude dos esforços.

Do ponto de vista mecânico e geométrico, as franjas isoclínicas representam o lugar geométrico de todos os pontos do modelo nos quais a direção das tensões principais coincide perfeitamente com os eixos de transmissão dos filtros polarizador e analisador. Nesses locais específicos, a luz não sofre a defasagem decorrente da dupla refração e, conseqüentemente, é totalmente bloqueada pelo filtro analisador cruzado, resultando na formação de faixas negras de completa extinção luminosa (SCHIAVON, 2010).

Essas faixas escuras desempenham um papel fundamental no mapeamento do campo de tensões, pois fornecem a orientação das forças internas. Para construir uma imagem completa das direções principais ao longo de toda a peça, adota-se o procedimento de rotacionar o conjunto polarizador-analisador de forma sincronizada, mantendo-os sempre cruzados a 90° entre si, em pequenos incrementos angulares.

À medida que os eixos dos filtros são girados, as franjas isocromáticas permanecem estáticas (pois a magnitude da tensão não muda), mas as franjas isoclínicas deslocam-se pela superfície do material. O registro dessas isoclínicas em vários ângulos permite que o projetista trace as trajetórias de tensões (também conhecidas como isostáticas), mapeando o fluxo das cargas na estrutura. A Figura 2.5 ilustra de forma prática essa varredura direcional, apresentando os variados padrões de isoclínicas que se formam em um anel quando este é submetido a cargas de compressão.

Figura 2.5: Padrão de isoclínicas em anel sob compressão



Fonte: Measurements Group (1981).

Além do mapeamento global, as franjas isoclínicas apresentam grande utilidade na identificação das direções das tensões principais em pontos isolados e específicos do modelo. Para realizar essa medição, o operador rotaciona o conjunto de lentes polarizadoras de forma simultânea até que uma faixa isoclínica cruze exatamente o ponto de interesse. O ângulo registrado no equipamento no instante dessa interceptação recebe a denominação de parâmetro da isoclínica, consistindo na medida exata que define a inclinação dos eixos principais de tensão naquele local (SCHIAVON, 2010).

No que diz respeito às franjas isocromáticas, a diversidade de cores observadas reflete as variações na diferença de fase entre os vetores da luz que deixam o corpo fotoelástico. Como cada tonalidade está atrelada à extinção de um comprimento de onda particular, a

interpretação desse padrão visual fornece dados diretos sobre a distribuição de cargas: uma quantidade elevada de franjas indica uma alta magnitude de esforços, enquanto a grande proximidade física entre elas evidencia as áreas de maior concentração de tensões na estrutura (FRENCH et al., 1989).

Conforme as franjas isocromáticas vão se manifestando e evoluindo durante a progressão do carregamento mecânico, atribui-se a cada padrão de coloração um respectivo valor numérico, definido como ordem de franja (N).

Ao se utilizar a luz branca como fonte iluminadora do polariscópio, a sequência de cores captada através do filtro analisador segue um comportamento padronizado, exibindo tonalidades características e amplamente documentadas na literatura (BERNARDES et al., 2003).

Nesse contexto óptico, as franjas classificadas como de ordem zero destacam-se com facilidade por apresentarem uma coloração estritamente negra, indicando locais sem diferença de tensões principais. A fim de ilustrar essa correlação de forma prática, a Tabela 2.1 sistematiza a correspondência entre a variação da diferença de fase, os valores das ordens de franja e as suas respectivas cores resultantes dentro do espectro visível.

Tabela 2.1: Relação de Diferença de Fase e Ordens de Franja das Cores

Cor Resultante	Diferença de fase δ (nm)	Ordem de franja (N)
Preto	0	0,00
Cinza	160	0,28
Branco	260	0,45
Amarelo	345	0,60
Laranja	460	0,80
Vermelho	520	0,90
Roxo	575	1,00
Azul	620	1,08

Laranja	935	1,63
Rosa	1035	1,82
Violeta	1150	2,00
Verde	1350	2,35

Fonte: Ferreira e Bermudes (2004)

Uma característica inerente às franjas isocromáticas é a impossibilidade de se interceptar, garantindo que o valor numérico da ordem e a magnitude da tensão se mantenham rigorosamente constantes por toda a extensão de uma mesma faixa. O surgimento desses padrões ópticos obedece a uma progressão espacial contínua. Portanto, caso o observador identifique uma franja de primeira ordem e outra de terceira ordem, a isocromática correspondente à segunda ordem estará obrigatoriamente localizada no espaço intermediário entre elas (FLEURY, 2001).

A partir da determinação correta da ordem de franja no ponto de interesse, torna-se possível calcular a diferença entre as tensões principais por meio da lei óptica das tensões , através da equação:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{(f_\sigma \cdot N)}{h} \quad (2.9)$$

2.10 CALIBRAÇÃO

A fim de assegurar a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos por meio da técnica fotoelástica, é imprescindível realizar a calibração prévia da constante óptica do material, representada por f_σ . A determinação empírica desse parâmetro antes dos ensaios definitivos faz-se necessária porque a rigidez óptica das resinas não é uma propriedade estática; ela pode sofrer variações significativas em função de fatores externos e temporais, tais como a flutuação da temperatura no ambiente de laboratório e o próprio envelhecimento (tempo de cura) do polímero utilizado (FLEURY, 2001).

Embora a aferição prática seja a conduta ideal, a literatura científica já dispõe de valores de referência para a constante óptica f_{σ} de diversos materiais fotoelásticos comerciais. Tais referenciais encontram-se tabelados e amplamente documentados em pesquisas da área, podendo ser consultados nos trabalhos de Gomes (1984) e Araújo, Neves e Bernardes (2004), entre outros autores.

Para a execução da calibração, o procedimento exige a adoção de um corpo de prova de geometria simples, que facilita não apenas a sua usinagem, mas também o posicionamento e a aplicação controlada das cargas no polariscópio. É um requisito obrigatório que o modelo de calibração possua uma solução analítica teórica exata e já conhecida para o seu estado de tensões. Na prática, adota-se frequentemente o ensaio de um disco circular submetido à compressão diametral ou o de uma viga reta sob flexão pura, podendo-se também recorrer a outras técnicas consolidadas de análise de tensões para validar o carregamento.

O ensaio físico é conduzido de forma incremental: aplicam-se cargas na peça em estágios progressivos. Para cada patamar de carga atingido, o pesquisador deve registrar rigorosamente a magnitude do esforço exercido pela máquina e fotografar o padrão de franjas isocromáticas resultante.

A partir dessas imagens, extrai-se o valor numérico da ordem de franja no ponto de interesse do modelo (como o centro do disco, por exemplo). Com esses pares de dados em mãos, carga aplicada e ordem de franja, constrói-se uma relação linear (geralmente um gráfico). A inclinação dessa reta, aliada à espessura do material e às formulações teóricas, permite o cálculo exato da constante óptica f_{σ} atualizada do material, garantindo a calibração do sistema para que as medições em modelos complexos sejam interpretadas com exatidão.

Quando a calibração é realizada por meio de uma viga retangular submetida à flexão, a constante óptica do material pode ser obtida a partir da associação entre a tensão máxima de flexão e a lei óptica das tensões. Para uma viga simplesmente apoiada, submetida a uma carga concentrada no centro do vão, a tensão normal máxima na borda extrema da seção transversal pode ser relacionada à ordem de franja observada no ensaio fotoelástico.

Considerando a lei óptica das tensões (Equação 2.9) e a tensão máxima de flexão para uma viga retangular sob carregamento central, a constante óptica do material pode ser isolada conforme:

$$f_{\sigma} = \frac{3 * F * L}{2 * N * H^2} \quad (2.10)$$

No qual f_{σ} representa a constante óptica do material, F é a força transversal concentrada aplicada no centro da viga, L é a distância entre os apoios, N é a ordem de franja observada na borda extrema da seção transversal e H é a altura da seção transversal da viga. Dessa forma, a calibração permite determinar experimentalmente a constante óptica do material utilizado, tornando possível converter as ordens de franja observadas em diferença entre tensões principais.

2.11 MATERIAIS FOTOELÁSTICOS

A escolha e a compreensão das características intrínsecas de um material fotoelástico representam etapas determinantes para o sucesso da análise. O rigor na seleção dessas propriedades é o que assegura a confiabilidade dos dados obtidos, viabilizando um mapeamento exato e minucioso do campo de tensões e deformações atuante na estrutura simulada (ARAÚJO, 2006).

Para que um polímero seja considerado viável para essa aplicação, ele deve atender a uma série de rigorosos requisitos ópticos e mecânicos. Primeiramente, é indispensável que o material apresente excelente transparência em relação à fonte luminosa do polariscópio, permitindo a propagação do feixe sem dispersão. No âmbito mecânico, exige-se que o corpo de prova manifeste alta sensibilidade óptica frente aos esforços e possua um comportamento perfeitamente elástico. Isso significa que, durante o ensaio, a peça deve operar dentro do regime elástico linear (obedecendo à Lei de Hooke), resultando em um gráfico de tensão-deformação representado por uma reta. Essa linearidade mecânica é fundamental para garantir que a correspondência entre a ordem de franja observada e o nível de tensão interna se mantenha diretamente proporcional.

Do ponto de vista operacional e de estabilidade, o modelo ideal requer que sua constante óptica não sofra flutuações bruscas diante de variações térmicas no ambiente. Outro fator crítico é a resistência ao chamado efeito de borda, um fenômeno indesejado, frequentemente causado pela absorção de umidade do ar ambiente, que altera o estado de

tensões nas extremidades da peça ao longo do tempo e mascara os resultados reais. Adicionalmente, o polímero deve oferecer boa usinabilidade e facilidade de manufatura, permitindo a fabricação de geometrias complexas sem a introdução de tensões residuais (esforços que ficam presos no material após o corte ou a cura). Aliado a essas exigências técnicas, busca-se também que o material possua um baixo custo financeiro (DALLY; RILEY, 1991).

Levando em consideração essa vasta lista de exigências para atender adequadamente ao método, a engenharia isolou alguns compostos como ideais. Segundo Gomes (1984), a gama de materiais mais frequentemente empregados para a realização da técnica de fotoelasticidade engloba o Bakelite, a borracha de poliuretano, o policarbonato, a resina epóxi e a gelatina.

2.12 CONCENTRADORES DE TENSÃO

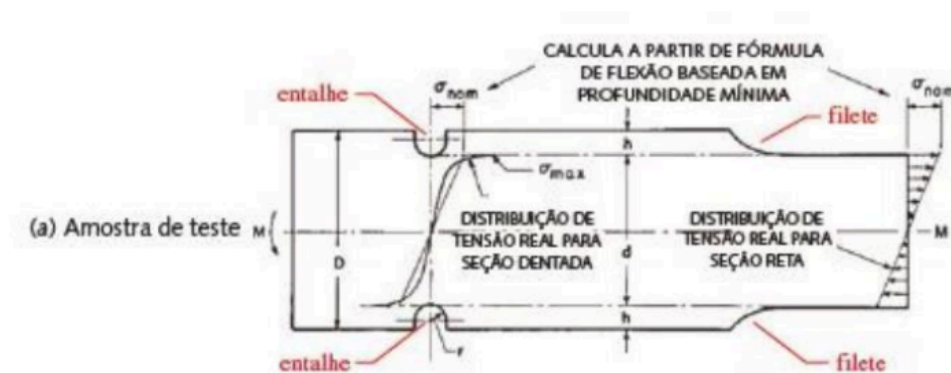
No campo da engenharia, a tensão representa uma grandeza mecânica essencial, definida pela razão entre a força aplicada e a área sobre a qual ela incide. Frequentemente quantificada em unidades como o megapascal (MPa) ou libras por polegada quadrada (psi), essa medida atua como um parâmetro indispensável para prever e compreender a resposta física dos materiais quando submetidos a carregamentos externos.

Durante a concepção de um projeto mecânico, o projetista deve ponderar uma série de critérios fundamentais, englobando a funcionalidade, o custo de manufatura, a confiabilidade e, sobretudo, a segurança operacional da estrutura. Em todos esses aspectos, nota-se a forte influência dos chamados concentradores de tensão, elementos que se destacam na literatura como uma das principais origens de falhas e rupturas em componentes de máquinas (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

O fluxo de tensões no interior de um elemento submetido a esforços distribui-se de maneira uniforme apenas se a peça mantiver uma seção transversal constante ao longo de sua extensão. Qualquer descontinuidade ou alteração geométrica brusca na estrutura — tais como a presença de furos, ranhuras, rasgos de chaveta ou transições abruptas de diâmetro — interrompe a linearidade desse fluxo, originando zonas localizadas de alta concentração de tensão (NORTON, 2013).

A presença dessas áreas críticas eleva substancialmente o risco de colapso do mecanismo sob carga. Isso acontece porque o efeito concentrador amplifica as forças locais, fazendo com que a tensão efetiva naquela pequena região ultrapasse facilmente o limite de escoamento do material estabelecido no dimensionamento teórico, culminando na falha prematura da peça. Para exemplificar o comportamento do fluxo de forças nessas condições, a Figura 2.6 apresenta a ilustração de uma barra dotada de entalhes que se encontra sujeita à ação de um momento fletor.

Figura 2.6: Barra plana sobre momento fletor



Fonte: NORTON (2013).

Por meio do método fotoelástico, torna-se viável a observação direta das zonas com elevada concentração de esforços. Essas regiões críticas situam-se justamente nos pontos em que ocorrem alterações na geometria da barra estrutural, fenômeno que é evidenciado opticamente pelo adensamento das franjas isocromáticas, conforme ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7: Análise fotoelástica da barra plana



Fonte: NORTON (2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE FLEXÃO

Para a realização deste trabalho foram empregados materiais e procedimentos voltados tanto para a adaptação estrutural do polariscópio quanto para sua instrumentação. O foco principal esteve na implementação de um sistema de medição da força aplicada à amostra, visando permitir análises quantitativas da técnica da fotoelasticidade.

A instrumentação do sistema foi realizada a partir da adaptação de uma balança digital de cozinha (modelo Ecos Houseware). O equipamento foi desmontado com o intuito de reaproveitar o circuito eletrônico original, incluindo o sistema de cabeamento e o mostrador digital (display). A célula de carga original foi extraída e acoplada mecanicamente à estrutura do polariscópio. Essa configuração permitiu a medição direta e em tempo real da carga aplicada sobre os corpos de prova fotoelásticos.

