

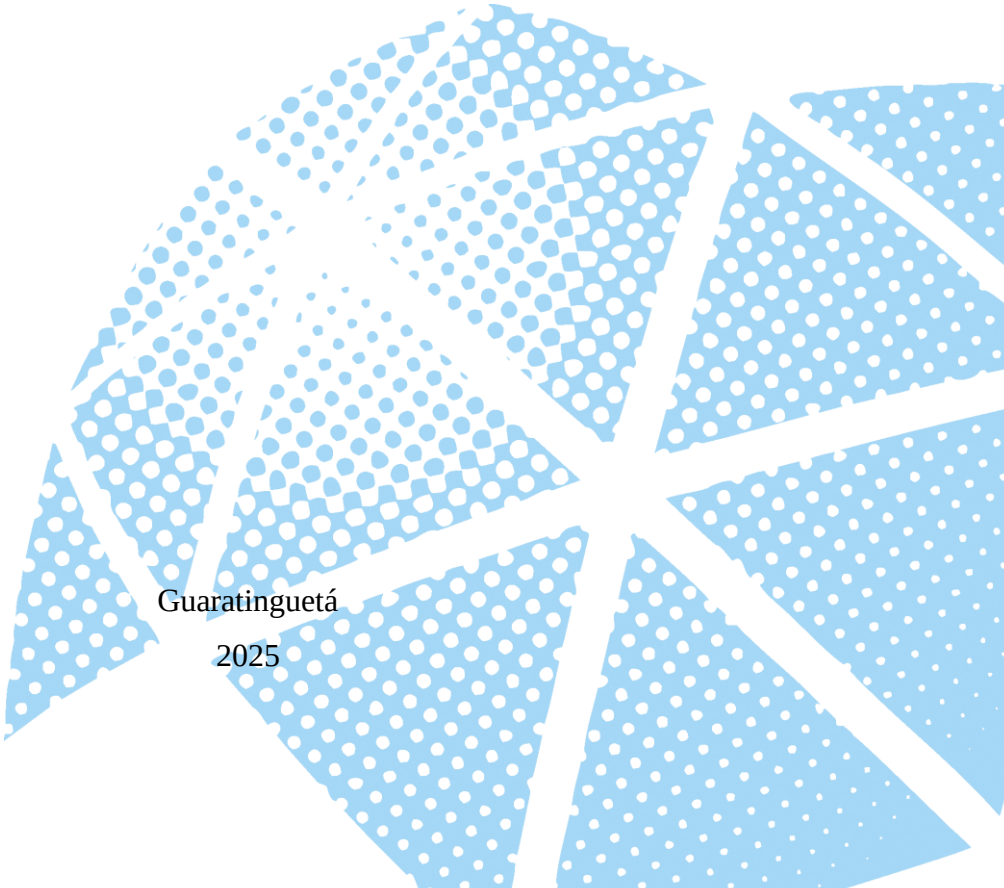
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

GERALDO CESAR ROSARIO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CAMPO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES
EM ENGRENAGENS**

Guaratinguetá

2025



GERALDO CESAR ROSARIO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CAMPO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES
EM ENGRENAGENS**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projetos

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Coorientador: Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado

Guaratinguetá

2025

O48a	Oliveira, Geraldo César Rosário de Análise do comportamento do campo de tensões e deformações em engrenagens / Geraldo César Rosário de Oliveira - Guaratinguetá, 2024. 175 f : il. Bibliografia: f. 145-151 Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva Coorientador: Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado 1. Deformações e tensões. 2. Engrenagens. 3. Imagens digitais. 4. Fotoelasticidade. I. Título. CDU 621.83(043)
------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este estudo tem impacto significativo em múltiplas dimensões: Cientificamente, promove avanços em métodos experimentais acessíveis para análise de campos de tensões e deformações, utilizando fotoelasticidade e correlação digital de imagens (DIC) em engrenagens e outras peças de resinas foto-polimerizadas; No âmbito técnico e inovador, destaca-se pelos resultados obtidos com uso de recursos de baixo custo e não profissionais, como lentes CPL, filmes polarizadores e peças fabricadas em impressoras MSLA (Masked Stereolithography Apparatus) ampliando a aplicabilidade de tecnologias sofisticadas e também destaca-se com o desenvolvimento de patentes, artigos e publicações em anais de congressos internacionais; Social e educacionalmente, democratiza e amplia a capacidade de visualização e acompanhamento de fenômenos relacionados as técnicas de análises experimentais, tornando-as viáveis para instituições ou pesquisadores com recursos limitados, fomentando a formação de pesquisadores e o aprendizado em engenharia, ciências aplicadas e ensino profissionalizante. Economicamente, reduz custos associados a equipamentos especializados, incentivando pesquisas em pequenos centros e regiões menos favorecidas; culturalmente, contribui para a disseminação do conhecimento científico e tecnológico; economicamente, a redução de custos em tecnologias experimentais cria oportunidades para pequenas e médias empresas locais inovarem em seus processos, estimulando o crescimento econômico sustentável. A pesquisa também reforça a internacionalização, ao demonstrar sua aplicabilidade em estudos globais, e a inserção regional e nacional, promovendo soluções de baixo custo para desafios industriais, especialmente em setores relevantes para a região como aeroespacial, automotivo, metal-mecânico e químico contribuindo para o fortalecimento da competitividade industrial do Vale do Paraíba. No âmbito do desenvolvimento sustentável, o estudo promove o uso eficiente de recursos e materiais acessíveis, alinhando-se aos objetivos globais de sustentabilidade.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study has significant impact across multiple dimensions: Scientifically, it advances accessible experimental methods for analyzing stress and strain fields, using photoelasticity and digital image correlation (DIC) in photosensitive resin gears and other parts. Technically and innovatively, it stands out for achieving results with low-cost, non-professional resources such as CPL lenses, polarizing films, and parts manufactured with MSLA (Masked Stereolithography Apparatus) printers, thereby expanding the applicability of sophisticated technologies. It also excels in the development of patents, articles, and publications in international conference proceedings. Socially and educationally, the study democratizes and enhances the ability to visualize and monitor phenomena related to experimental analysis techniques, making them viable for institutions or researchers with limited resources. This fosters the development of researchers and advances learning in engineering, applied sciences, and vocational education. Economically, it reduces costs associated with specialized equipment, encouraging research in smaller centers and underserved regions. Furthermore, the reduction in costs for experimental technologies creates opportunities for small and medium-sized local businesses to innovate in their processes, stimulating sustainable economic growth. Culturally, it contributes to the dissemination of scientific and technological knowledge. The research also strengthens internationalization by demonstrating its applicability in global studies and enhances regional and national integration by offering low-cost solutions to industrial challenges, particularly in sectors relevant to the region such as aerospace, automotive, metal-mechanics, and chemical industries, thereby bolstering the industrial competitiveness of the Vale do Paraíba region. From a sustainability perspective, the study promotes the efficient use of accessible resources and materials, aligning with global sustainability goals.

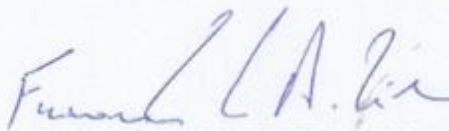
GERALDO CESAR ROSARIO DE OLIVEIRA

**Análise do comportamento do campo de tensões e deformações em
engrenagens**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Data da defesa: 21/02/2025

Banca Examinadora:



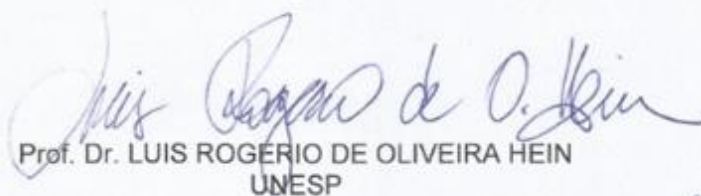
Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador - UNESP

Documento assinado digitalmente
gov.br ANTONIO CARLOS ANCELOTTI JUNIOR
Data: 11/03/2025 11:46:45-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

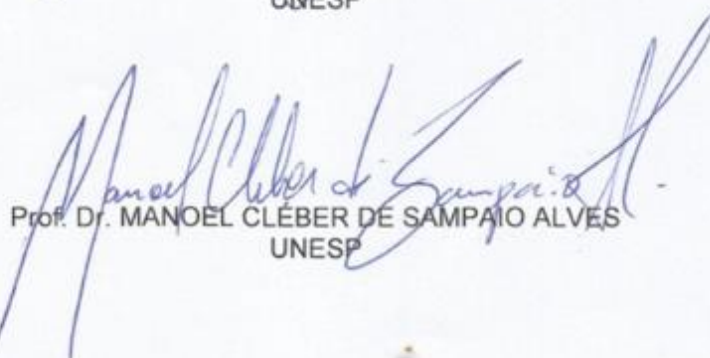
Prof. Dr. ANTONIO CARLOS ANCELOTTI JUNIOR
UNIFEI/IEM



Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO
UPEP - CEETEPS



Prof. Dr. LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN
UNESP



Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva, Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado e ao Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi que jamais deixaram de me incentivar e por todo o tempo disponibilizado e paciência para atender minhas dúvidas. Sem as vossas orientações, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos meus pais e à minha irmã que, apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela ajuda e atendimento.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar

A todas as pessoas que me apoiaram durante o período da pandemia, um momento de grandes desafios para toda a sociedade. Foi nesse contexto adverso que desenvolvi esta tese, enfrentando dificuldades impostas pelo isolamento, pela incerteza e pelas limitações de acesso a recursos acadêmicos e laboratoriais. O suporte, a compreensão e o incentivo daqueles ao meu redor foram fundamentais para que este trabalho pudesse ser concluído.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

RESUMO

Compreender os campos de tensão e deformação resultantes do contato sob carga externa é fundamental para o desenvolvimento e aprimoramento de peças e componentes. As análises experimentais e simulações são essenciais na engenharia, pois validam modelos teóricos e permitem o desenvolvimento de soluções práticas com o uso de ferramentas digitais e manufatura aditiva. Além disso, diante dos desafios atuais, como concorrência global e regulamentações rigorosas, a otimização do design de engrenagens se tornou essencial. Este trabalho investigou o campo de tensões em engrenagens cilíndricas de dentes retos desalinhadas produzidas em resina fotossensível por estereolitografia de máscara (impressão 3d em impressora de resina). Ensaio mecânicos foram realizados para determinar o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson da resina. O comportamento das engrenagens de resina sob carga foi comparado utilizando simulações de elementos finitos e experimentos com extensômetros e sistema de aquisição de dados em um cenário de desalinhamento controlado. Os resultados validaram o desempenho esperado das engrenagens de resina e dos equipamentos utilizados, confirmando a viabilidade tanto do material quanto dos equipamentos de baixo custo para aplicações experimentais mecânicas. A partir disso, foi realizada uma análise detalhada das tensões e deformações nos dentes das engrenagens de resina, considerando a teoria de contato de Hertz e cilindros com o mesmo raio dos pontos de contato entre os dentes. As tensões e deformações foram estudadas por fotoelasticidade e Correlação de Imagem Digital (DIC) sob cargas de compressão, observando-se a formação de franjas características. A convergência dos dados experimentais com simulações numéricas e analíticas confirma a eficácia desta metodologia de baixo custo para análise de peças fabricadas por manufatura aditiva, possibilitando futuras investigações com geometrias mais complexas.

Palavras-chave: Campo de tensões; Correlação de Imagem Digital; Fotoelasticidade; Engrenagens.

ABSTRACT

Understanding the stress and strain fields resulting from loaded contact is fundamental to the development and improvement of parts and components. Experimental analyses and simulations are essential in engineering, as they validate theoretical models and enable the development of practical solutions using digital tools and additive manufacturing. Furthermore, given current challenges such as global competition and stringent regulations, optimizing gear design has become essential. This work investigates the stress field in misaligned cylindrical spur gears made of photosensitive resin through mask stereolithography (3D printing using a resin printer). Mechanical tests were conducted to determine the elastic modulus and Poisson's ratio of the resin. The behavior of the resin gears under load was compared using finite element simulations and experiments with strain gauges and a data acquisition system in a controlled misalignment scenario. The results validated the expected performance of the resin gears, and the equipment used, confirming the feasibility of both the material and the low-cost equipment for mechanical experimental applications. Subsequently, a detailed analysis of the stresses and deformations in the resin gear teeth was performed, considering Hertz contact theory and cylinders with the same radius as the contact points between the teeth. Stresses and deformations were studied using photoelasticity and Digital Image Correlation (DIC) under compression loads, observing the formation of characteristic fringes. The convergence of experimental data with numerical and analytical simulations confirms the effectiveness of this low-cost methodology for analyzing parts manufactured through additive manufacturing, enabling future investigations with more complex geometries.

Keywords: Stress field; Digital Image Correlation; Photoelasticity; Gears.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cluster dos temas relacionados a pesquisa	26
Figura 2 – Exemplo de disco de resina carregado pontualmente, as franjas são geradas por experimento de fotoelasticidade	33
Figura 3 - Região de contato entre os sólidos.....	35
Figura 4 - Representação simplificada do desalinhamento entre dentes de engrenagens (a) Radial, (b) Axial	37
Figura 5 - Montagem do experimento com engrenagens de aço.....	42
Figura 6 - Sensor utilizado e deslocamento no eixo.....	43
Figura 7 - Representação dos desalinhamentos entre o dente móvel e o dente carregado	44
Figura 8 - Engrenamento entre o pinhão e a coroa utilizados, mostrando o número de dentes em contato	44
Figura 9 - Torquímetro Flex-click	45
Figura 10 - Extensômetro BF 350-3AA	45
Figura 11 - Extensômetro longitudinal	46
Figura 12 - Dados do ensaio longitudinal com torquímetro Flex-click.....	46
Figura 13 - Torquímetro com extensômetros para aquisição do torque em tempo real	47
Figura 14 - Novo parafuso soldado na extremidade do eixo.....	47
Figura 15 - Montagem da ligação de ponte completa na engrenagem de aço.....	48
Figura 16 - Dados adquiridos no experimento com extensômetros ligados em ponte completa na engrenagem de aço.....	48
Figura 17 - Dente de engrenagem modificada, vista superior e lateral, as setas azuis indicam a região de contato.....	49
Figura 18 - Contato entre os dentes perfilados.	50
Figura 19 - Regiões de contato entre os modelos tridimensionais dos dentes de engrenagem modificados, perfil de malha e restrições atribuídas.	51
Figura 20 - Máquina universal com equipamentos para o ensaio de tração e flexão.	52
Figura 21 - Software fatiador Chitubox.....	53
Figura 22 - Impressora Saturn 2 Elegoo.....	53
Figura 23 - CDPs impressos para os ensaios de tração e flexão.....	54
Figura 24 - Resina utilizada.....	55
Figura 25 - Extensômetros de duas grades	56
Figura 26 - Direções das grades	56

Figura 27 - Sistema de aquisição de dados HBM utilizado no ensaio de tração	57
Figura 28 - Extensômetro fixado no CDP de ensaio de tração	57
Figura 29 - Restrições ao modelo do CDP de ensaio de tração	58
Figura 30 - Restrições ao modelo do CDP de ensaio de flexão	58
Figura 31 - Malha dos elementos finitos para o modelo de tração	59
Figura 32 - Malha dos elementos finitos para o modelo de flexão	59
Figura 33 - Teste com transdutor	60
Figura 34 - Relógio comparador	60
Figura 35 - Deflexão da viga em cada acréscimo	61
Figura 36 - Ensaio DIC na chapa fina	63
Figura 37 - Comportamento do CDP durante o ensaio: (a) início, (b) fim	64
Figura 38 - Região de interesse	65
Figura 39 - Delimitação da largura do CDP	65
Figura 40 - CDP modelado no Ansys: (a) Divisão dos segmentos, (b) Malha, (c) Suporte, (d) Carregamento	66
Figura 41 - Deslocamento do CDP durante o ensaio	67
Figura 42 - Gradiente de cores devido ao deslocamento nas direções x e y do CDP	67
Figura 43 - Deformação específica no plano xy	68
Figura 44 - Deformação específica na direção x	68
Figura 45 - Deformação específica na direção y	69
Figura 46 - Câmera digital USB	69
Figura 47 - Dentes sem acabamento	70
Figura 48 - Carregamento nos dentes pintados, pontos iniciais e finais	71
Figura 49 - Deformação específica na direção y	71
Figura 50 - Deformação específica na direção x	72
Figura 51 - Deformação específica no plano xy	72
Figura 52 - Raio da circunferência no ponto onde o diâmetro primitivo intercepta o arco da face do dente de engrenagem estudado	73
Figura 53 - Cuba de lavagem, cabine de cura e disco sob luz UV	74
Figura 54 - Disco antes do tratamento	75
Figura 55 - Remoção de camada e equipamentos de polimento	75
Figura 56 - Discos para fotoelasticidade e DIC	76
Figura 57 - Interface do software NCorr	76
Figura 58 - Aquisição de vídeo do teste de DIC	77