Figura 3.1: Bancada com o display da balança

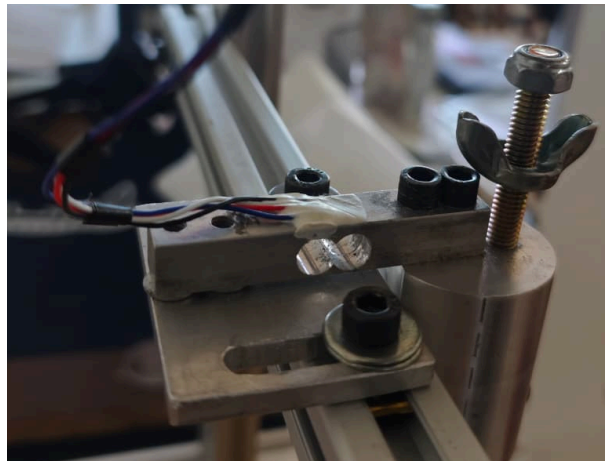


Fonte: Autor próprio

A célula de carga foi instalada na estrutura do polariscópio sob a configuração mecânica de viga em balanço (engastada-livre). Uma de suas extremidades foi fixada rigidamente ao perfil de alumínio do equipamento, atuando como ponto de apoio. Na extremidade oposta (livre), acoplou-se um mecanismo de fuso roscado a um cilindro de contato, sistema responsável por transmitir a carga de compressão ao corpo de prova

fotoelástico. Durante a operação, a força de reação gerada pela amostra provoca uma microflexão na região central da célula de carga. Essa deformação mecânica é detectada pelos extensômetros (*strain gauges*) integrados à barra, permitindo que a placa eletrônica quantifique a força aplicada em tempo real.

Figura 3.2: Detalhes das conexões



Fonte: Autor próprio

Como o visor da balança suspensa fornece as leituras em unidades de massa (gramas ou quilogramas), fez-se necessária a conversão dos valores experimentais para unidades de força (Newtons), adequando os resultados ao Sistema Internacional de Unidades (SI). A força transversal aplicada (F) foi calculada multiplicando-se a massa lida no instrumento (m) pela aceleração da gravidade (g), conforme descrito na equação:

$$F = m \cdot g \quad (3.1)$$

onde,

F = Força transversal concentrada aplicada ao corpo de prova, expressa em Newtons (N);

m = Massa registrada pela balança, expressa em quilogramas (kg);

g = Aceleração da gravidade, adotando-se para os cálculos o valor padrão de $9,81 \frac{m}{s^2}$;

3.2 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO (POLARISCÓPIO CIRCULAR)

Após a estruturação do arranjo mecânico de flexão, procedeu-se à configuração do arranjo óptico necessário para a análise de tensões do corpo de prova. Para isso, adotou-se o método da fotoelasticidade de transmissão, implementando-se um polariscópio circular ao redor da bancada de ensaio.

A montagem do sistema óptico foi realizada utilizando lentes CPL (Filtros Polarizadores Circulares). A adoção dessas lentes é justificada pelo fato de possuírem, em sua composição, uma camada de atraso de quarto de onda acoplada ao elemento polarizador linear.

O uso da configuração circular é de extrema importância para os objetivos deste ensaio. Enquanto um polariscópio linear tradicional exhibe simultaneamente as franjas isoclínicas (que indicam as direções das tensões) e as isocromáticas, o polariscópio circular atua na eliminação do efeito das isoclínicas. Consequentemente, o sistema permite isolar e visualizar de maneira nítida apenas as franjas isocromáticas, que são as linhas de contorno responsáveis por representar a diferença entre as tensões principais atuantes na viga.

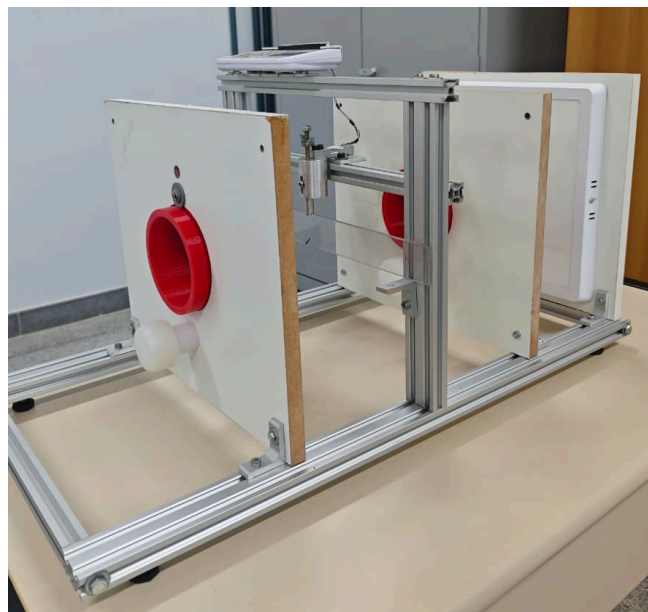
O arranjo foi disposto sequencialmente da seguinte forma: uma fonte de luz difusa, o primeiro conjunto de lente CPL (atuando como polarizador), o corpo de prova submetido à flexão, o segundo conjunto de lente CPL (atuando como analisador) e, por fim, o equipamento de captura de imagem.

Com o sistema devidamente alinhado e a carga concentrada aplicada e estabilizada, realizou-se a captura das imagens experimentais utilizando-se um smartphone modelo Poco F7 Pro fixado em tripé fotográfico. A câmera foi posicionada frontalmente ao corpo de prova, buscando manter constantes a distância, a angulação e o enquadramento entre os registros. Esse procedimento teve como objetivo garantir maior repetibilidade das imagens e reduzir efeitos de paralaxe, variações de perspectiva e deslocamentos durante a aquisição dos padrões de franjas isocromáticas. As condições de iluminação e o posicionamento da câmera foram mantidos constantes para garantir a fidelidade dos registros. As imagens reais capturadas

nesta etapa compõem a base de dados que será posteriormente submetida ao algoritmo de processamento e correlação digital.

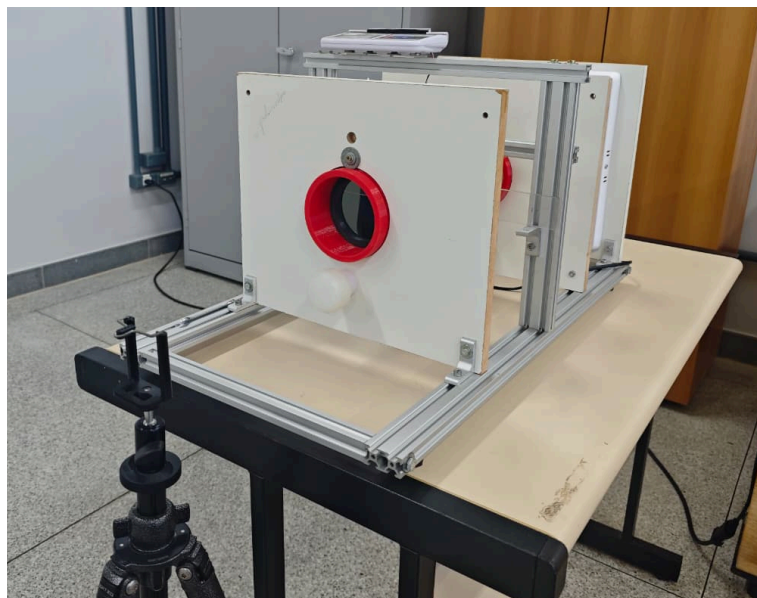
Para ilustrar a disposição dos componentes ópticos em relação à bancada mecânica, a Figura 3.3 apresenta o esquema do polariscópio circular utilizado e a Figura 3.4 detalha o arranjo de fixação adotado para a captura das imagens. Conforme ilustrado, o equipamento fotográfico foi estabilizado com o auxílio de um tripé, garantindo o alinhamento ortogonal em relação ao conjunto óptico. Essa configuração metodológica foi empregada para assegurar que todas as fotografias fossem registradas sob a mesma angulação, distância e enquadramento. A padronização espacial da captura é fundamental para evitar erros de paralaxe e distorções de perspectiva, garantindo a confiabilidade e a repetibilidade geométrica necessárias para o posterior processamento digital das franjas observadas.

Figura 3.3: Polariscópio circular utilizado



Fonte: Autor próprio

Figura 3.4: Posicionamento do equipamento fotográfico com auxílio de tripé para padronização da captura de imagens



Fonte: Autor próprio

3.2.1 Identificação e orientação das lentes CPL

Como as lentes CPL utilizadas não são elementos ópticos simétricos, foi necessário identificar previamente a orientação correta de cada componente antes da montagem no polariscópio. Esse tipo de lente é constituído por um polarizador linear associado a uma lâmina retardadora de um quarto de onda ($\lambda/4$), de modo que a ordem de passagem da luz através desses elementos influencia diretamente o funcionamento do arranjo circular.

A identificação da face polarizadora foi realizada por meio do teste do espelho. Nesse procedimento, a lente CPL foi posicionada diante de uma superfície espelhada e observada em ambos os sentidos. A orientação em que a reflexão apresentou maior escurecimento foi utilizada como referência para identificar a face correspondente ao polarizador linear, uma vez que, nessa condição, a luz atravessa inicialmente o polarizador, passa pela lâmina de $1/4$ de onda, reflete no espelho e retorna com alteração no estado de polarização, sendo parcialmente bloqueada no caminho inverso. A partir dessa verificação, as faces das lentes foram marcadas para garantir a repetibilidade da montagem.

Após a identificação das faces, as lentes CPL foram posicionadas de modo a reproduzir a sequência óptica de um polariscópio circular de transmissão. No primeiro conjunto óptico, localizado entre a fonte de luz e o corpo de prova, a face polarizadora da lente foi orientada para a fonte luminosa, enquanto a face correspondente à lâmina de $1/4$ de onda foi voltada para o corpo de prova. Dessa forma, a luz inicialmente não polarizada foi convertida em luz linearmente polarizada e, em seguida, em luz circularmente polarizada antes de atravessar o material fotoelástico.

No segundo conjunto óptico, localizado após o corpo de prova, a lente CPL foi posicionada em sentido inverso. Assim, a face correspondente à lâmina de $1/4$ de onda ficou voltada para o corpo de prova, enquanto a face polarizadora, atuando como analisador, foi orientada para a câmera. Essa configuração permitiu que a luz emergente do corpo de prova fosse novamente convertida para uma condição analisável pelo polarizador final, possibilitando a visualização predominante das franjas isocromáticas e a redução da interferência das franjas isoclínicas.

Após a montagem física dos componentes, o alinhamento angular do analisador foi ajustado experimentalmente por rotação até se obter a condição de maior contraste visual das franjas. Esse procedimento foi realizado sem alteração da posição da câmera e da fonte luminosa, garantindo que as imagens fossem registradas sob as mesmas condições de iluminação, distância e enquadramento. A padronização da montagem foi necessária para assegurar a confiabilidade das imagens posteriormente utilizadas no processamento digital e na comparação com os resultados numéricos.

3.2.2 Aquisição e padronização das imagens experimentais

A aquisição das imagens experimentais foi realizada utilizando-se um smartphone modelo Poco F7 Pro, fixado em um tripé fotográfico posicionado frontalmente ao corpo de prova. O uso do tripé teve como objetivo garantir a estabilidade da câmera durante os registros, reduzindo deslocamentos, inclinações e variações de enquadramento entre as diferentes capturas.

Durante os ensaios, buscou-se manter constantes a posição da câmera, a distância em relação ao corpo de prova, a orientação frontal ao plano da amostra e as condições de

iluminação do polariscópio. Esse procedimento foi adotado para minimizar efeitos de paralaxe, distorções de perspectiva e variações artificiais de brilho ou contraste, fatores que poderiam comprometer a comparação posterior entre as imagens experimentais e os campos de tensão obtidos por simulação numérica.

As fotografias foram registradas após a estabilização da carga aplicada ao corpo de prova, de modo que o padrão de franjas observado correspondesse ao estado de carregamento analisado. A padronização da captura foi necessária para garantir que as imagens apresentassem condições geométricas semelhantes antes de serem submetidas ao redimensionamento e ao processamento digital por meio do algoritmo desenvolvido em Python.

3.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Para fundamentar a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e a distribuição teórica de tensões, foi desenvolvido um modelo numérico computacional no Autodesk Inventor. A simulação teve como finalidade reproduzir, em ambiente virtual, as mesmas condições geométricas e de carregamento aplicadas aos corpos de prova ensaiados na bancada fotoelástica.

O modelo tridimensional das vigas foi construído no ambiente CAD do software, respeitando as dimensões nominais dos corpos de prova utilizados nos ensaios. Após a construção da geometria, foram atribuídas as propriedades mecânicas do material, definidas as condições de contorno, aplicado o carregamento correspondente ao ensaio físico e gerada a malha de elementos finitos para a resolução numérica do problema.

3.3.1 Definição do material e propriedades mecânicas

Após a modelagem geométrica dos corpos de prova, foi realizada a atribuição do material no ambiente de simulação do Autodesk Inventor. O material selecionado foi o policarbonato, escolhido diretamente a partir da biblioteca interna do software, com o objetivo de representar o mesmo material utilizado nos corpos de prova experimentais.

A adoção do material disponível na biblioteca do Autodesk Inventor permite que a simulação seja replicada por outros usuários, desde que sejam utilizados os mesmos parâmetros mecânicos. Como o ensaio foi conduzido no regime elástico, o comportamento do material foi considerado linear, homogêneo e isotrópico. Dessa forma, os principais parâmetros empregados na análise estrutural foram o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a densidade do material.

Os valores adotados pelo software para o policarbonato estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do policarbonato adotadas na simulação numérica.

Propriedade	Valor adotado no Autodesk	Inventor Unidade
Módulo de Young	2,275	GPa
Coeficiente de Poisson	0,42	-
Módulo de cisalhamento	786,000	MPa
Densidade	1,200	g/cm ³
Resistência ao escoamento	62,010	MPa
Resistência à tração	68,900	MPa

Fonte: Adaptado da biblioteca de materiais do Autodesk Inventor.

Dentre essas propriedades, o módulo de Young e o coeficiente de Poisson são os parâmetros de maior influência na resposta estrutural elástica, pois definem, respectivamente, a rigidez longitudinal do material e a relação entre as deformações transversal e longitudinal. A densidade também foi mantida conforme a biblioteca do software, enquanto os valores de resistência ao escoamento e resistência à tração foram preservados como referência do limite resistente do material. Assim, a simulação foi realizada com os parâmetros originais fornecidos pelo Autodesk Inventor para o policarbonato transparente, garantindo maior rastreabilidade e reprodutibilidade do modelo numérico.

3.3.2 Condições de contorno e carregamento

As condições de contorno foram definidas com o objetivo de reproduzir, no ambiente numérico do Autodesk Inventor, o ensaio de flexão realizado experimentalmente na bancada

fotoelástica. O corpo de prova foi modelado como uma viga submetida a carregamento transversal concentrado, aplicado na região central da face superior, enquanto os apoios foram posicionados nas regiões inferiores correspondentes aos pontos de contato da bancada.

No sistema de coordenadas adotado pelo Autodesk Inventor, o eixo longitudinal da viga foi associado ao comprimento do corpo de prova, enquanto o eixo vertical foi utilizado como referência para a aplicação do carregamento e para a restrição dos deslocamentos nos apoios. A força foi aplicada no centro da face superior da viga, com sentido vertical descendente, reproduzindo a atuação do aplicador de carga utilizado no ensaio físico.

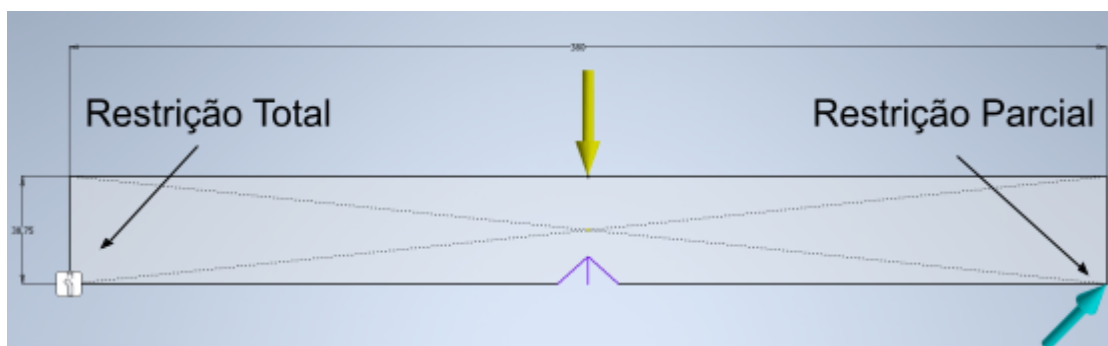
Para representar os apoios da bancada, foram aplicadas duas restrições distintas. No primeiro apoio, adotou-se uma restrição fixa total em uma das arestas inferiores do corpo de prova, com o objetivo de impedir os deslocamentos naquela região e eliminar movimentos de corpo rígido durante a solução numérica. Esse apoio foi utilizado como referência global do modelo.

No segundo apoio, localizado na extremidade oposta, utilizou-se uma restrição fixa parcial, ativando-se a opção de componentes de vetor e restringindo apenas o deslocamento vertical, com valor igual a 0 mm. Dessa forma, o apoio impediu o deslocamento vertical da viga, mas permitiu a acomodação longitudinal do corpo de prova durante a flexão. Essa configuração aproxima o comportamento de um apoio móvel ou rolete, reduzindo o risco de super-restrição do modelo numérico.

A adoção de um apoio fixo e um apoio móvel é necessária para representar adequadamente o ensaio de flexão, pois impede o movimento global da peça sem bloquear artificialmente as deformações decorrentes do carregamento. Caso ambos os apoios fossem totalmente fixados, o modelo poderia apresentar um comportamento mais rígido do que o observado experimentalmente, alterando a distribuição de tensões. Por outro lado, caso os apoios restringissem apenas o deslocamento vertical sem uma referência fixa, o modelo poderia apresentar instabilidade numérica por movimento de corpo rígido.

A magnitude da força aplicada foi definida a partir da leitura experimental obtida pela balança digital acoplada ao sistema de carregamento. Como o display da balança fornece valores de massa, os dados foram convertidos para força por meio da relação $F = m \cdot g$, adotando-se $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Assim, cada simulação foi configurada com o mesmo carregamento correspondente ao respectivo ensaio experimental. Conforme a figura 3.5.

Figura 3.5: Condições de contorno



Fonte: Autor próprio

3.3.3 Geração da malha e critério de convergência

Após a definição do material, das condições de contorno e do carregamento, realizou-se a discretização do modelo por meio da geração da malha de elementos finitos no Autodesk Inventor. A malha tem a função de subdividir a geometria contínua do corpo de prova em elementos menores, conectados por nós, permitindo que o software resolva numericamente os campos de deslocamentos, deformações e tensões.

Inicialmente, foi gerada uma malha padrão pelo próprio software. Em seguida, foram realizados refinamentos progressivos, com o objetivo de verificar a influência do tamanho dos elementos nos resultados obtidos. O refinamento foi concentrado principalmente nas regiões de maior interesse mecânico, como o ponto de aplicação da carga, os apoios e a região do entalhe, pois esses locais apresentam maiores gradientes de tensão.

O critério de convergência adotado consistiu em comparar o valor máximo de tensão obtido em cada malha com o valor correspondente da malha imediatamente anterior. O refinamento foi interrompido quando a variação percentual entre duas malhas consecutivas tornou-se inferior a 5%, indicando que o aumento da densidade de elementos não provocava alterações significativas no resultado numérico.

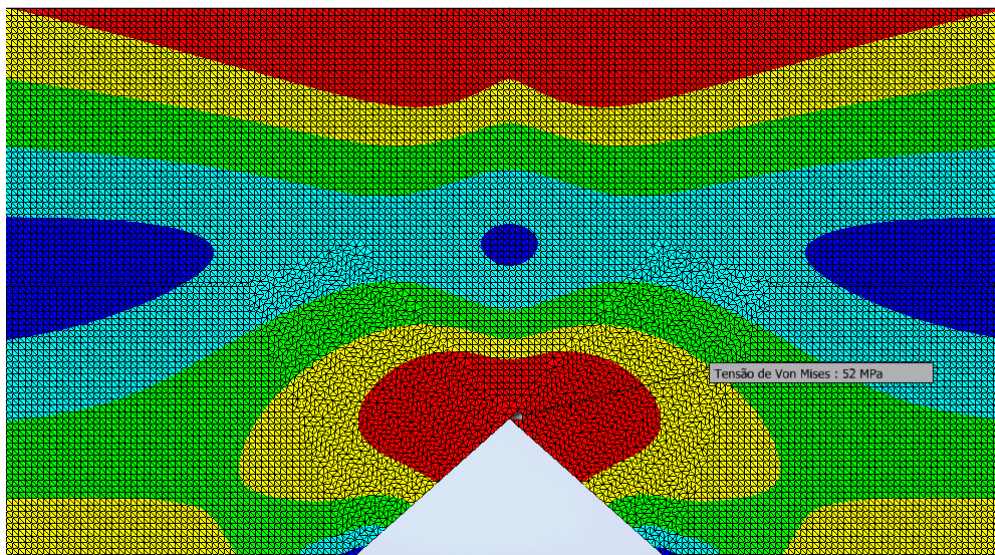
Tabela 3.2: Estudo de convergência da malha.

Tamanho Médio	Nº de elementos	Nº de nós	Tensão Máxima (MPa)	Variação
0,1	228	582	20,38	-
0,05	546	1281	17,99	11,72%
0,025	2080	4486	22,49	28,58%
0,0125	10358	19290	27,71	23,21%
0,00625	59357	100575	34,92	26,02%
0,003125	345706	543137	50,00	43,18%
0,0015625	2744123	3986697	52,20	4,20%

Fonte: Autor próprio

A tensão máxima foi utilizada como parâmetro de acompanhamento da convergência da malha. Entretanto, reconhece-se que regiões próximas ao ponto de aplicação da carga, aos apoios e ao vértice do entalhe podem apresentar elevados gradientes de tensão e sensibilidade ao refinamento local. Dessa forma, a malha final foi adotada por apresentar variação inferior a 5% em relação ao refinamento anterior, sendo considerada adequada para a comparação espacial dos campos de tensão neste estudo.

Figura 3.6: Simulação com 0,0015625 de tamanho médio



Fonte: Autor próprio

3.3.4 Critério de tensão adotado no pós-processamento numérico

Após a definição das propriedades do material, das condições de contorno, do carregamento e da malha, os resultados foram processados no módulo de simulação do Autodesk Inventor. Nessa etapa, fez-se necessária a definição da grandeza escalar de tensão a ser utilizada na geração dos mapas de contorno exportados para posterior comparação com as imagens fotoelásticas.

Do ponto de vista experimental, as franjas isocromáticas observadas na fotoelasticidade estão associadas à diferença entre as tensões principais, $\sigma_1 - \sigma_2$, grandeza que também se relaciona diretamente com a tensão cisalhante máxima por meio da expressão:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right) \quad (3.2)$$

Entretanto, na configuração disponível do módulo de simulação utilizado, o campo de tensão exportado para a comparação visual foi a tensão equivalente de Von Mises. Ressalta-se que a tensão de Von Mises não é, conceitualmente, igual à tensão cisalhante máxima. Para um estado plano de tensões, a tensão equivalente de Von Mises é calculada a partir das tensões principais segundo uma formulação própria, enquanto a tensão cisalhante máxima corresponde à metade da diferença entre essas tensões principais.

Apesar dessa distinção, a utilização da tensão equivalente de Von Mises mostrou-se adequada para a finalidade comparativa deste trabalho, uma vez que os corpos de prova foram analisados em regime elástico linear e submetidos predominantemente à flexão. Nessas condições, especialmente nas regiões de maior concentração de tensão, a distribuição espacial da tensão equivalente de Von Mises tende a apresentar comportamento semelhante ao campo da diferença entre tensões principais indicado pelas franjas isocromáticas.

Dessa forma, o mapa de Von Mises foi adotado como referência numérica aproximada para a comparação da distribuição espacial dos campos de tensão, e não como substituto direto da tensão cisalhante máxima. Assim, as análises realizadas por meio de processamento de imagens, especialmente pelo Índice de Similaridade Estrutural (SSIM), devem ser interpretadas como uma avaliação da correspondência visual e espacial entre os contornos

experimentais e numéricos, e não como uma equivalência absoluta entre os valores escalares das grandezas mecânicas envolvidas.

3.4 PROCESSAMENTO DIGITAL E PADRONIZAÇÃO DIMENSIONAL DAS IMAGENS

Para viabilizar a comparação quantitativa entre os resultados experimentais e os dados obtidos pela simulação numérica computacional, estabelece-se um pré-requisito fundamental: as imagens provenientes de ambas as fontes devem possuir matrizes de pixels com dimensões estritamente idênticas. Discrepâncias na resolução inviabilizam a aplicação de índices de similaridade estrutural, uma vez que a correlação exige o mapeamento direto de coordenada por coordenada.

Visando solucionar essa restrição, desenvolveu-se uma rotina computacional em linguagem Python, executada no ambiente de nuvem Google Colaboratory. O algoritmo foi estruturado utilizando a biblioteca de visão computacional OpenCV, amplamente aplicada no processamento digital de imagens (O código-fonte completo desenvolvido para esta rotina encontra-se detalhado no Apêndice A deste trabalho).

A lógica do processamento inicia-se com a importação da imagem adotada como referência geométrica (neste caso, a imagem gerada pelo software de simulação). O algoritmo realiza a leitura da matriz de pixels e extrai as variáveis de dimensão exatas, mapeando a largura e a altura originais. Em seguida, a imagem alvo — correspondente à fotografia real das franjas isocromáticas capturada no polariscópio circular — é carregada no sistema.

Com as dimensões de referência estabelecidas, a imagem alvo é submetida a uma transformação geométrica bidimensional de redimensionamento (resize). Para garantir que as características físicas do padrão de franjas não sofressem distorções severas ou perda de informação durante a alteração da malha de pixels, aplicou-se o método matemático de interpolação de área (representado no código pelo parâmetro `cv2.INTER_AREA`). Esta técnica é particularmente eficaz, pois realiza a reamostragem considerando a relação das áreas dos pixels, oferecendo resultados livres de padrões de interferência indesejados (efeito *moiré*).

O produto final desta etapa é a exportação de uma nova imagem experimental bidimensional, cujas proporções e tamanho total de arquivo se alinham perfeitamente ao

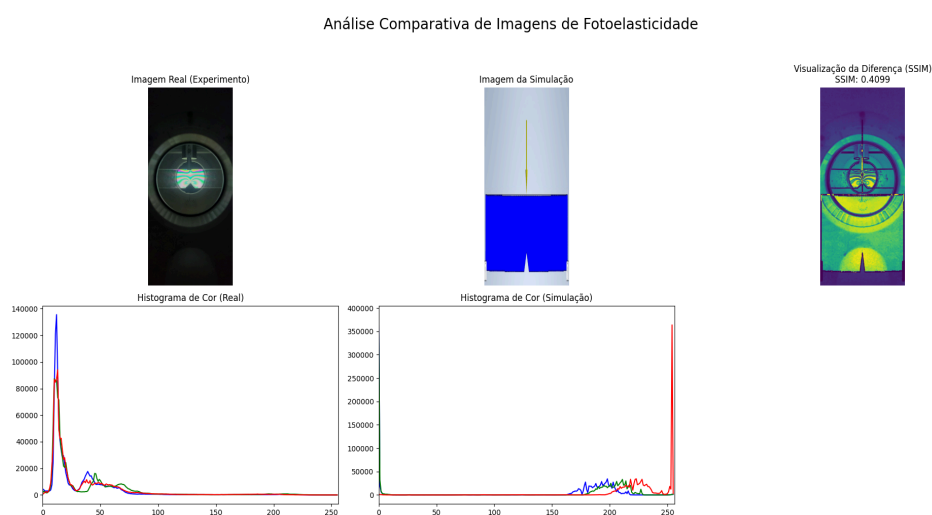
padrão do modelo numérico. Com os domínios visuais devidamente padronizados e sobreponíveis, o conjunto de dados torna-se apto para avançar à etapa final de validação estatística e correlação.

3.5 ANÁLISE QUANTITATIVA E CORRELAÇÃO DE IMAGENS

Visando estabelecer uma comparação objetiva e rigorosa entre os resultados físicos do experimento e as respostas teóricas da simulação computacional, desenvolveu-se um fluxo de trabalho algorítmico em linguagem Python. A estruturação da rotina foi baseada na utilização conjunta das bibliotecas OpenCV (para processamento de visão computacional), scikit-image (para extração de métricas estruturais) e Matplotlib (para renderização gráfica dos resultados).

O algoritmo final foi estruturado para calcular o Erro Quadrático Médio (MSE), a correlação média dos histogramas de cor e o Índice de Similaridade Estrutural (SSIM). Entretanto, neste trabalho, a discussão dos resultados foi concentrada no SSIM, por se tratar da métrica mais adequada para avaliar a correspondência espacial entre os padrões de franjas experimentais e os mapas numéricos de tensão. Inicialmente, foi realizado um teste preliminar, de carácter apenas visual, com o objetivo de verificar a forma de apresentação dos resultados gerados pelo código final, conforme ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.7: Análise preliminar



Fonte: Autor próprio

A primeira métrica aplicada é o Erro Quadrático Médio (MSE - Mean Squared Error), que atua calculando a diferença direta e absoluta entre os vetores de cor de cada pixel correspondente nas duas imagens. O objetivo desta etapa é quantificar o desvio global do modelo numérico em relação ao experimento, onde valores numéricos tendendo a zero indicam uma maior correspondência exata entre as amostras.