Figura 59 - Processamento das imagens.....	78
Figura 60 - Imagem do disco: (a) Imagem após o processamento. (b) Imagem antes do processamento	78
Figura 61 - Definição dos parâmetros de análise	79
Figura 62 - Definição da relação entre comprimento da linha e pixels	80
Figura 63 - Definição dos parâmetros para deformação.....	80
Figura 64 - Deformação específica na direção y	81
Figura 65 - Deformação específica na direção x	81
Figura 66 - Deformação específica no plano xy	81
Figura 67 - Configuração de aquisição de vídeo para o teste de fotoelasticidade e componentes utilizados: (a) filme polarizador, (b) lente CPL e (c) controle da fonte de luz LED.	82
Figura 68 – Influência das cores no ensaio de fotoelasticidade	83
Figura 69 - Quadros do vídeo com o aumento de carregamentos	85
Figura 70 - Ajuste de escala.....	86
Figura 71 - Feixes de luz no experimento do índice de refração.....	87
Figura 72 - Gráfico dos dados do índice de refração.....	88
Figura 73 - Janela do gráfico do código do teste de tração	89
Figura 74 - Código do teste de flexão.....	90
Figura 75 - Regiões com deformação plástica com carregamento de 4000 N	91
Figura 76 - Caracterização do novo material.....	92
Figura 77 - Contato entre os suportes e o disco.....	93
Figura 78 - Malha criada nos suportes e no disco com 82.053 nós e 18.172 elementos.....	94
Figura 79 - Condições de contorno nos suportes e disco	95
Figura 80 - Deformação específica direção y	95
Figura 81 - Deformação específica direção x	96
Figura 82 - Deformação específica plano xy	96
Figura 83 - Ângulo α e retardação relativa δ	97
Figura 84 - Tensão normal na direção y	98
Figura 85 - Tensão normal na direção x	98
Figura 86 - Tensão de cisalhamento no plano xy	99
Figura 87 - Ângulo α	99
Figura 88 - Retardação relativa δ	100
Figura 89 - Deformação específica na direção x	100

Figura 90 - Deformação específica na direção y	101
Figura 91 - Deformação específica no plano xy	101
Figura 92 - Engrenagens modificadas	102
Figura 93 – Remoção do excesso de resina não curada na impressora	102
Figura 94 - Cura das peças	103
Figura 95 - Diferença de acabamento entre as peças.....	103
Figura 96 - Experimento com engrenagens de resina, montagem dos equipamentos.....	104
Figura 97 - Montagem dos extensômetros, bloco de apoio e mobilidade das engrenagens...	105
Figura 98 - Aplicação de torque no eixo	106
Figura 99 - Extensômetros do modelo BF350-3AA.....	106
Figura 100 - Indicação da posição dos extensômetros nas engrenagens modificadas	108
Figura 101 - Experimento com extensômetro longitudinal na engrenagem de resina	109
Figura 102 - Experimento com ponte completa na base e lateral dos dentes da engrenagem de resina.....	109
Figura 103 - Montagem para os ensaios de DIC e fotoelasticidade com engrenagens de resina	111
Figura 104 - Deformações específicas no plano xy e nas direções x e y, acima do diâmetro primitivo	112
Figura 105 - Tensões na engrenagem de resina com engrenamento acima do diâmetro primitivo	113
Figura 106 - Tensões na engrenagem de resina com engrenamento travado	114
Figura 107 - Tensões na engrenagem de resina com engrenamento próximo do diâmetro primitivo	115
Figura 108 - Modelo tridimensional da engrenagem modificada.....	116
Figura 109 - Divisão das regiões das engrenagens.....	117
Figura 110 - Região de contato.....	118
Figura 111 - Desenvolvimento das malhas.....	118
Figura 112 – Posicionamento do suporte fixo da coroa	119
Figura 113 - Torque no pinhão	119
Figura 114 - Suporte cilíndrico no pinhão	120
Figura 115 - Deformação específica equivalente no engrenamento.....	120
Figura 116 - Tensão normal direção y no engrenamento.....	121
Figura 117 - Tensão normal direção z (x no DIC) no engrenamento	121
Figura 118 - Tensão de cisalhamento no plano yz (xy no DIC) no engrenamento.....	122

Figura 119 - Deformação específica no plano yz (xy no DIC) no engrenamento	122
Figura 120 - Deformação específica na direção y no engrenamento	123
Figura 121 - Deformação específica na direção z (x no DIC) no engrenamento	123
Figura 122 - Tensão normal para CDP de tração.....	124
Figura 123 - Deformação específica na direção longitudinal (z).	124
Figura 124 - Deformação específica na direção transversal (x).	125
Figura 125 - Tensão normal para CDP de flexão.....	125
Figura 126 - Deslocamento da punção durante o ensaio de flexão	125
Figura 127 - Diagrama tensão x deformação longitudinal obtido no ensaio de tração	126
Figura 128 - Média das curvas de tendência do diagrama tensão x deformação longitudinal relacionadas ao ensaio de tração.....	127
Figura 129 - Diagrama tensão x deformação transversal obtido no ensaio de tração.	127
Figura 130 - Média das curvas de tendência do diagrama tensão x deformação transversal relacionadas ao ensaio de tração.....	128
Figura 131 - Diagrama de força x deslocamento obtidas para os CDPs de flexão para os métodos utilizados.	129
Figura 132 - Média das curvas de tendência do diagrama força x deslocamento relacionadas ao ensaio de flexão	129
Figura 133 - Padrões de franjas conforme os métodos: (a) numérico, (b) analítico e ($c_{1,2,3}$) fotoelasticidade.....	131
Figura 134 - Comparação das deformações específicas na direção x	132
Figura 135 - Comparação das deformações específicas na direção y	133
Figura 136 - Comparação das deformações específicas no plano xy	134
Figura 137 – Comparação entre resultados de imagens do Dic com fotoelasticidade da engrenagem.....	137
Figura 138 – Resultado das tensões nas engrenagens com método numérico em comparação com a fotoelasticidade	139
Figura 139 – Sobreposição das figuras dos resultados de tensão no engrenamento em comparação com a fotoelasticidade.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características dos extensômetros	45
Tabela 2- Propriedades das engrenagens.	49
Tabela 3- Dimensões do Cdps	54
Tabela 4- Parâmetros de impressão	54
Tabela 5 - Características da resina utilizada.....	55
Tabela 6 - Características Dos Extensômetros de duas grades	56
Tabela 7- Parâmetros utilizados no ensaio do transdutor	62
Tabela 8- Carregamento em cada quadro do vídeo	84
Tabela 9 - Ângulos de entrada e saída no experimento do índice de refração	87
Tabela 10 - Valores de Deformação Específica (mm/mm) dos experimentos.....	135
Tabela 11 - Erro Percentual Comparativo entre os Métodos	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fases do desenvolvimento da tese divididas em quatro blocos	25
Quadro 2 - Dados obtidos no experimento com DIC e transdutor	62
Quadro 3 - Código do teste de tração	152
Quadro 4 - Código do teste de flexão	153
Quadro 5 - Código para imprimir/plotar o campo de tensões e deformações nos discos, com o método analítico conforme as equações 9-12 e 28-30.....	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DIC - Digital Image Correlation

CPL - Lente Polarizadora Circular

MSLA - Masked Stereolithography Assembly

CNI – Confederação Nacional Da Indústria.

PIB – Produto Interno Bruto

UV – Luz Ultravioleta

CDP – Corpo De Prova

KHK – Kohara Gear Industry

MPC – Multi Point Constant

CCD – Dispositivo De Carga Acoplada

MISO – Multilinear Isotropic Hardening

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Altura da haste
θ_1	Ângulo de incidência
θ_2	Ângulo de refração
φ	Ângulo entre os cilindros
θ	Ângulo entre os planos que contêm os raios R_1 e R_2 dos sólidos em contato
α, α_e	Ângulo teórico da isóclina
φ	Ângulos de entrada
b	Base da haste
P	Carregamento
p	Carregamento na haste
ν	Coeficiente de Poisson
f_σ	Coeficiente ótico de tensão
l	Comprimento de haste
k_a, k_b	Constantes da equação do caso geral de contato
δ	Deflexão extremidade livre
ϵ_x, E_{xx}	Deformação específica na direção x
ϵ_y, E_{yy}	Deformação específica na direção y
γ_{xy}, E_{xy}	Deformação específica no plano xy
ϵ_r	Deformação radial
ϵ_θ	Deformação tangencial
u	Deslocamento radial
D	Diâmetro
r	Distância radial
h	Espessura do disco
n_1, n_2	Índices de refração
G	Modulo cisalhante
E	Módulo de elasticidade
I	Momento de inércia haste
p	Pressão aplicada na borda do disco
R	Raio do disco