A comparação por histogramas de cor foi utilizada como uma métrica auxiliar para avaliar a semelhança global entre as imagens experimental e numérica em termos de distribuição cromática. Para isso, cada imagem foi decomposta nos três canais RGB, correspondentes às componentes vermelho, verde e azul. Em cada canal, o histograma contabiliza a quantidade de pixels associada a cada nível de intensidade luminosa, variando de 0 a 255. Dessa forma, imagens com distribuições cromáticas semelhantes tendem a apresentar histogramas com formatos próximos.

No presente trabalho, essa métrica não foi utilizada para localizar espacialmente as regiões de tensão, mas sim para verificar se as imagens comparadas apresentavam composição geral de cores compatível. A correlação entre histogramas foi calculada separadamente para os três canais e, posteriormente, foi obtida uma média entre eles. Valores próximos de 1 indicam forte semelhança entre as distribuições de cor, valores próximos de 0 indicam baixa correlação e valores negativos indicam comportamento inverso entre os histogramas.

Em seguida, realiza-se a Comparação de Histogramas de Cor (RGB). Esta análise quantifica a distribuição estatística das intensidades dos canais de cor primários (Vermelho, Verde e Azul) ao longo de toda a imagem. A extração dos histogramas da imagem real e da simulada permite medir a semelhança global em termos de paleta de cores e gradiente de intensidade. O código computa o nível de correlação linear entre essas distribuições, resultando em um índice que varia de -1 a 1, atestando a fidelidade da simulação em replicar o espectro visual gerado pelas tensões físicas.

Antes da aplicação do Índice de Similaridade Estrutural (SSIM - Structural Similarity Index), as imagens foram comparadas considerando a mesma região de interesse do corpo de prova, buscando preservar o alinhamento entre o padrão experimental e o mapa de tensão numérico. Ressalta-se que o redimensionamento das imagens não elimina completamente diferenças de iluminação, enquadramento, perspectiva e escala cromática entre o ensaio físico

e a simulação. Por essa razão, o SSIM foi utilizado como métrica comparativa de similaridade visual e espacial, e não como critério absoluto de validação quantitativa das tensões.

Por fim, aplica-se o SSIM considerado a métrica mais avançada deste estudo. Diferente das técnicas de erro absoluto, o SSIM não compara apenas os pixels isoladamente, mas avalia a percepção de mudança nas macroestruturas da imagem. A rotina converte as matrizes padronizadas para uma escala de cinza e analisa interdependências espaciais, considerando fatores como luminância, contraste e forma geométrica das franjas.

O valor do SSIM também varia em uma escala de -1 a 1, na qual o valor máximo representa uma identidade perfeitamente fiel, e valores próximos de zero ou negativos indicam baixíssima correlação. Portanto, no contexto deste trabalho, a maximização do índice SSIM atesta a validação do modelo computacional. Adicionalmente, o método implementado gera de forma automatizada um "mapa de diferenças" visual. Este mapeamento destaca graficamente as coordenadas espaciais de maior divergência entre os domínios, auxiliando o pesquisador na identificação pontual de regiões onde o modelo numérico pode necessitar de aprimoramento em suas condições de contorno ou malha. (O código-fonte completo referente à análise de correlação encontra-se detalhado no Apêndice B deste trabalho).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

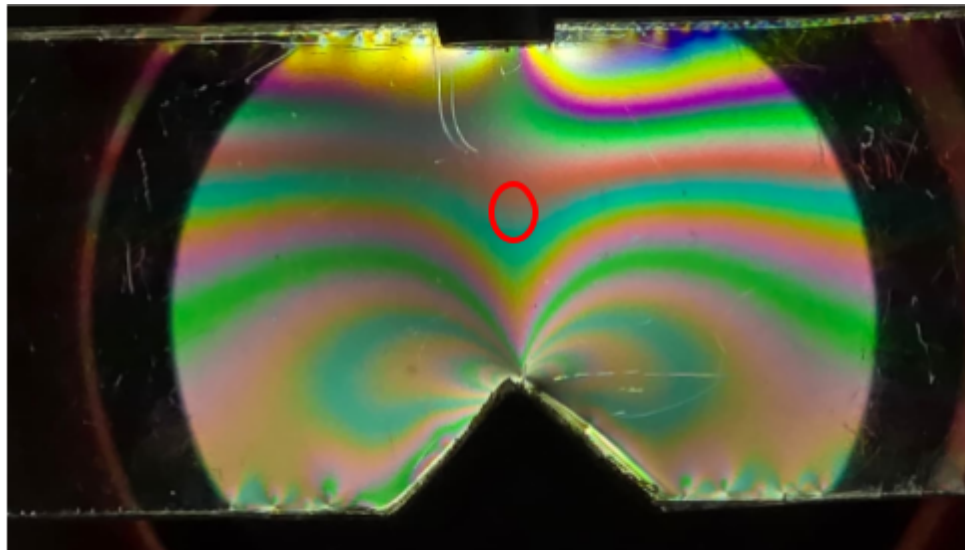
4.1 ESTIMATIVA OPERACIONAL DA CONSTANTE ÓPTICA E CORRELAÇÃO COM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A determinação rigorosa da constante óptica de um material fotoelástico normalmente exige um procedimento de calibração independente, realizado em corpo de prova de geometria simples, submetido a carregamentos conhecidos e com leitura de diferentes ordens de franja. Conforme discutido por (SCHIAVON, 2010), a calibração permite relacionar as isocromáticas observadas com um determinado nível de tensão no material, sendo recomendada a utilização de corpos de prova simples e carregamentos controlados para a obtenção da constante óptica.

No presente trabalho, adotou-se uma estimativa operacional da constante óptica do policarbonato, determinada a partir da correlação entre a imagem fotoelástica experimental e o campo de tensão obtido numericamente. Essa abordagem foi empregada com o objetivo de estabelecer uma relação semiquantitativa entre a ordem de franja observada no ensaio e os níveis de tensão indicados pela simulação. Portanto, o valor estimado não deve ser interpretado como uma constante óptica universal do policarbonato, mas como um parâmetro de conversão válido para as condições específicas deste estudo, considerando a espessura do corpo de prova, a montagem óptica, a iluminação, a aquisição das imagens e o carregamento aplicado.

Para essa estimativa, selecionou-se um ponto de referência localizado na região central do corpo de prova, afastado do vértice do entalhe. Essa escolha foi adotada para reduzir a influência direta da concentração de tensão no ápice do entalhe, onde as franjas se apresentam muito próximas e a leitura de uma ordem de franja específica se torna menos precisa. Além disso, regiões próximas a descontinuidades geométricas podem apresentar maior sensibilidade à malha na simulação numérica.

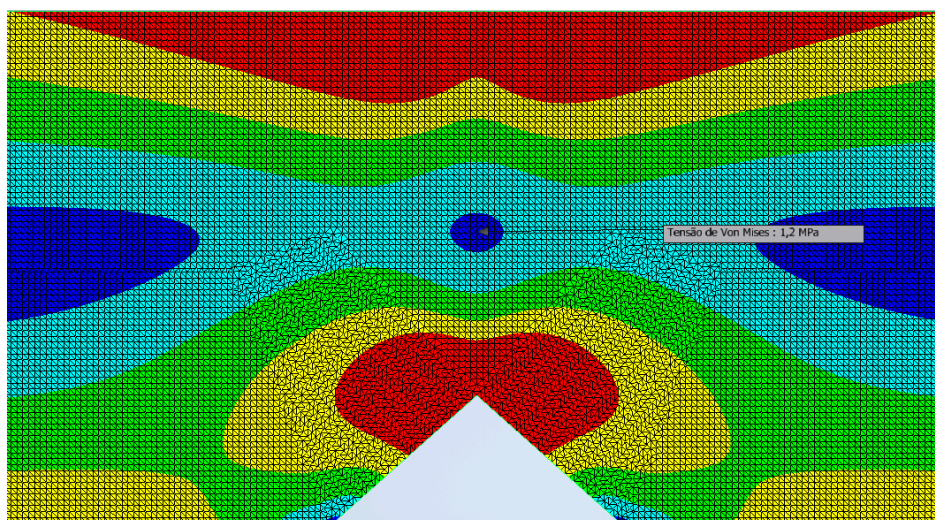
Figura 4.1: Ponto de referência selecionado na imagem fotoelástica experimental



Fonte: Autor próprio

Na região selecionada, a imagem experimental apresentou coloração predominantemente acinzentada. Conforme a escala de referência das franjas isocromáticas apresentada na Tabela 2.1, essa tonalidade está associada à ordem de franja aproximada $N = 0,28$. Na mesma coordenada geométrica, a ferramenta de sonda do Autodesk Inventor indicou uma tensão equivalente de Von Mises de 1,2 MPa, conforme apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2: Ponto de referência selecionado no campo de tensão equivalente de Von Mises obtido no Autodesk Inventor



Fonte: Autor próprio

Aplicando a relação apresentada no item 2.10, conforme a Equação 2.9, e considerando a espessura do corpo de prova $h = 2,75$ mm, obteve-se a estimativa operacional da constante óptica:

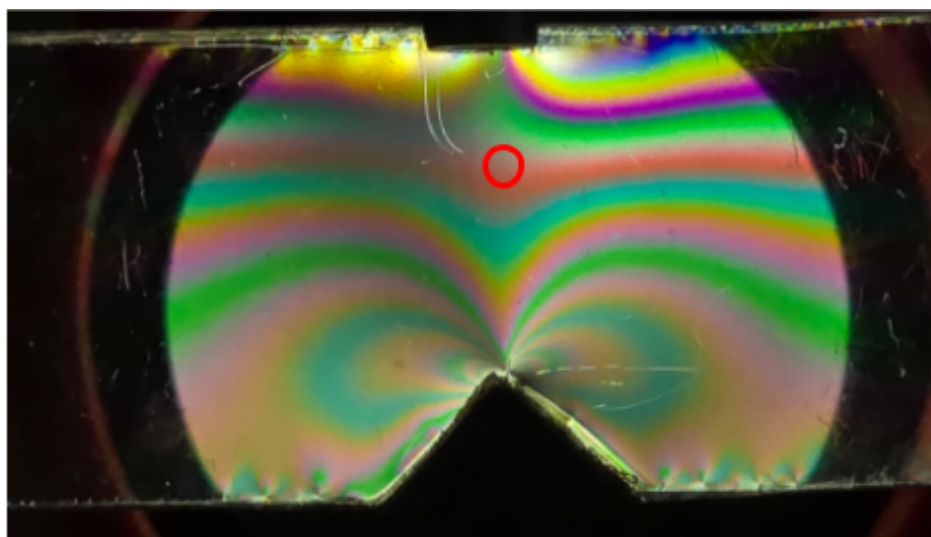
$$f_{\sigma} = \left(\frac{1,2 \cdot 2,75}{0,28} \right)$$
$$f_{\sigma} = 11,79 \text{ N/mm}$$

Dessa forma, adotou-se $f_{\sigma} = 11,79$ N/mm como estimativa operacional da constante óptica para a correlação semiquantitativa entre a simulação numérica e o padrão de franjas observado experimentalmente. Ressalta-se que esse valor foi obtido a partir de um ponto de referência do próprio ensaio e, portanto, deve ser utilizado como parâmetro de comparação interna, não como valor absoluto ou tabelado para o policarbonato.

A partir desse valor, realizou-se a análise inversa da ordem de franja em outros pontos do corpo de prova. Nessa etapa, a constante óptica não foi recalculada, sendo mantido o valor de $f_{\sigma} = 11,79$ N/mm. O objetivo foi verificar se as ordens de franja previstas a partir das tensões numéricas apresentavam coerência com as tonalidades observadas na imagem fotoelástica experimental.

O segundo ponto analisado foi selecionado em uma região localizada um pouco acima da parte central do corpo de prova, ainda afastada do vértice do entalhe. Essa região foi escolhida por apresentar uma condição intermediária de solicitação, permitindo avaliar a correspondência entre a simulação numérica e o padrão experimental em uma área diferente daquela utilizada para estimar a constante óptica operacional.

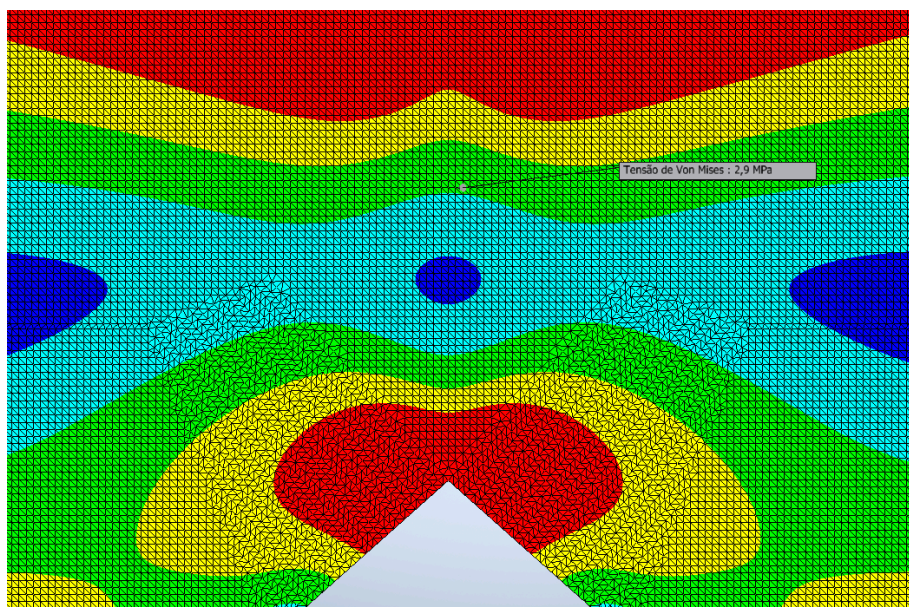
Figura 4.3: Região correspondente ao Ponto 2 na imagem fotoelástica experimental



Fonte: Autor próprio

Na simulação numérica, a ferramenta de sonda do Autodesk Inventor indicou, para o Ponto 2, uma tensão equivalente de Von Mises de 2,9 MPa (Conforme a figura 4.4).

Figura 4.4: Ponto 2 de referência selecionado no campo de tensão equivalente de Von Mises obtido no Autodesk Inventor



Fonte: Autor próprio

Utilizando a constante óptica operacional previamente estimada, $f_{\sigma} = 11,79 \text{ N/mm}$, e a espessura do corpo de prova $h = 2,75 \text{ mm}$, a ordem de franja prevista foi calculada conforme a relação apresentada no item 2.10:

$$N_{previsto} = \left(\frac{2,9 \cdot 2,75}{11,79} \right)$$
$$N_{previsto} = 0,68$$

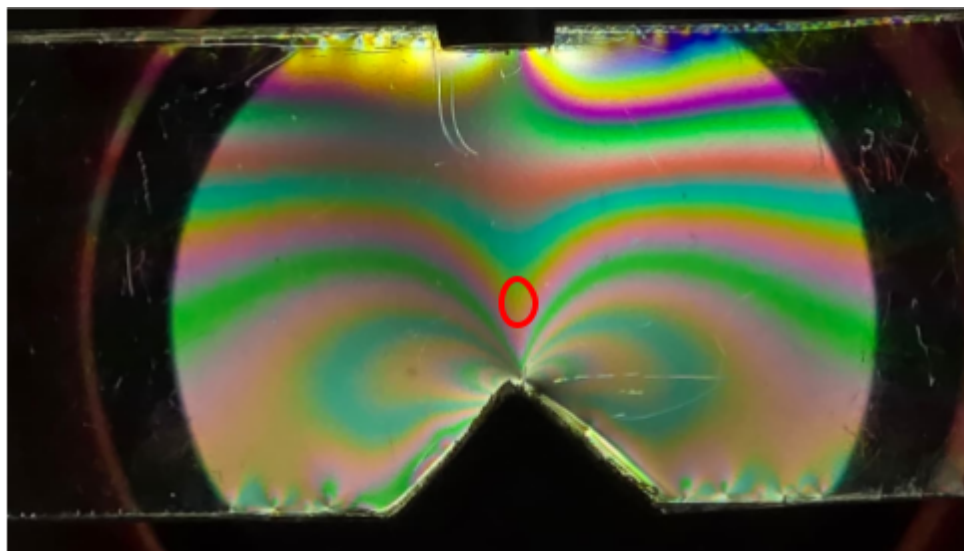
O valor obtido, $N_{previsto} \approx 0,68$, situa-se ligeiramente acima da ordem correspondente ao amarelo e abaixo da tonalidade laranja na escala de referência apresentada na Tabela 2.1. Dessa forma, a previsão numérica indica uma coloração próxima à faixa amarela, com tendência para uma transição amarelo-alaranjada.

Na imagem fotoelástica experimental, entretanto, a região correspondente ao Ponto 2 apresentou tonalidade mais clara, próxima ao branco-amarelado. Essa diferença pode estar associada à leitura visual da cor, à influência da iluminação, à transição gradual entre as franjas e ao fato de a constante óptica adotada ter sido estimada de forma operacional a partir de um único ponto de referência.

Apesar dessa diferença, observa-se coerência quanto à tendência geral do comportamento fotoelástico, uma vez que o Ponto 2 apresentou tensão numérica superior à do ponto central de referência e, conseqüentemente, ordem de franja prevista também superior. Assim, a comparação pode ser considerada parcialmente coerente, reforçando o caráter semiquantitativo da análise proposta.

O terceiro ponto analisado foi selecionado em uma região intermediária entre a parte central da viga e o vértice do entalhe. Essa região foi escolhida por apresentar maior solicitação mecânica em relação aos pontos anteriores, mas ainda sem coincidir diretamente com o ápice do concentrador de tensão.

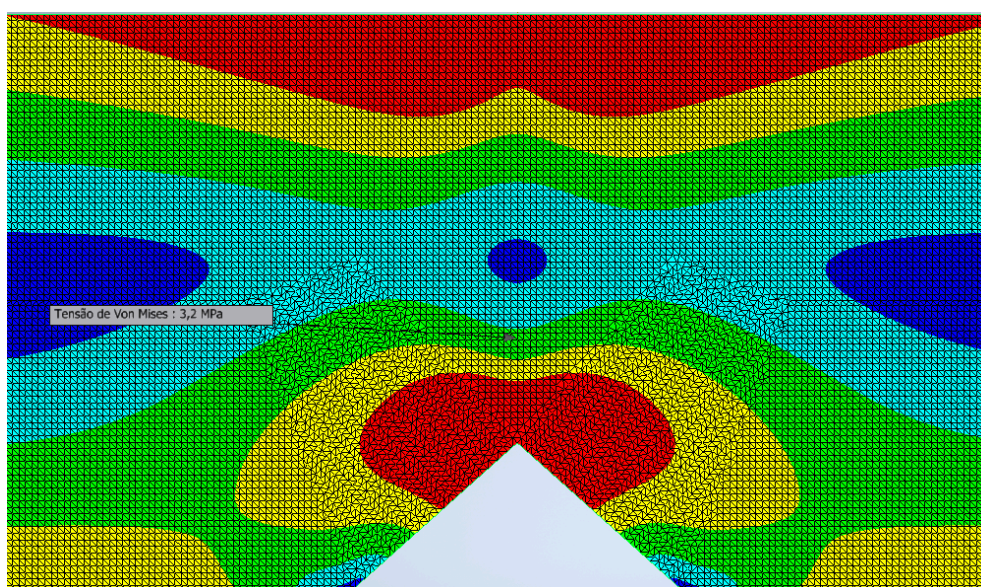
Figura 4.5: Ponto 3 selecionado na simulação numérica, localizado na região intermediária entre a parte central da viga e o entalhe.



Fonte: Autor próprio

Na simulação numérica, a ferramenta de sonda do Autodesk Inventor indicou, para o Ponto 3, uma tensão equivalente de Von Mises de 3,2 MPa (Conforme a figura 4.6).

Figura 4.6: Ponto 3 de referência selecionado no campo de tensão equivalente de Von Mises obtido no Autodesk Inventor



Fonte: Autor próprio

Utilizando a constante óptica operacional previamente estimada, $f_o = 11,79$ N/mm, e a espessura do corpo de prova $h = 2,75$ mm, a ordem de franja prevista foi calculada conforme a relação apresentada no item 2.10:

$$N_{previsto} = \left(\frac{3,2 \cdot 2,75}{11,79} \right)$$

$$N_{previsto} = 0,75$$

O valor obtido, $N_{previsto} \approx 0,75$, situa-se entre as ordens de franja associadas às tonalidades amarela e laranja na escala de referência apresentada na Tabela 2.1. Dessa forma, a previsão numérica indica uma coloração próxima à transição entre amarelo e laranja.

Na imagem fotoelástica experimental, a região correspondente ao Ponto 3 apresentou tonalidades amareladas com transição para rosa. Assim, observa-se coerência parcial entre a ordem de franja prevista e a coloração observada, uma vez que a tonalidade amarela prevista aparece na região experimental, embora também sejam observadas variações cromáticas associadas à transição entre franjas e à proximidade com a região de maior concentração de tensões.

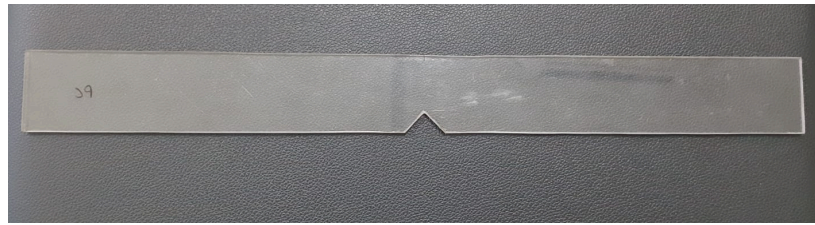
Essa diferença reforça o caráter semiquantitativo da análise, pois a interpretação visual das cores pode ser influenciada pela iluminação, pela aquisição da imagem, pela sobreposição gradual das franjas e pela própria estimativa operacional da constante óptica. Ainda assim, o resultado indica coerência quanto à tendência geral, uma vez que o Ponto 3 apresentou tensão numérica superior à dos pontos anteriores e, conseqüentemente, ordem de franja prevista também superior.

4.2 ANÁLISE FOTOELÁSTICA VIA POLARISCÓPIO PLANO

4.2.1 Análise da Viga Tipo 1

A primeira geometria analisada consistiu em uma viga retangular com um entalhe triangular, apresentando 380 mm de comprimento, 38,75 mm de altura e 2,75 mm de espessura, conforme ilustrado na Figura 4.7.

Figura 4.7: Viga Tipo 1

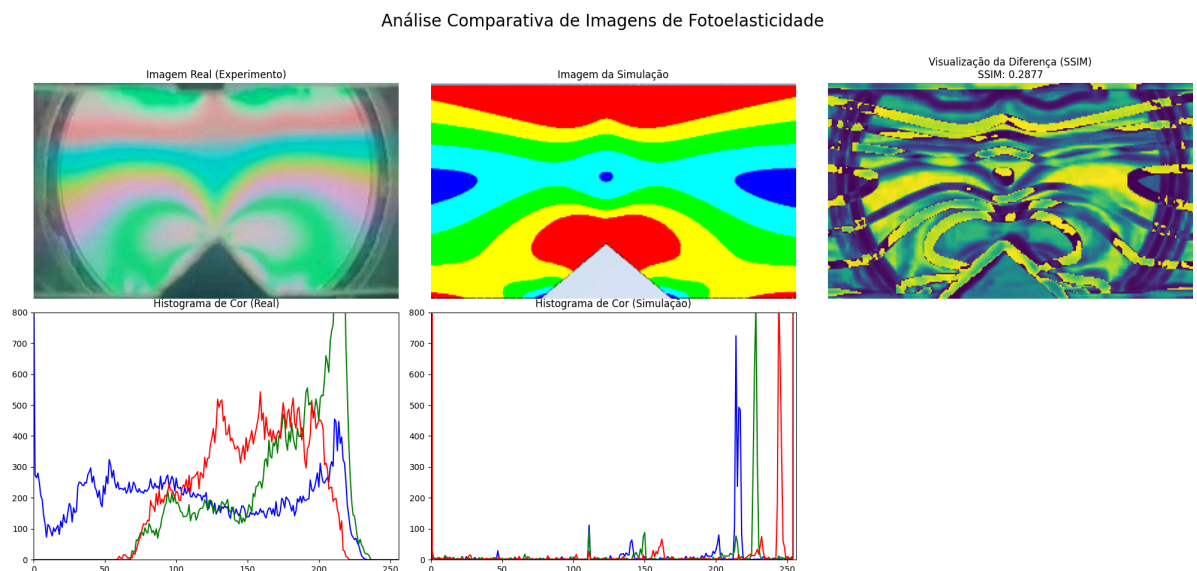


Fonte: Autor próprio

O ensaio foi conduzido sob duas condições distintas de carga mecânica, permitindo observar a evolução e o adensamento das franjas fotoelásticas (isoclínicas e isocromáticas combinadas).

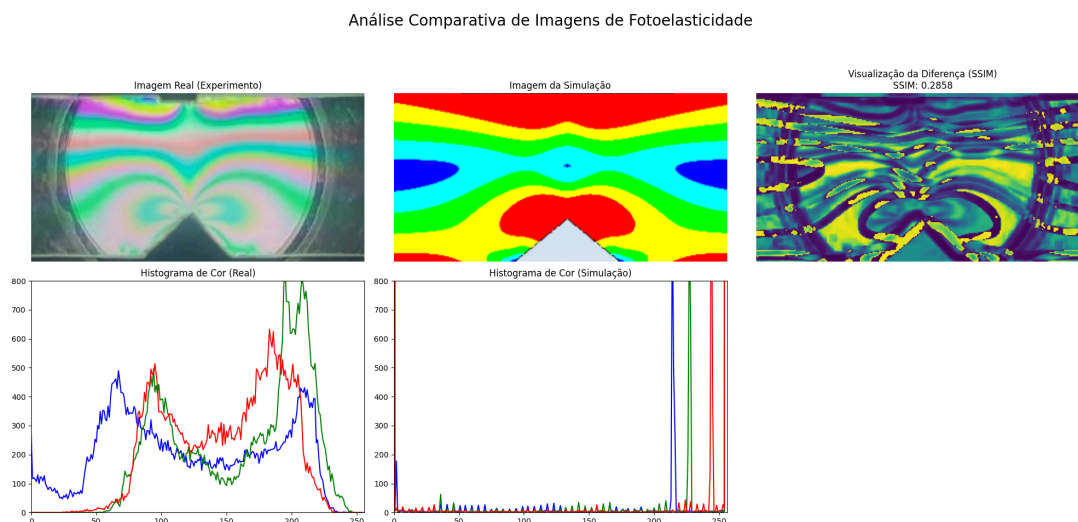
As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados visuais coletados e preparados para a análise computacional.

Figura 4.8: Padrão de franjas fotoelásticas no polariscópio plano para a Viga Tipo 1 sob carga de 22 N



Fonte: Autor próprio

Figura 4.9: Padrão de franjas fotoelásticas no polariscópio plano para a Viga Tipo 1 sob carga de 40 N



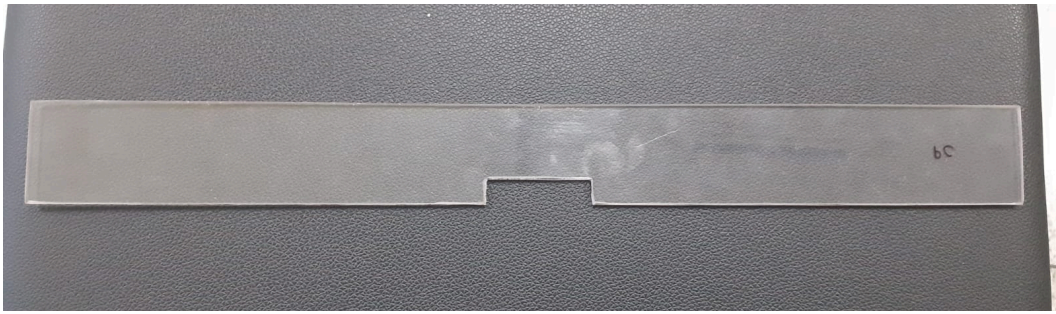
Fonte: Autor próprio

Após o ajuste dimensional das imagens pelo código, a aplicação do algoritmo de comparação resultou em um índice de similaridade de 0,2877 para o primeiro carregamento e de 0,2858 para o segundo carregamento, quando contrastados com a distribuição teórica de tensões.

4.2.2 Análise da Viga Tipo 2

A segunda configuração geométrica avaliada consistiu em uma viga retangular com um entalhe retangular, mantendo as mesmas dimensões globais do modelo anterior (380 mm de comprimento, 38,75 mm de altura e 2,75 mm de espessura), conforme ilustrado na Figura 4.10.