b	Raio externo do disco
a	Raio interno do disco
R_1, R_2	Raios do sólido 1 e do sólido 2
Ω	Resistência elétrica
δ, δ_e	Retardação relativa
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano xy
σ'	Tensão equivalente
σ_x	Tensão normal a direção x
σ_y	Tensão normal a direção y
σ_z	Tensão normal a direção z
σ_r	Tensão radial
σ_θ	Tensão tangencial
σ_1, σ_2	Tensões principais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.3	JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA	22
1.4	IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA	22
1.5	ESTRUTURA DA TESE.....	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
3	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	30
3.1	INTRODUÇÃO.....	30
3.1.1	Problema do disco carregado	30
3.1.2	Fotoelasticidade	32
3.1.3	Equação de Snell e índice de refração	34
3.1.4	Perfilamento de engrenagens.....	34
3.1.5	Caso geral ou generalizado do estudo de contato	35
3.1.6	Desalinhamento radial e axial em engrenagens.....	37
3.1.7	Classificação dos parâmetros estudados.....	38
3.1.8	Modelos Numéricos e Elementos Estudados.....	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	DELIMITAÇÃO DAS FERRAMENTAS NUMÉRICAS E ANALÍTICAS	41
4.2	EXPERIMENTOS DESENVOLVIDOS INICIALMENTE PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DEFORMAÇÕES	41
4.2.1	Estudo sobre carregamento estático de engrenagens metálicas desali- nhadas com extensômetros	42
4.2.2	Estudo dos métodos numéricos iniciais: Estudo da modificação de geo- metria.....	48
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA RESINA UTILIZADA	51
4.4	MÉTODO DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS	59
4.4.1	Testes de viabilidade com um transdutor e teste em uma chapa fina com furo concentrador de tensão.	59
4.4.2	Teste com DIC nas engrenagens de aço	69
4.5	COMPRESSÃO DOS DISCOS DE RESINA.	72
4.5.1	Fotoelasticidade e Testes de DIC em Discos	76

4.5.2	Experimento sobre o índice de refração	86
4.6	ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DOS DISCOS	89
4.6.1	Desenvolvimento dos códigos e simulações	89
4.6.2	Campo de tensões nos discos de resina com fotoelasticidade	96
4.6.3	Estudo sobre carregamento estático de engrenagens desalinhadas com extensômetros.....	101
4.6.4	Desalinhamento radial das engrenagens de resina com DIC e fotoelasticidade	110
4.7	ESTUDO NUMÉRICO DOS CAMPOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO DA ENGRENAGEM DE RESINA	116
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	124
6	CONCLUSÃO.....	141
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	144
	REFERÊNCIAS	145
	APÊNDICE – CÓDIGOS DESENVOLVIDOS	152
	ANEXO – TRABALHOS PUBLICADOS RELACIONADOS A TESE	158
	DADOS CURRICULARES	161

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Engrenagens são importantes elementos de máquinas utilizados na concepção de um projeto mecânico, uma vez que são os principais elementos de transmissão de torque e velocidade. Existem os mais variados tipos de engrenagens como: cilíndricas de dentes retos, cilíndricas de dentes helicoidais, cônicas com dentes retos, cônicas com dentes helicoidais entre outras. Vários fatores desafiadores, como a concorrência global e regulamentações cada vez mais rígidas, estão tendo um impacto significativo nas práticas modernas de engenharia. A otimização do design de engrenagens se tornou mais necessária do que nunca (ARTONI, 2019). Como outros elementos de máquinas, a fratura é um risco presente também nos pares de engrenagem. Devido ao carregamento que suportam durante o funcionamento, elas podem falhar, entre outros motivos, devido às tensões de flexão, produzidas na raiz do dente; ou devido às tensões de contato, no ponto de referência do engrenamento. Os altos custos de manutenção são muitas vezes justificados pela enorme perda associada à falha, não apenas gerando impacto financeiro, mas também ambiental e social (MOAN, 2019). Segundo a confederação nacional da indústria (CNI, 2019) o setor industrial como todo representa 21% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, correspondendo por 51% das exportações, 68% da pesquisa e desenvolvimento do setor privado e 30% dos tributos federais (exceto receitas previdenciárias).

Compreender os campos de tensão e deformação que surgem devido ao contato sob carga externa é essencial para o aprimoramento e desenvolvimento de peças e componentes. Análises experimentais e simulações desempenham um papel fundamental na engenharia, especialmente na validação de modelos teóricos e no desenvolvimento de soluções práticas utilizando ferramentas digitais e manufatura aditiva (Berthelot, 2012; Krzywanski et al., 2024; Vergara et al., 2019). O desenvolvimento de modelos constitutivos precisos para materiais poliméricos é uma prioridade na engenharia de materiais, pois permite prever o comportamento dos materiais sob diferentes condições de carga e ambientes. Técnicas de medição que utilizam a correlação digital de imagens (DIC) tornaram-se um método não invasivo e acessível para medir deformações e tensões em materiais onde se destacam em várias aplicações, desde a validação de modelos constitutivos até o monitoramento estrutural segundo Arabul e Lunt (2022).

A fotoelasticidade é uma técnica que aproveita o fenômeno de dupla refração em materiais transparentes sob tensão interna. A aplicação de uma carga induz deformações no material, gerando campos de tensão que alteram suas propriedades ópticas. Quando iluminado com luz polarizada, são produzidos padrões de interferência que fornecem informações quantitativas sobre a magnitude e a distribuição das tensões internas (Gdoutos, 2022). A técnica de fotoelasticidade continua sendo uma poderosa ferramenta para visualizar tensões internas em materiais. Avanços recentes incluem a integração de resinas fotossensíveis e impressão 3D, permitindo novas possibilidades de análise. Segundo Wang et al. (2017), as propriedades mecânicas e fotoelásticas de materiais poliméricos transparentes e fotossensíveis utilizados na impressão 3D dependem da composição química desses materiais, bem como de métodos para aprimorar suas propriedades mecânicas, como orientação de impressão, pós-processamento e controle de temperatura.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi investigar o campo de tensões e deformações em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço e fabricadas em resina fotossensível por manufatura aditiva, por meio da integração de métodos experimentais e simulações numéricas. A partir dos resultados obtidos dos experimentos com CDPs, compressão dos cilindros/discos (conforme a teoria de hertz) e desalinhamento nas engrenagens pretende-se validar a viabilidade do uso de materiais e equipamentos de baixo custo em análises mecânicas no estudo das tensões de contato para futuramente ser utilizado em estudos de fadiga superficial em engrenagens de resina.

O objetivo secundário foi a criação de protótipos e dispositivos experimentais que permitam validar os métodos propostos, além da produção de artigos científicos, patentes e publicações em anais de congressos nacionais e internacionais.

1.3 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA

A crescente demanda por métodos experimentais acessíveis para análise de tensões e deformações em peças e componentes justifica a escolha deste tema, especialmente devido ao elevado custo e à indisponibilidade de equipamentos sofisticados em muitos centros de pesquisa e instituições educacionais. Este trabalho busca oferecer soluções acessíveis,

utilizando recursos de baixo custo e tecnologias emergentes, para ampliar o alcance dessas técnicas.

Além disso, o desenvolvimento de métodos experimentais simplificados e eficientes contribui para a democratização do conhecimento científico e tecnológico, permitindo que instituições de pequeno e médio porte, bem como pesquisadores de regiões diversas, possam realizar estudos avançados sem grandes investimentos. Com isso, fomenta-se não apenas a inovação científica e tecnológica, mas também o aprendizado em áreas como engenharia e ciências aplicadas, promovendo a formação de profissionais qualificados.

Finalmente, este estudo se alinha ao compromisso ético de engenheiros e pesquisadores em promover soluções sustentáveis e acessíveis, visando ao desenvolvimento científico e industrial do país, especialmente em áreas estratégicas como o setor aeroespacial, automotivo e metalmeccânico.