Figura 4.10: Viga Tipo 2



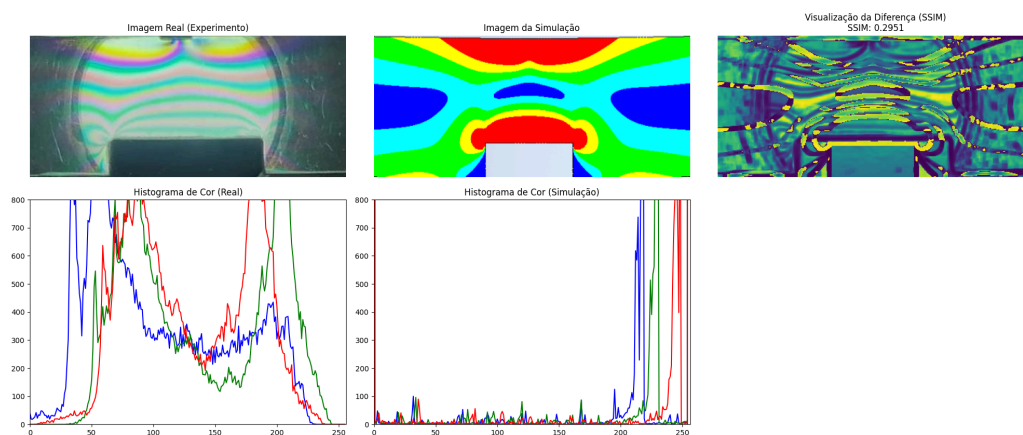
Fonte: Autor próprio

O ensaio foi conduzido sob duas condições distintas de carga mecânica, permitindo observar a evolução e o adensamento das franjas fotoelásticas (isoclínicas e isocromáticas combinadas).

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os resultados visuais coletados e preparados para a análise computacional.

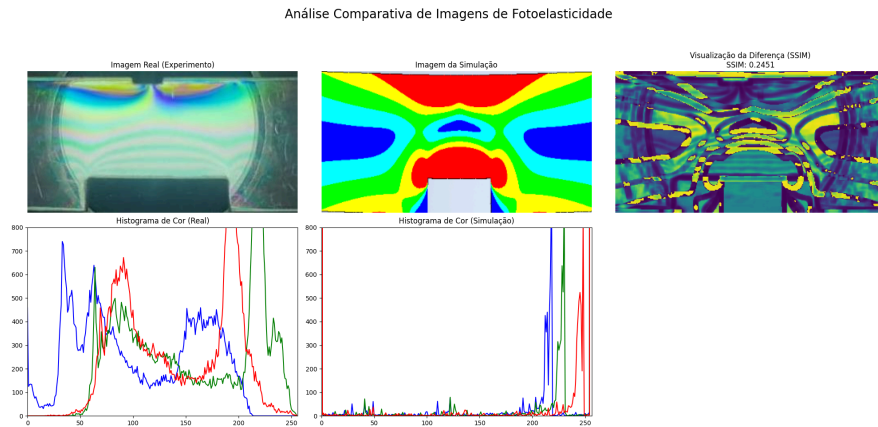
Figura 4.11: Padrão de franjas fotoelásticas no polariscópio plano para a Viga Tipo 2 sob carga de 40 N

Análise Comparativa de Imagens de Fotoelasticidade



Fonte: Autor próprio

Figura 4.12: Padrão de franjas fotoelásticas no polariscópio plano para a Viga Tipo 2 sob carga de 50 N



Fonte: Autor próprio

Concluído o redimensionamento automático das capturas, o código de análise computacional resultou em um índice de similaridade de 0,2951 para a menor carga e de 0,2451 para a maior carga.

4.3 ANÁLISE FOTOELÁSTICA VIA POLARISCÓPIO CIRCULAR

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos após a conversão do arranjo óptico para a configuração de polariscópio circular, utilizando exatamente as mesmas geometrias de viga e os mesmos níveis de carregamento avaliados anteriormente. O objetivo desta etapa foi isolar o efeito das franjas isocromáticas e verificar o impacto dessa filtragem óptica na precisão do algoritmo de análise computacional.

A sutil, porém significativa alteração no aparato experimental consistiu na introdução de duas placas de quarto de onda $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ posicionadas entre os filtros polarizadores e o corpo de prova. Do ponto de vista da física óptica, esse arranjo transforma a luz linearmente polarizada em luz circularmente polarizada. Como consequência direta, as franjas isoclínicas — que dependem da direção das tensões principais e geram obstruções escuras no arranjo plano — são completamente eliminadas. O padrão visual resultante passa a ser composto exclusivamente por franjas isocromáticas, as quais se correlacionam diretamente com a magnitude da diferença entre as tensões principais $(\sigma_1 - \sigma_2)$.

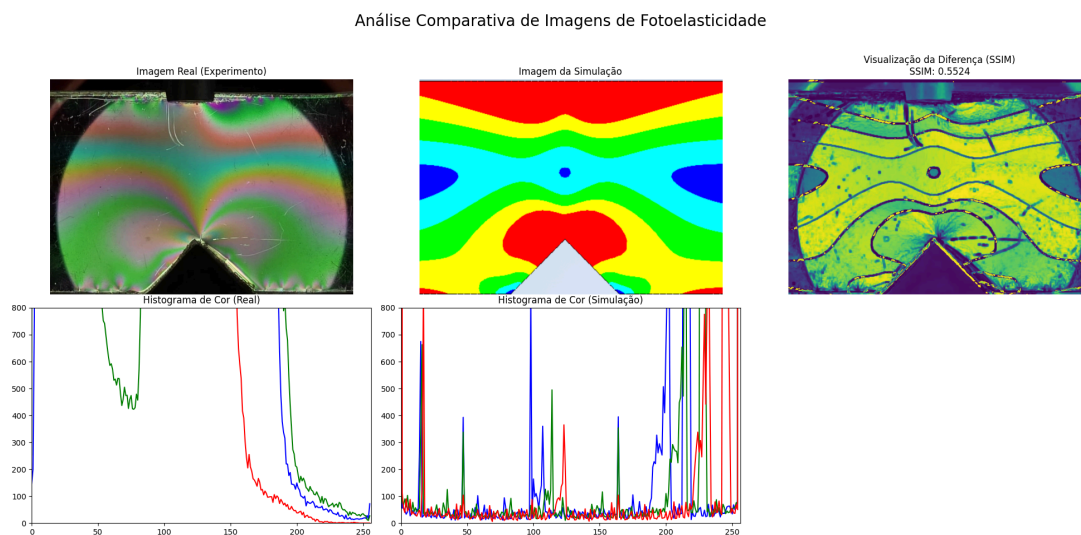
Para viabilizar a comparação quantitativa direta com os modelos numéricos do software Autodesk Inventor, as capturas brutas passaram pelo mesmo protocolo digital: dimensionamento geométrico por interpolação para equalização da matriz de pixels e, subsequente, aplicação do algoritmo de cálculo do índice de similaridade.

4.3.1 Análise da Viga Tipo 1 via Arranjo Circular

A viga do tipo Viga 1 foi submetida aos mesmos dois carregamentos mecânicos descritos no item 4.2.1. Visualmente, a transição para o polariscópio circular permitiu a observação contínua das linhas de contorno de tensão, sem as interrupções zonais causadas pelas sombras das isoclínicas.

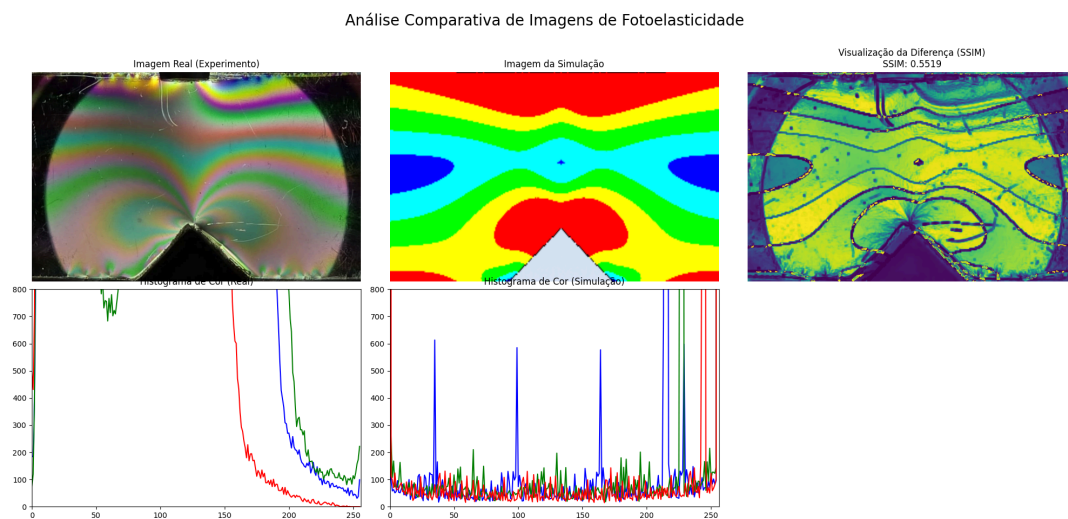
As Figuras 4.13 e 4.14 exibem os padrões isocromáticos isolados e processados pelo código.

Figura 4.13: Padrão de franjas isocromáticas no polariscópio circular para a Viga Tipo 1 sob carga de 22 N



Fonte: Autor próprio

Figura 4.14: Padrão de franjas isocromáticas no polariscópio circular para a Viga Tipo 1 sob carga de 40 N



Fonte: Autor próprio

Após a padronização dimensional, o processamento das imagens pelo código de análise comparativa resultou em índices de similaridade de 0,5524 para o primeiro carregamento e de 0,5519 para o segundo.

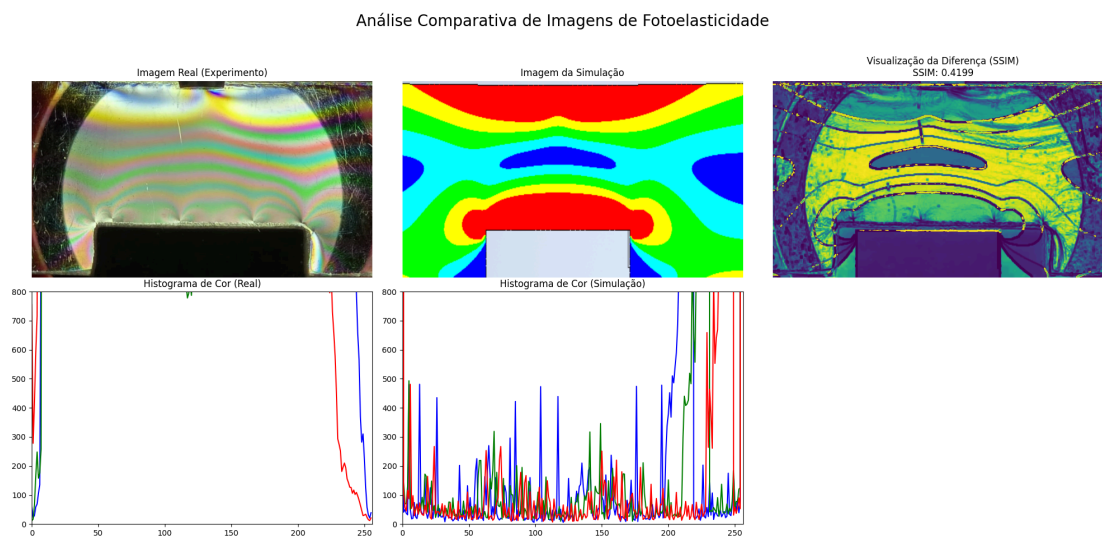
Quando comparados aos valores obtidos no arranjo plano, nota-se um incremento percentual expressivo na convergência dos dados. A ausência de ruído escuro direcional permitiu que o algoritmo mapeasse com maior fidelidade os gradientes coloridos das franjas, aproximando a resposta experimental da distribuição tensional teórica fornecida pela simulação computacional.

4.3.2 Análise da Viga Tipo 2 via Arranjo Circular

A segunda geometria, correspondente à viga do tipo Viga Tipo 2, também foi reavaliada sob os dois níveis de força previamente estabelecidos, visando ratificar o comportamento do polariscópio circular em regiões de maior complexidade geométrica.

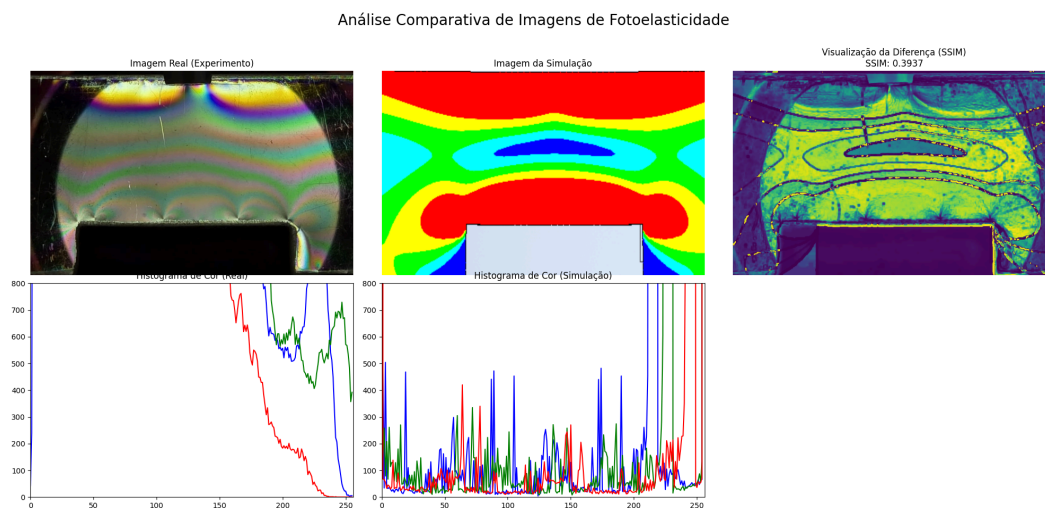
As imagens normalizadas e tratadas para a extração do índice de semelhança constam nas Figuras 4.15 e 4.16.

Figura 4.15: Padrão de franjas isocromáticas no polariscópio circular para a Viga Tipo 2 sob carga de 40 N



Fonte: Autor próprio

Figura 4.16: Padrão de franjas isocromáticas no polariscópio circular para a Viga Tipo 2 sob carga de 50 N



Fonte: Autor próprio

Os resultados apresentados pelo algoritmo de comparação acusaram índices de similaridade de 0,4199 e 0,3937 para os respectivos carregamentos.