1.4 IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este estudo tem impacto significativo em múltiplas dimensões: Cientificamente, promove avanços em métodos experimentais acessíveis para análise de campos de tensões e deformações, utilizando fotoelasticidade e correlação digital de imagens (DIC) em engrenagens e outras peças de resinas foto-polimerizadas; No âmbito técnico e inovador, destaca-se pelos resultados obtidos com uso de recursos de baixo custo e não profissionais, como lentes CPL, filmes polarizadores e peças fabricadas em impressoras MSLA (Masked Stereolithography Apparatus) ampliando a aplicabilidade de tecnologias sofisticadas e também destaca-se com o desenvolvimento de patentes, artigos e publicações em anais de congressos internacionais; Social e educacionalmente, democratiza e amplia a capacidade de visualização e acompanhamento de fenômenos relacionados as técnicas de análises experimentais, tornando-as viáveis para instituições ou pesquisadores com recursos limitados, fomentando a formação de pesquisadores e o aprendizado em engenharia, ciências aplicadas e ensino profissionalizante. Economicamente, reduz custos associados a equipamentos especializados, incentivando pesquisas em pequenos centros e regiões menos favorecidas; culturalmente, contribui para a disseminação do conhecimento científico e tecnológico; economicamente, a redução de custos em tecnologias experimentais cria oportunidades para pequenas e médias empresas locais inovarem em seus processos, estimulando o crescimento econômico sustentável. A pesquisa também reforça a internacionalização, ao demonstrar sua aplicabilidade em estudos globais, e a inserção regional e nacional, promovendo soluções de

baixo custo para desafios industriais, especialmente em setores relevantes para a região como aeroespacial, automotivo, metal-mecânico e químico contribuindo para o fortalecimento da competitividade industrial do Vale do Paraíba. No âmbito do desenvolvimento sustentável, o estudo promove o uso eficiente de recursos e materiais acessíveis, alinhando-se aos objetivos globais de sustentabilidade.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

No Capítulo 1, apresenta-se a introdução relacionada aos desafios enfrentados no projeto e manutenção de engrenagens, destacando sua importância como elementos de transmissão de torque e velocidade em sistemas mecânicos. São discutidos os principais fatores que influenciam o desempenho das engrenagens, como tensões de flexão e contato, bem como os impactos econômicos, sociais e ambientais das falhas. Também são abordados os avanços nas análises experimentais e técnicas, incluindo a fotoelasticidade e a correlação digital de imagens (DIC), ressaltando sua relevância para a otimização do design. Por fim, apresentam-se os objetivos do estudo, enfatizando a democratização de métodos experimentais acessíveis e a justificativa para o desenvolvimento deste trabalho, com foco na ampliação do acesso ao conhecimento técnico e científico.

No Capítulo 2 e 3 são apresentados a revisão da literatura e fundamentação teórica sobre fabricação aditiva, comportamento de materiais poliméricos, além de análise experimental de fotoelasticidade e DIC. São discutidos modelos constitutivos tridimensionais, tensões e deformações em discos circulares e o impacto de técnicas como perfilamento em engrenagens. Também são analisados métodos experimentais e computacionais aplicados ao comportamento de materiais, destacando lacunas na literatura relacionadas à análise de tensões em peças produzidas em resina por manufatura aditiva.

No Capítulo 4, são apresentados os estudos e experimentos realizados: A classificação dos parâmetros analisados; O estudo sobre o carregamento estático de engrenagens metálicas desalinhadas com extensômetros; A caracterização da resina utilizada; A aplicação de correlação digital de imagens (DIC) com testes de viabilidade em transdutor; em chapas finas com concentradores de tensão e em engrenagens de aço; Os ensaios de compressão em discos de resina, incluindo fotoelasticidade e testes de DIC; O experimento sobre o índice de refração da resina; Os métodos numéricos e analíticos empregados; A análise dos campos de tensão nos discos de resina com fotoelasticidade; Os estudos sobre desalinhamento radial das engrenagens de resina utilizando DIC, fotoelasticidade e extensômetros, e por último o estudo

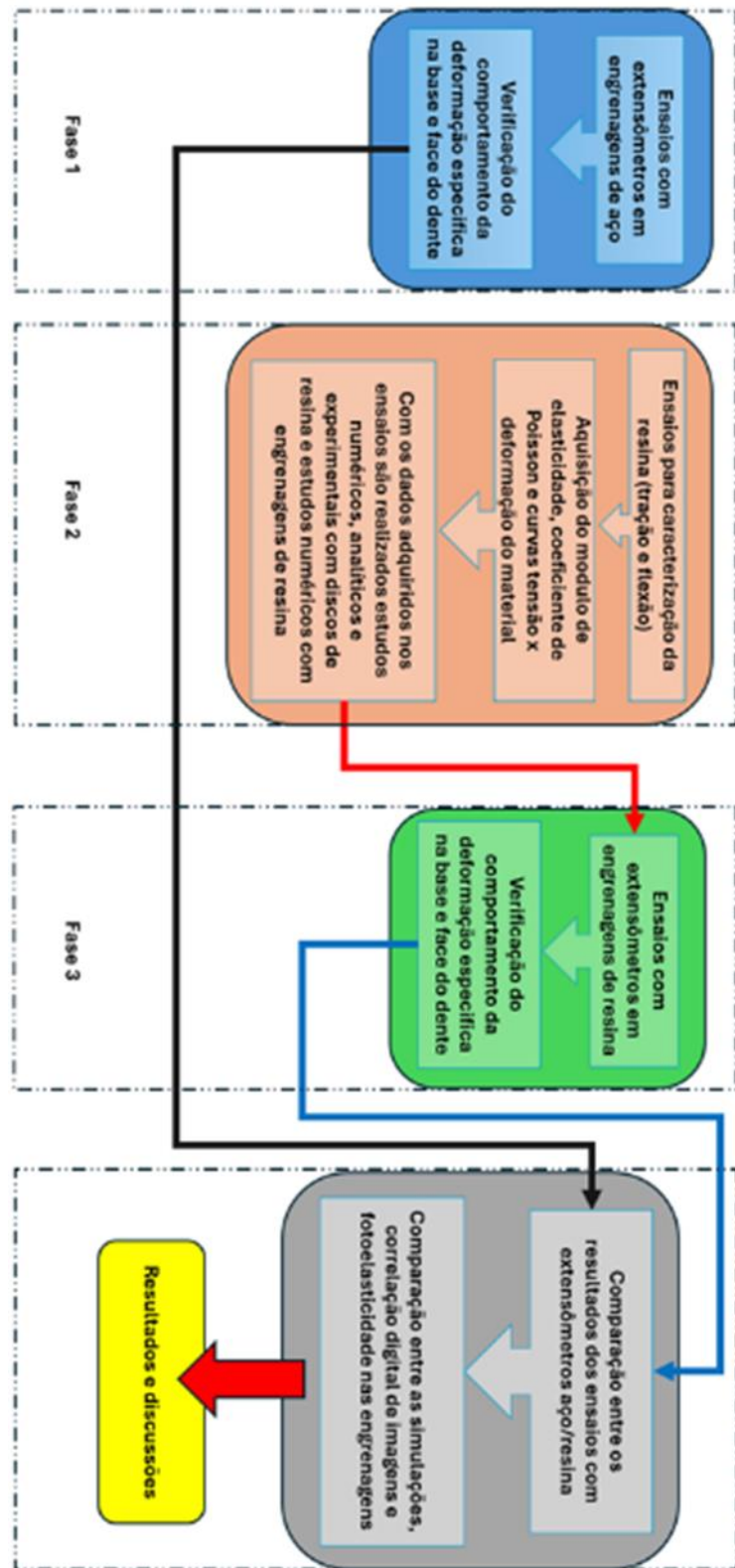
numérico e experimental para a visualização dos campos de tensão e deformação das engrenagens de resina.

No Capítulo 5, são apresentados e discutidos: os resultados dos experimentos realizados; as imagens geradas nos métodos estudados; os resultados dos ensaios mecânicos com a resina utilizada e dos campos de tensão e deformação visualizados nos discos e engrenagens peças produzidas em resina por manufatura aditiva.

No Capítulo 6, todas as conclusões obtidas pela realização deste trabalho são mostradas, além de sugestões para trabalhos futuros.