4.4 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO: MODELOS EXPERIMENTAIS VS. SIMULAÇÃO NUMÉRICA (INVENTOR)

Nesta seção final de resultados, consolida-se a avaliação quantitativa do desempenho dos dois arranjos ópticos, o polariscópio plano e o polariscópio circular, frente ao modelo teórico idealizado no software Autodesk Inventor. O parâmetro balizador dessa comparação é o Índice de Similaridade Estrutural (SSIM), que quantificou a fidelidade das franjas experimentais em relação ao campo de tensões extraído através da análise de malha computacional. Os dados consolidados estão sintetizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Comparativo do Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) entre os arranjos ópticos.

Corpo de prova	Carregamento (N)	SSIM (Polariscópio Plano)	SSIM (Polariscópio Circular)	Aumento Percentual (%)
Viga Tipo 1	22	0,2877	0,5524	+92,01%
Viga Tipo 1	40	0,2858	0,5519	+93,11%
Viga Tipo 2	40	0,2951	0,4199	+42,29%
Viga Tipo 2	50	0,2451	0,3937	+60,63%

Fonte: Autor próprio

A contraposição dos dados consolidados evidencia uma superioridade expressiva e direta do arranjo circular para fins de análise computacional comparativa. Para a Viga Tipo 1, o ensaio no polariscópio plano registrou índices de similaridade de 0,2877 (sob carga de 22 N) e 0,2858 (sob carga de 40 N). Ao transitar para o polariscópio circular, esses valores

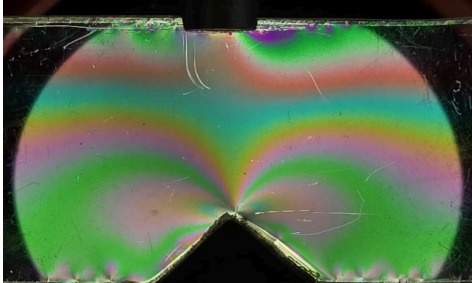
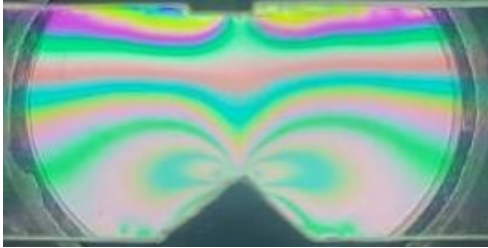
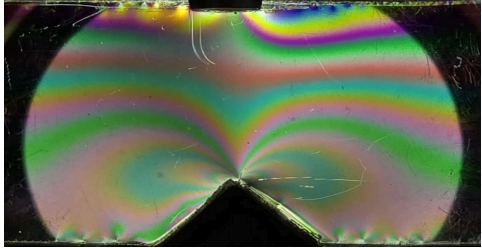
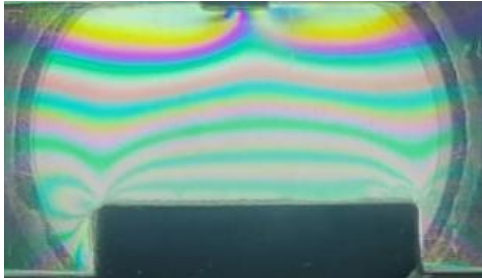
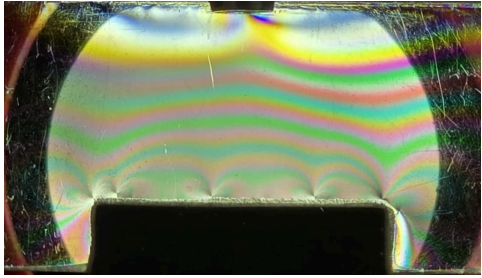
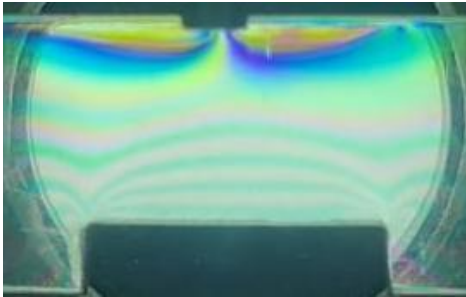
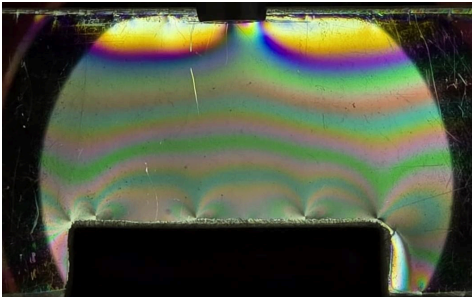
registraram um ganho substancial, com aumentos de 92,01% e 93,11% na magnitude do índice, saltando para 0,5524 e 0,5519, respectivamente.

Comportamento análogo e consistente foi atestado na avaliação da Viga Tipo 2. Enquanto a configuração óptica plana apresentou índices limitados a 0,2951 (para 40 N) e 0,2451 (para 50 N), a conversão estrutural para o arranjo circular elevou os resultados do SSIM em 42,29% e 60,63%, atingindo os patamares de 0,4199 e 0,3937.

Essa ampla disparidade quantitativa, e a evidente vantagem da configuração circular, encontra sua justificativa na própria física do fenômeno e na lógica de processamento do algoritmo de visão computacional. O ambiente numérico do Inventor foi utilizado para gerar mapas de contorno da tensão equivalente de Von Mises. Embora essa grandeza não seja idêntica à diferença entre as tensões principais observada diretamente pela fotoelasticidade, sua distribuição espacial apresenta boa correspondência com as regiões de maior solicitação mecânica do corpo de prova. Assim, a comparação por SSIM foi aplicada com o objetivo de avaliar a semelhança estrutural e espacial entre os campos experimentais de franjas e os mapas numéricos de tensão, e não como uma comparação direta entre valores absolutos de tensão cisalhante máxima.

Durante a execução do ensaio no polariscópio plano, a sobreposição inerente das franjas isoclínicas gerou zonas escuras direcionais intrusivas ao longo do corpo de prova. Do ponto de vista algorítmico, o cálculo do SSIM interpretou essas sombras de direção como interferências ou desvios estruturais maciços em relação ao campo puramente tensional simulado, "punindo" severamente o índice de similaridade. Essa diferença pode ser observada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comparativo dos polariscópios.

Viga Tipo 1 - 22 N	
Polariscópio Plano	Polariscópio Circular
	
Viga Tipo 1 - 40 N	
	
Viga Tipo 2 - 40 N	
Polariscópio Plano	Polariscópio Circular
	
Viga Tipo 2 - 50 N	
	

Fonte: Autor próprio

Em contrapartida, a inserção das placas de um quarto de onda no polariscópio circular atuou como uma filtragem óptica precisa. Ao converter a luz para uma polarização circular, as franjas isoclínicas foram suprimidas do campo de visão, entregando à câmera e ao algoritmo uma malha visualmente limpa e composta apenas pelo mapeamento isocromático real.

Os resultados indicam, portanto, que a adoção do polariscópio circular é mais adequada para a realização de correlações digitais neste estudo, pois a supressão das franjas isoclínicas reduziu interferências visuais e elevou os índices de similaridade estrutural em comparação ao arranjo plano. A eliminação das isoclínicas reduziu a presença de artefatos visuais nulos, resultando em um índice de convergência até duas vezes maior e aproximando, de maneira sólida, a experimentação física na bancada da análise de malha concebida no software de simulação.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu os objetivos propostos ao promover a evolução da bancada didática de fotoelasticidade do Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC/UFG), por meio da adaptação do arranjo óptico para a configuração circular, da instrumentação do sistema de carregamento e da aplicação de rotinas de processamento digital de imagens. As contribuições originais deste estudo estruturaram-se em três pilares fundamentais: a transformação física do aparato em um polariscópio circular, a sua instrumentação mecânica e o desenvolvimento de uma rotina automatizada de processamento e correlação digital de imagens.

O principal desdobramento analítico desta pesquisa evidenciou-se na comparação do desempenho óptico entre o polariscópio de transmissão plana e o polariscópio circular. Os resultados obtidos por meio do Índice de Similaridade Estrutural (SSIM) demonstraram quantitativamente que o arranjo plano sofre forte interferência geométrica das franjas isoclínicas, o que gerou obstruções visuais e reduziu a precisão da correlação digital com o campo de tensões idealizado.

Em contrapartida, a conversão para o polariscópio circular, efetivada pela introdução estratégica de duas placas de quarto de onda ($\frac{\lambda}{4}$), mostrou-se tecnicamente adequada e significativamente mais eficiente para o processo de digitalização. Ao suprimir as franjas isoclínicas e isolar as isocromáticas, o arranjo circular forneceu padrões visuais nítidos da diferença de tensões principais $(\sigma_1 - \sigma_2)$. Como consequência, o processamento computacional registrou um salto substancial, aumentando os índices, chegando a quase dobrar nos casos da Viga Tipo 1 de similaridade estrutural e indicando maior correspondência visual e espacial com o mapa de tensão obtido numericamente.

Ressalta-se, entretanto, que a estimativa da constante óptica do policarbonato obtida neste trabalho deve ser compreendida como um parâmetro operacional, válido apenas para as condições específicas do ensaio realizado. O valor estimado depende da espessura do corpo de prova, da configuração óptica utilizada, das condições de iluminação, da aquisição das imagens, da carga aplicada e da própria correlação com o campo de tensões obtido numericamente. Dessa forma, embora a estimativa tenha permitido estabelecer uma relação semiquantitativa coerente entre as franjas observadas experimentalmente e os resultados da simulação, ela não deve ser adotada como valor absoluto ou de referência para o

polycarbonato. Para essa finalidade, seriam necessários ensaios adicionais de calibração, com corpos de prova padronizados, carregamentos controlados e leitura de diferentes ordens de franja.

Além do aprimoramento estrutural, a adoção de técnicas de visão computacional para atestar a validade de ensaios representa uma inovação metodológica na mecânica experimental da instituição, retirando a subjetividade da análise visual isolada. Conclui-se, portanto, que a bancada atualizada e o protocolo algorítmico estabelecido cumprem as metas estabelecidas e agregam elevado valor técnico ao projeto de pesquisa "Desenvolvimento de Aparatos de Apoio Didático-Experimental para Engenharia Mecânica", fortalecendo o ensino das disciplinas de Projetos de Sistemas Mecânicos.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para uma análise mais precisa a respeito do comportamento das tensões nos corpos de prova e aprimorar a compreensão a respeito da técnica da fotoelasticidade, sugere-se para futuros trabalhos:

- Aprofundamento da análise de gradientes de tensão: Examinar detalhadamente os gradientes de tensão em diferentes regiões dos corpos de prova. Isso pode ser alcançado por meio de uma variação controlada da carga ou da aplicação de carregamentos graduais contínuos, permitindo investigar com maior resolução as transições e as concentrações nas distribuições de tensão ao longo da geometria estrutural.
- Avaliação sob carregamentos dinâmicos: Considerar a aplicação de cargas dinâmicas ao sistema mecânico para avaliar o comportamento fotoelástico do material. A análise das franjas isocromáticas em situações de carregamento variável no tempo permitirá ampliar o escopo de aplicações práticas da técnica, simulando fenômenos de fadiga ou vibração.
- Desenvolvimento de bancada para ensaios de tração: Projetar e estruturar uma adaptação do arranjo experimental — ou uma nova bancada física — voltada especificamente para a execução de ensaios de tração. Recomenda-se a utilização do mesmo princípio de aquisição de força por meio de uma balança digital suspensa acoplada a um esticador, viabilizando o mapeamento visual e quantitativo do campo

de tensões em vigas submetidas a esforços de tração. Uma proposta conceitual da bancada de ensaio de tração é apresentada no Apêndice C, como sugestão de continuidade para trabalhos futuros.

- Implementação de processamento de imagens em tempo real: Evoluir o script em Python desenvolvido para processar fluxos de vídeo contínuos em vez de imagens estáticas. A aplicação das bibliotecas de visão computacional para leitura de quadros em tempo real possibilitaria o monitoramento dinâmico e a extração instantânea do SSIM à medida que a carga é gradativamente aplicada pelo esticador.
- Variação das propriedades dos materiais fotoelásticos: Utilizar a mesma bancada de flexão para ensaiar diferentes tipos de resinas ou polímeros birrefringentes. Isso permitiria investigar como as diferentes constantes ópticas de cada material afetam a resolução das franjas isocromáticas capturadas pela câmera e, consequentemente, a resposta dos histogramas de cor do modelo digital.
- Calibração experimental da constante óptica do material: Realizar ensaios específicos para a determinação da constante óptica do policarbonato, utilizando corpos de prova de geometria simples e carregamentos controlados, como discos submetidos à compressão diametral ou vigas sob flexão. Essa etapa permitiria obter um valor mais confiável de f_{σ} , reduzindo a dependência da correlação com a simulação numérica e possibilitando uma análise quantitativa mais precisa das tensões a partir das ordens de franja.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, D. N.; JOYCE, A. P.; ROBERTS, S.; RUNNER, R. A comparative photoelastic stress analysis of internal root stresses between RC Prep and saline when to the profile/GT rotary instrumentation system. *Journal of Endodontics*, 2006.

ARAÚJO, C. A. Módulo I: mecânica aplicada. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2006. Apostila.

ARAÚJO, C. A.; NEVES, F. D.; BERNARDES, S. R. Análise de tensões em implantes dentários utilizando a técnica fotoelástica. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 3., 2004, Belém. Anais [...]. Belém: [s.n.], 2004.

BERNARDES, S. R.; ARAÚJO, C. A.; NEVES, F. D. Análise do campo de tensões em implantes dentários do tipo hexágono interno, hexágono externo e cone Morse usando a técnica fotoelástica. In: POSMEC – SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 13., 2003, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia: [s.n.], 2003.

BICALHO, C. A. Análise da distribuição das tensões utilizando a metodologia de fotoelasticidade de reflexão, em uma carroceria de automóvel. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. Elementos de máquinas de Shigley. Porto Alegre: Bookman, 2011.

COSTA, E. V. Medidas de intensidade luminosa: polarização. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 2002.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F. Experimental stress analysis. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

FAKHOURI, S. F. Distribuição de tensões de parafusos do sistema de fixação vertebral submetidos a arrancamento utilizando fotoelasticidade de transmissão plana. 2008. 158 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2008.

FERREIRA JUNIOR, A. F. G. Desenvolvimento de um sistema para análise automática do padrão de franjas fotoelásticas isocromáticas. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FERREIRA, A. L.; BERMUDEZ, R. L. Análise fotoelástica: construção e utilização de um polariscópio plano de transmissão. Espírito Santo: Universidade Federal do Espírito Santo, 2004.

FIALHO, J. L. Análise experimental de tensões. 1. ed. Lisboa: LNEC, 1979. v. 2.