As fases de desenvolvimento da tese são ilustradas em forma de fluxograma conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Fases do desenvolvimento da tese divididas em quatro blocos

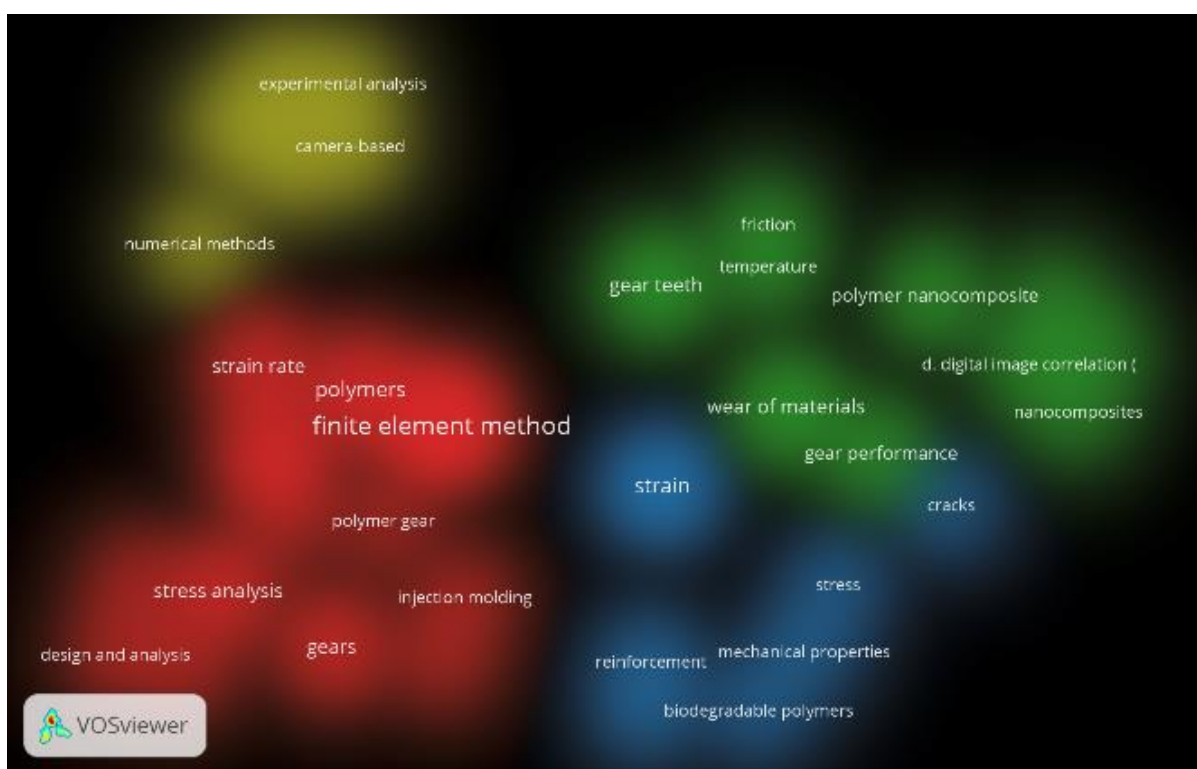


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura é uma ferramenta fundamental para a pesquisa acadêmica, pois permite compreender o contexto atual de um tema, identificar lacunas no conhecimento e apontar oportunidades de contribuição na área estudada (Xiao E Watson, 2019; Lukasiewicz, 2022). Nesse processo, a utilização de softwares como o VOSviewer, que possibilita a construção de representações gráficas de dados Bibliométricos (Van Eck E Waltman, 2017), é de grande valor. Por meio desse software, foi realizada uma análise de termos extraídos de resumos e títulos de trabalhos indexados na base Scopus com os termos de busca: "engrenagens + polímeros + experimentos". Essa análise resultou na identificação de quatro clusters principais de pesquisa: azul, verde, vermelho e amarelo conforme a Figura 1.

Figura 1 - Cluster dos temas relacionados a pesquisa



Fonte: adaptado de VOSviewer (2024).

O cluster verde abrange estudos relacionados a materiais e desempenho de engrenagens, como polímeros e compostos. O cluster azul destaca pesquisas focadas em propriedades mecânicas, como deformação, trincas e tensões. Os clusters vermelho e amarelo abordam o design de engrenagens, materiais e análises numéricas, incluindo modelagem de injeção de polímeros. Já o cluster amarelo é associado especificamente a análises

experimentais e métodos numéricos. Com base nesse mapeamento, verificou-se que os trabalhos analisados não evidenciam estudos voltados à proposição de procedimentos experimentais de baixo custo para análise de tensões e deformações em engrenagens ou peças produzidas em resina. Nesse contexto, identificou-se a oportunidade de contribuição desta tese para o desenvolvimento de conhecimento experimental nessa área utilizando manufatura aditiva, atendendo a uma lacuna importante na literatura.

A fabricação aditiva por estereolitografia (MSLA) destaca-se devido à alta resolução e versatilidade na produção de peças. O processo MSLA baseia-se na exposição controlada de resinas fotossensíveis à luz ultravioleta (UV), resultando na solidificação progressiva das camadas sobre uma plataforma de construção (Ligon et al., 2017; Agrawaal e Thompson, 2021; Laguna et al., 2021). A utilização da impressão 3D no ensino de engenharia representa um avanço significativo, proporcionando uma abordagem prática e inovadora para o desenvolvimento das habilidades dos estudantes. A capacidade de criar modelos tridimensionais tangíveis e funcionais permite que os alunos visualizem conceitos complexos, como geometria espacial e design de peças mecânicas, de maneira mais concreta. Isso não apenas facilita a compreensão teórica, mas também promove uma aprendizagem mais eficaz, pois os estudantes podem explorar, testar e aprimorar suas ideias de forma prática, estimulando o pensamento crítico e a resolução de problemas (Hernandez e Morales, 2019; Pikkarainen e Piili, 2020; Chong et al., 2019). Essa experiência prática não apenas fortalece a conexão entre a teoria e a prática, mas também promove a inovação e a criatividade, preparando os estudantes para enfrentar os complexos cenários de design e produção que encontrarão em suas carreiras profissionais (Hernandez e Morales, 2019; Pikkarainen e Piili, 2020; Chong et al., 2019). A impressão 3D não apenas oferece uma abordagem pedagógica avançada, mas também destaca a resistência e versatilidade dos materiais utilizados nesse processo, ampliando ainda mais a eficácia do ensino de engenharia. Materiais como plásticos de engenharia, polímeros reforçados e metais são frequentemente empregados na fabricação aditiva, proporcionando propriedades mecânicas robustas e adaptáveis (Liu et al., 2021; Saleh et al., 2021; Kumar e Sathiya, 2021).

A habilidade de compreender as simulações e análises de elementos finitos amplia ainda mais as possibilidades oferecidas pela capacidade de imprimir estruturas complexas e peças customizadas com diferentes graus de resistência. Ao integrar simulações computacionais, os estudantes podem aprofundar sua compreensão da interação entre design e desempenho, explorando virtualmente as propriedades materiais e comportamento da estrutura antes mesmo da fabricação física. Essa abordagem proporciona uma exposição prática à diversidade

de materiais disponíveis na impressão 3D, capacitando os futuros engenheiros a fazerem escolhas fundamentadas na seleção de materiais para projetos reais. Ao considerar fatores como a resistência por meio de simulações de elementos finitos, os estudantes fortalecem sua formação técnica e aprimoram sua capacidade de inovação, contribuindo para um desenvolvimento mais eficiente e sustentável no campo da engenharia (Bailey, 2015; Zamani, 2016; Sidhu, 2022).

Nesse contexto, diversos estudos destacam abordagens teóricas e práticas que integram conceitos avançados de mecânica dos materiais. Ao implementar numericamente um modelo constitutivo para polímeros amorfos, Bernard et al. (2017) inovaram ao integrá-lo ao software de elementos finitos (Abaqus), permitindo sua aplicação prática em diversos cenários industriais. O modelo foi validado por meio de testes de compressão e simulações demonstrando sua eficácia na previsão do comportamento de materiais sob condições extremas.

O desenvolvimento de modelos constitutivos tridimensionais que descrevem o comportamento viscoelástico não linear de materiais compósitos foi avançado por Varna e Pupure (2023), que consideraram alterações no estado do material, como envelhecimento físico e variações no grau de cura. Foram desenvolvidos dois modelos com diferentes níveis de complexidade e precisão, que demonstraram sua aplicabilidade em análises numéricas de cargas multiaxiais, evidenciando como condições tridimensionais diferem significativamente de condições unidimensionais em termos de tensões e deformações, destacando a importância de modelos 3D para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

O comportamento de polímeros e compósitos sob grandes deformações foi descrito por Abu Al-Rub, Tehrani e Darabi (2015), que desenvolveram um modelo constitutivo abrangente, integrando viscoelasticidade, viscoplasticidade e viscodano. O modelo foi validado com dados experimentais obtidos sob várias condições de carga, como testes de fluência e testes de taxa de deformação constante, demonstrando sua capacidade de capturar o comportamento complexo desses materiais. A simulação de fraturas em polímeros viscoelásticos usando o método de campo de fases foi modelada por Yin e Kaliske (2020), que combinaram viscoelasticidade com mecanismos de fratura dependentes da taxa de deformação, validando-o em elastômeros. Estudos numéricos representativos foram conduzidos para demonstrar a capacidade do modelo em aplicações mais gerais, com resultados que mostraram boa concordância entre simulações e experimentos.

Segundo Kamenskikh, Nosov e Bogdanova (2023), a escolha do modelo matemático pode influenciar significativamente a descrição de materiais poliméricos. A categorização dos

modelos em três grupos principais (elástico, elasto-plástico e viscoelástico) revelou que a descrição precisa do comportamento do material é essencial para pesquisas de engenharia computacional. Essas descrições permitem previsões qualitativas do desempenho de uma estrutura ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, o estudo analisa os impactos dessa escolha em problemas de contato e deformação, estabelecendo uma ligação crítica entre descrição teórica e aplicação prática.

Curtis, Hanna e Patterson (2003), investigaram o uso da estereolitografia para fabricar modelos tridimensionais para análise fotoelástica. Embora a técnica permita a criação rápida de componentes complexos, foram identificados desafios, como a birrefringência residual no processo. Para resolver esses problemas, foram propostas metodologias para minimizar tais efeitos, e comparações foram feitas entre as propriedades das resinas utilizadas. Nesse campo, destaca-se a revisão abrangente de Ramesh e Sasikumar (2020) sobre os avanços da fotoelasticidade digital nas últimas três décadas. Eles destacaram como essa técnica evoluiu para resolver problemas complexos de engenharia, enfatizando aplicações recentes em áreas como biomedicina, engenharia civil e engenharia mecânica, ao mesmo tempo que incentivaram a exploração de novos desafios usando essa técnica.

A anisotropia óptica de materiais impressos em 3D e sua aplicação na fotoelasticidade foram descritas por Ren e Ju (2023), que observaram como as camadas formadas durante a impressão afetam a propagação da luz e o comportamento óptico dos materiais. Seus resultados contribuem para uma compreensão mais profunda da interação entre a microestrutura e as propriedades ópticas, sendo valiosos para a otimização de materiais em análises mais precisas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, a fundamentação teórica é baseada na análise do problema do disco carregado, um caso clássico da mecânica dos sólidos que permite determinar tensões e deformações por meio da teoria da elasticidade. As equações fundamentais de equilíbrio, compatibilidade e relações constitutivas são empregadas para modelar o comportamento do material, considerando suas condições de contorno específicas.

A fotoelasticidade é utilizada como método experimental para visualizar tensões internas, enquanto a lei de Snell é empregada para determinar o índice de refração dos materiais utilizados. No contexto de engrenagens, o perfilamento dos dentes é analisado como solução para melhorar a distribuição da carga e reduzir desgastes. Além disso, o estudo do contato elástico permite compreender as tensões geradas entre superfícies em contato, considerando fatores como módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson.

Por fim, são abordadas as consequências do desalinhamento das engrenagens, que têm um impacto direto na distribuição de tensões e na durabilidade do sistema. Essa análise integral permite uma compreensão mais profunda do comportamento mecânico dos sistemas de engrenagens e contribui para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e duráveis.

3.1.1 Problema do disco carregado

O problema do disco circular com carga concentrada na borda é um clássico exemplo de análise de mecânica dos sólidos, especificamente em resistência dos materiais. Esse problema envolve uma placa circular ou disco submetido a uma carga distribuída ao longo de sua borda, enquanto o centro do disco permanece sem carga. Características do problema: O disco tem espessura constante; A carga é concentrada na borda do disco e pode ser uniformemente distribuída ou variar em diferentes pontos da borda; Condições de contorno são definidas pela carga aplicada na borda e pelas condições de suporte ou fixação do disco; O material do disco é considerado homogêneo e isotrópico, com propriedades conhecidas (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson).

A análise desse problema é feita utilizando as equações que descrevem o estado de tensão e deformação no disco devido à carga aplicada. Isso geralmente é feito usando a teoria da elasticidade, que relaciona as tensões e deformações no material.

As equações governantes incluem:

- Equilíbrio: as equações de equilíbrio garantem que a soma das forças em cada direção é zero;
- Compatibilidade: as equações de compatibilidade garantem que as deformações sejam consistentes com o campo de deslocamento.
- Constitutiva: a lei de Hooke relaciona tensões e deformações para materiais lineares elasticamente.

As equações que governam o problema do disco circular segundo Timoshenko, 1970; Hearn, 1985:

Equação de Equilíbrio Radial:

$$\sigma_r, r + \frac{(\sigma_\theta - \sigma_r)}{r} = 0 \quad (1)$$

Equação de Equilíbrio Circunferencial (Tangencial):

$$\sigma_\theta, \theta + \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0 \quad (2)$$

Equação de Compatibilidade Radial:

$$\varepsilon_r, r + \frac{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_r)}{r} = 0 \quad (3)$$

Equação de Compatibilidade Circunferencial:

$$\varepsilon_\theta, \theta + \frac{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)}{r} = 0 \quad (4)$$

Relação entre Tensão e Deformação:

Tensão Radial:

$$\sigma_r = E \times \frac{(\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\theta)}{(1 - \nu^2)} \quad (5)$$

Tensão Circunferencial:

$$\sigma_\theta = E \times \frac{(\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_r)}{(1 - \nu^2)} \quad (6)$$

Condições de Contorno:

Carregamento na Borda:

$$\sigma_r(r = b) = p \quad (7)$$

Condição de Suporte:

$$u(r = a) = 0 \text{ (deslocamento radial nulo no centro)} \quad (8)$$

Onde:

- σ_r tensão radial
- σ_θ tensão circunferencial
- ε_r deformação radial

- ε_θ deformação circumferencial
- E módulo de elasticidade
- ν coeficiente de Poisson
- r distância radial
- b raio externo do disco
- a raio interno do disco (ou centro)
- p pressão aplicada na borda
- u deslocamento radial

Essas equações formam um sistema de equações diferenciais parciais que precisam ser resolvidas para obter as tensões e deformações no disco.

3.1.2 Fotoelasticidade

A fotoelasticidade é um método experimental permite visualizar e quantificar tensões mecânicas internas em peças utilizando o comportamento óptico anisotrópico que surge quando os materiais estão submetidos a esforços. Quando um material transparente é submetido a tensões, ele se torna birrefringente: o índice de refração deixa de ser uniforme e passa a depender da direção da luz polarizada que atravessa o material. Essa birrefringência ocorre devido à deformação da rede cristalina ou molecular do material, o que faz com que ondas luminosas polarizadas em diferentes direções se propaguem com velocidades distintas.

A diferença nos índices de refração para cada direção principal de tensão cria um desvio da luz, que pode ser analisado por interferência óptica: Franjas isocromáticas resultam da diferença de índices de refração devido à tensão, permitindo medir a magnitude das tensões principais; Franjas isóclinas indicam a orientação das tensões principais em cada ponto; Diferença de fase entre os raios resultantes, que depende da diferença nos índices de refração, é usada para calcular a tensão (Liang e Ismail,2019; Stoehr et al.,2020; Lipovskii et al.,2023). As equações 1-12 estão relacionadas às distribuições de tensões nas direções x , y e no plano xy para discos carregados pontualmente conforme a Figura 2.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{-2P}{\pi h} \begin{Bmatrix} \frac{(R-y)x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y)x^2}{r_2^4} - \frac{1}{D} \\ \frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{D} \\ \frac{(R+y)^2x}{r_2^4} + \frac{(R-y)^2x}{r_1^4} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

- $r_1 = \sqrt{x^2 + (R - y)^2}$;
- $r_2 = \sqrt{x^2 + (R + y)^2}$;
- P : Carregamento [N]
- h : Espessura do Disco [mm]
- R : raio do disco [mm]
- $D = 2R$;

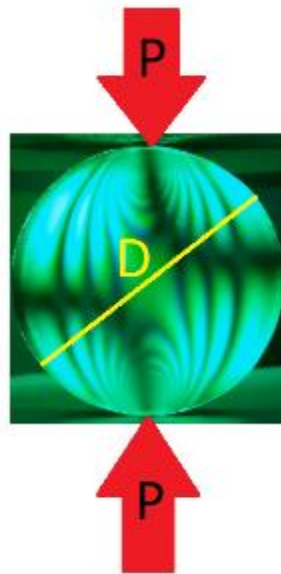
$$\epsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (10)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad (11)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{E/2(1+\nu)} \quad (12)$$

- ν : Coeficiente de Poisson.