FIORINI, Cesare G.; VIEIRA JR., Alberto B. Aplicação da fotoelasticidade digital para análise de tensões em estudo de ligação metálica parafusada viga-coluna. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 37., 2016, Asunción. Anais [...]. Asunción: [s.n.], 2016.

FLEURY, S. V. Análise da distribuição de tensões em descontinuidades de rocha utilizando a técnica da fotoelasticidade. 2001. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

FRENCH, A. A.; BOWLES, C. Q.; PARHAM, P. L.; EICK, J. D.; KILLOY, W. J.; COBB, C. M. Comparison of peri-implant stress transmitted by four commercially available osseointegrated implants. The International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry, 1989.

GOMIDE, H. A. Fotoelasticidade: aplicação na biomecânica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 12., 1990, Ribeirão Preto. Anais [...]. Ribeirão Preto: [s.n.], 1990.

GOMIDE, H. A. Desenvolvimento de um material para fotoelasticidade tridimensional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1975, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: [s.n.], 1975.

GUIMARÃES, Bruno Moreira. Projeto de uma bancada didática para aplicação da técnica da fotoelasticidade. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024.

HENDRY, A. W. Photoelastic analysis. 1. ed. London: Pergamon Press, 1966.

MEASUREMENTS GROUP, INC. Introduction to stress analysis by the PhotoStress method. Tech Note TN-702. Raleigh, NC: Measurements Group, Inc., 1981. 12 p.

NORTON, Robert L. Projeto de máquinas. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PEREIRA, G. P. M.; SMITH NETO, P.; ALMEIDA, D. L. Avaliação de franjas fotoelásticas simuladas no Matlab e software de elementos finitos. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. Anais [...]. Cusco: Federação Iberoamericana de Engenharia Mecânica, 2007.

REDNER, Alex S. Photoelastic coatings: photoelasticity and finite element analysis. In: SYMPOSIUM ON PHOTOMECHANICS IN ENGINEERING, 1980, Mason. Proceedings [...]. Mason: [s.n.], 1980.

SANTOS, C. A. Ensinando fenômenos ópticos na perspectiva do ensino por investigação. 2020. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2020.

SCHIAVON, J. A. Aplicação da técnica da fotoelasticidade na análise de fundações por estacas helicoidais. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SILVA, L. S. et al. Análise quantitativa de tensões em amostras fotoelásticas por meio de fotoelasticidade. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, Ponta Grossa, 2017.

SOUZA, C. A. Uma luz sobre o século XIX: a óptica dos corpos em movimento. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação de Santa Catarina, Araranguá, 2013.

TIPLER, P. A. Física: gravitação, ondas e termodinâmica. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1995.

VASCONCELOS, A. C. V. Engenharia. São Paulo: IPT, 1947. v. 7.

APÊNDICE A – SCRIPT EM PYTHON PARA REDIMENSIONAMENTO DE IMAGENS

```
import cv2
from google.colab import files
from google.colab.patches import cv2_imshow
import numpy as np
import io
from PIL import Image

print("Passo 1: Por favor, envie a imagem de REFERÊNCIA (o tamanho que você quer
copiar).")
uploaded_ref = files.upload()

if not uploaded_ref:
    print("\nNenhum arquivo enviado para a imagem de referência. Tente novamente.")
else:
    nome_arquivo_ref = next(iter(uploaded_ref))
    print(f"\nImagem de referência '{nome_arquivo_ref}' carregada.")

print("\nPasso 2: Agora, envie a imagem que você deseja REDIMENSIONAR.")
uploaded_target = files.upload()

if not uploaded_target:
    print("\nNenhum arquivo enviado para a imagem a ser redimensionada. Tente
novamente.")
else:
    nome_arquivo_target = next(iter(uploaded_target))
    print(f"Imagem a ser redimensionada '{nome_arquivo_target}' carregada.")
    print("\nProcessando...")
```

```

img_ref = cv2.imdecode(np.frombuffer(uploaded_ref[nome_arquivo_ref],
np.uint8), cv2.IMREAD_COLOR)

img_target = cv2.imdecode(np.frombuffer(uploaded_target[nome_arquivo_target],
np.uint8), cv2.IMREAD_COLOR)

altura_ref, largura_ref = img_ref.shape[:2]
print(f"Dimensões da imagem de referência: {largura_ref}px de largura x
{altura_ref}px de altura.")

dimensoes_desejadas = (largura_ref, altura_ref)
img_redimensionada = cv2.resize(img_target, dimensoes_desejadas,
interpolation=cv2.INTER_AREA)

print(f"Imagem redimensionada com sucesso para as mesmas dimensões.")

print("\n--- Imagem Original (antes de redimensionar) ---")
cv2_imshow(img_target)

print("\n--- Imagem Redimensionada ---")
cv2_imshow(img_redimensionada)

nome_arquivo_salvo = 'imagem_redimensionada.jpg'
cv2.imwrite(nome_arquivo_salvo, img_redimensionada)
print(f"\n A imagem redimensionada foi salva como '{nome_arquivo_salvo}'.")
print("Você pode encontrá-la no painel de arquivos à esquerda para fazer o
download.")

```

APÊNDICE B – SCRIPT EM PYTHON PARA ANÁLISE DE CORRELAÇÃO (MSE, HISTOGRAMA E SSIM)

```
!pip install scikit-image
```

```
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab import files
from skimage.metrics import structural_similarity as ssim
from skimage.metrics import mean_squared_error
```

```
def carregar_imagens():
    print("Por favor, faça o upload da imagem REAL do seu experimento:")
    uploaded_real = files.upload()
    nome_real = list(uploaded_real.keys())[0]

    print("\nPor favor, faça o upload da imagem da SIMULAÇÃO:")
    uploaded_sim = files.upload()
    nome_sim = list(uploaded_sim.keys())[0]

    img_real_bgr = cv2.imread(nome_real)
    img_sim_bgr = cv2.imread(nome_sim)

    img_real_rgb = cv2.cvtColor(img_real_bgr, cv2.COLOR_BGR2RGB)
    img_sim_rgb = cv2.cvtColor(img_sim_bgr, cv2.COLOR_BGR2RGB)

    return img_real_rgb, img_sim_rgb

def analisar_e_correlacionar_imagens(img_real, img_sim):
    altura, largura, _ = img_real.shape
    img_sim_redimensionada = cv2.resize(img_sim, (largura, altura))
```

```

print(f"Imagens redimensionadas para {largura}x{altura} pixels para comparação.")

img_real_gray = cv2.cvtColor(img_real, cv2.COLOR_RGB2GRAY)
img_sim_gray = cv2.cvtColor(img_sim_redimensionada, cv2.COLOR_RGB2GRAY)

mse_valor = mean_squared_error(img_real, img_sim_redimensionada)

ssim_valor, diff_ssim = ssim(img_real_gray, img_sim_gray, full=True,
data_range=img_real_gray.max() - img_real_gray.min())
diff_ssim = (diff_ssim * 255).astype("uint8")

hist_real = [cv2.calcHist([img_real], [i], None, [256], [0, 256]) for i in range(3)]
hist_sim = [cv2.calcHist([img_sim_redimensionada], [i], None, [256], [0, 256]) for i
in range(3)]

corr_b = cv2.compareHist(hist_real[0], hist_sim[0], cv2.HISTCMP_CORREL)
corr_g = cv2.compareHist(hist_real[1], hist_sim[1], cv2.HISTCMP_CORREL)
corr_r = cv2.compareHist(hist_real[2], hist_sim[2], cv2.HISTCMP_CORREL)
corr_media_hist = np.mean([corr_b, corr_g, corr_r])

print("\n--- Resultados da Análise de Correlação ---")
print(f"Erro Quadrático Médio (MSE): {mse_valor:.2f}")
print(f"Índice de Similaridade Estrutural (SSIM): {ssim_valor:.4f}")
print(f"Correlação Média dos Histogramas de Cor: {corr_media_hist:.4f}")
print("-----\n")

fig, axs = plt.subplots(2, 3, figsize=(20, 10))

axs[0, 0].imshow(img_real)
axs[0, 0].set_title('Imagem Real (Experimento)')
axs[0, 0].axis('off')

axs[0, 1].imshow(img_sim_redimensionada)

```

```

    axs[0, 1].set_title('Imagem da Simulação')
    axs[0, 1].axis('off')

    axs[0, 2].imshow(diff_ssim, cmap='viridis')
    axs[0, 2].set_title(f'Visualização da Diferença (SSIM)\nSSIM: {ssim_valor:.4f}')
    axs[0, 2].axis('off')

    cores = ('b', 'g', 'r')
    for i, cor in enumerate(cores):
        axs[1, 0].plot(hist_real[i], color=cor)
        axs[1, 1].plot(hist_sim[i], color=cor)

    axs[1, 0].set_title('Histograma de Cor (Real)')
    axs[1, 0].set_xlim([0, 256])
    axs[1, 0].set_ylim([0, 800])

    axs[1, 1].set_title('Histograma de Cor (Simulação)')
    axs[1, 1].set_xlim([0, 256])
    axs[1, 1].set_ylim([0, 800])

    axs[1, 2].axis('off')

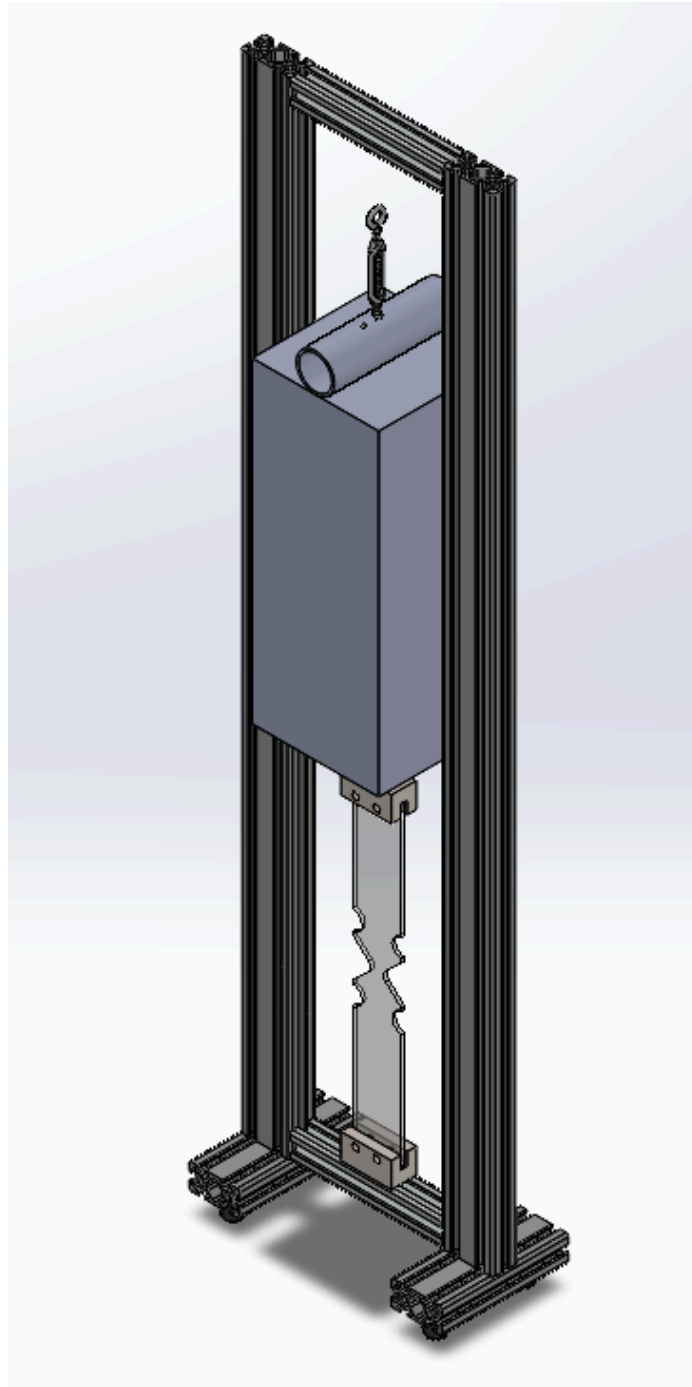
    fig.suptitle('Análise Comparativa de Imagens de Fotoelasticidade', fontsize=20)
    plt.tight_layout(rect=[0, 0.03, 1, 0.95])
    plt.show()

if __name__ == '__main__':
    imagem_real, imagem_simulacao = carregar_imagens()
    analisar_e_correlacionar_imagens(imagem_real, imagem_simulacao)

```


APÊNDICE C – PROPOSTA DE BANCADA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

Figura C.1: Modelo esquemático da bancada proposta para ensaio de tração



Fonte: Autor próprio

A Figura C.1 apresenta uma proposta conceitual de bancada para realização de ensaios de tração em corpos de prova fotoelásticos. A estrutura foi idealizada a partir de perfis de alumínio estruturais, utilizando principalmente perfis de seção 20 mm × 20 mm e 20 mm × 40 mm, com o objetivo de garantir rigidez ao conjunto, facilidade de montagem e possibilidade de ajustes futuros.

O sistema proposto é composto por uma estrutura vertical em perfis de alumínio, responsável por sustentar o conjunto de aplicação de carga. Na parte superior, prevê-se a utilização de um esticador mecânico, cuja função é permitir o ajuste gradual da força de tração aplicada ao corpo de prova. No modelo CAD, o esticador foi representado de forma simplificada, sem a simulação do movimento real da rosca, uma vez que o objetivo do desenho é apresentar a configuração geral da bancada e não realizar uma análise cinemática detalhada do mecanismo.

O bloco superior representado no esquema corresponde à posição prevista para instalação de uma balança de peixe, utilizada como dinamômetro para leitura da força aplicada durante o ensaio. Esse componente permitiria acompanhar a carga de tração imposta ao corpo de prova em tempo real, possibilitando a correlação entre a força aplicada e o padrão de franjas fotoelásticas observado.

Na região inferior do conjunto, foram previstos blocos de alumínio para fixação do corpo de prova. Esses elementos teriam a função de prender as extremidades da amostra, garantindo o alinhamento axial durante a aplicação da carga. A utilização desses blocos busca reduzir deslocamentos indesejados, melhorar a repetibilidade dos ensaios e permitir a adaptação para diferentes geometrias de corpos de prova.

De forma geral, a bancada proposta tem como objetivo ampliar as possibilidades de aplicação da técnica da fotoelasticidade, permitindo estudos futuros em corpos submetidos a esforços de tração. Assim, o modelo apresentado constitui uma sugestão inicial de desenvolvimento, podendo ser aprimorado em trabalhos posteriores por meio de ajustes dimensionais, validação estrutural, fabricação do conjunto e calibração do sistema de medição de força.

Figura C.2: Balança de peixe proposta para utilização como dinamômetro no ensaio de tração



Fonte: Autor próprio