Figura 2 – Exemplo de disco de resina carregado pontualmente, as franjas são geradas por experimento de fotoelasticidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.1.3 Equação de Snell e índice de refração

A equação de Snell, também conhecida como Lei de Snell-Descartes, descreve como a luz se comporta ao atravessar a interface entre dois meios com índices de refração diferentes. Ela estabelece a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de refração da luz ao passar de um meio para outro (Gonçalves, 2019). Neste trabalho este conceito foi importante para determinar o índice de refração da resina utilizada e verificar a qual material ela se aproxima.

$$n_1 \times \sin\theta_1 = n_2 \times \sin\theta_2 \quad (13)$$

n_1 e n_2 são os índices de refração dos dois meios;

θ_1 é o ângulo de incidência, medido entre o raio incidente e a normal à superfície;

θ_2 é o ângulo de refração, medido entre o raio refratado e a normal à superfície.

3.1.4 Perfilamento de engrenagens

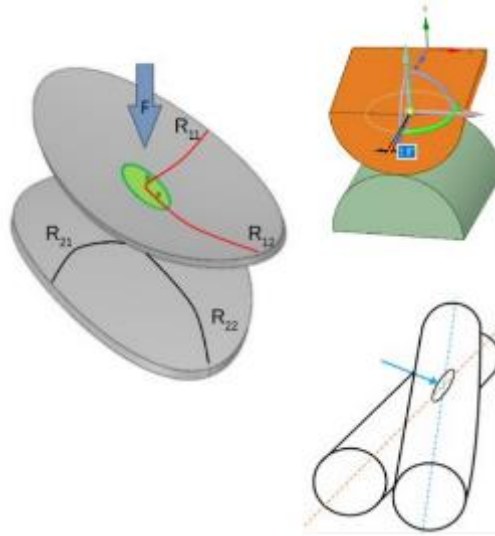
Perfilamento é um termo utilizado para descrever o processo de modificar o perfil dos dentes de uma engrenagem, de modo que a superfície da face do dente fique convexa. Essa modificação cria um perfil em forma de arco circular na superfície do dente, fazendo com que a face do dente seja projetada do centro para a borda do dente. O uso do perfilamento desloca a carga máxima das bordas do flanco do dente reduzindo o risco de altas pressões de contato nesta região (Kubota, 1963; Bergseth e Björklund, 2010). O objetivo do perfilamento é melhorar o contato entre duas engrenagens em funcionamento, reduzindo o risco de concentração de pressão nos flancos dos dentes.

Ao criar um contato mais localizado na região central dos dentes e evitando o contato na borda, o perfilamento ajuda a distribuir melhor a carga ao longo da superfície de contato, reduzindo o desgaste (KHK, 2021). Essa técnica de modificação dos dentes das engrenagens é frequentemente usada para compensar desalinhamentos e imperfeições de fabricação, melhorando o desempenho e a vida útil das engrenagens. O processo de montagem pode apresentar erros de paralelismo de dois eixos ou excentricidade ao montar as engrenagens nos eixos. Isso se deve a outros elementos que geram interferência causada por usinagem imprecisa da carcaça, alojamento, eixos, caixas de engrenagens ou mancais (KHK, 2021).

3.1.5 Caso geral ou generalizado do estudo de contato

No caso geral ou generalizado do estudo de contato (segundo a teoria da elasticidade), quando os sólidos são pressionados por uma força externa, eles criam uma área de contato delimitada por uma elipse (Timoshenko e Goodier, 1970), como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Região de contato entre os sólidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na região de contato, ocorrem trações nas direções normal e tangencial devido à carga externa. Essas tensões tangenciais e normais são acompanhadas por um campo elástico de deslocamentos, deformações e tensões nos corpos (Kalker, 1990).

De acordo com a equação 14 (Juvinall e Marshek, 2008; Timoshenko e Goodier, 1970; Sackfield e Hills, 1983), a força F atuante entre dois sólidos é igual ao volume do semi-elipsoide gerado pelos semidiâmetros a e b da região elíptica. A pressão máxima devido a essa interação ocorre no centro da superfície de contato elíptica.

$$F = \iint p dA = \left(\frac{2}{3} \pi ab \right) p_{\max} \quad (14)$$

Os semidiâmetros a e b são definidos a partir das equações 15 e 16 (Norton, 2013; Juvinall e Marshek, 2008):

$$a = k_a \sqrt[3]{\frac{3F \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}{4A}} \quad (15)$$

$$b = k_b \sqrt[3]{\frac{3F \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}{4A}} \quad (16)$$

Onde:

F é a força atuante no sistema;

ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson dos sólidos 1 e 2, respectivamente;

E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade dos sólidos 1 e 2, respectivamente;

α e b são coeficientes dependentes de constantes geométricas dos sólidos 1 e 2, de acordo com as equações 17 e 18 (Norton, 2013; Juvinall e Marshek, 2008):

$$k_a = 50,192\varphi^{-0,86215} \quad (17)$$

$$k_b = 0,0045333 + 0,043581\varphi - 0,0017292\varphi^2 + 3,7374E - 5\varphi^3 - 3,7418E - 7\varphi^4 + 1,4207E - 9\varphi^5 \quad (18)$$

φ é definido por $\cos^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$. As constantes geométricas A e B dependem do raio de curvatura dos sólidos em contato, conforme as equações 19 e 20 (Norton, 2013; Juvinall e Marshek, 2008):

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right) \quad (19)$$

$$B = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) \cos 2\theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

onde:

R_1, R_1' são os raios do sólido 1;

R_2, R_2' são os raios do sólido 2;

θ (em graus) ocorre entre planos que contêm os raios R_1 e R_2 dos dois corpos

As equações 21, 22 e 23 referem-se às principais tensões atuantes na linha central da superfície dos corpos (Juvinall e Marshek, 2008; Timoshenko e Goodier, 1970; Sackfield e Hills, 1983). Essas tensões são compressivas e seus valores são máximos na superfície. As tensões diminuem significativamente, aumentando a profundidade e a distância a partir da linha central.

$$\sigma_x = - \left[2\nu + (1 - 2\nu) \frac{b}{a+b} \right] p_{\max} \quad (21)$$

$$\sigma_y = - \left[2\nu + (1 - 2\nu) \frac{a}{a+b} \right] p_{\max} \quad (22)$$

$$\sigma_z = -p_{\max} \quad (23)$$

A tensão de cisalhamento máxima abaixo da superfície, devido às tensões normais no plano xy, é definida de acordo com a equação 24 (Juvinall e Marshek, 2008; Timoshenko e Goodier, 1970).

$$\tau_{xy} = 0,304p_{\max} \quad (24)$$

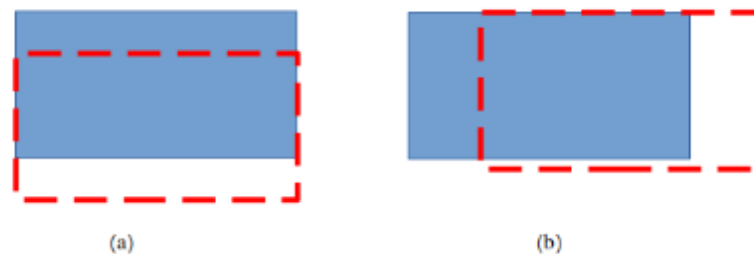
A tensão equivalente σ' na equação 25 é uma tensão hipotética de tração uniaxial que produziria a mesma energia de distorção criada pela combinação real de tensões envolvidas no sólido (Norton, 2013; Juvinall e Marshek, 2008).

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (25)$$

3.1.6 Desalinhamento radial e axial em engrenagens

As engrenagens estão sujeitas a desalinhamento radial quando os dentes da engrenagem são afastados um do outro conforme a Figura 4 (a), aumentando a distância centro a centro enquanto os eixos permanecem paralelos. Ele reduz a área de contato dos dentes enquanto a folga e a flexão do dente aumentam à medida que a região de contato da malha se move mais perto do adendo ou ponta do dente. Quando submetida a desalinhamento axial Figura 4 (b), a distância centro a centro das engrenagens permanece inalterada, mas uma engrenagem é avançada ao longo de seu eixo para frente, de modo que o contato é perdido ao longo de parte de sua largura de face. Embora a relação de contato e a folga permaneçam iguais, a área de contato diminui levando ao aumento das tensões de contato e deformação (Kandil, 2014; Kumar, 2019).

**Figura 4 - Representação simplificada do desalinhamento entre dentes de engrenagens
(a) Radial, (b) Axial**



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.1.7 Classificação dos parâmetros estudados

Os parâmetros podem ser definidos em duas classes: determinísticos e estocásticos. Parâmetros determinísticos são frequentemente utilizados em matemática ou modelagem científica, que visam fornecer previsões ou descrições precisas de um sistema assumindo que todas as entradas e variáveis são conhecidas e que o valor do parâmetro sempre será o mesmo e seu resultado pode ser determinado com precisão (Krone, 2004). Por outro lado, os parâmetros estocásticos ou aleatórios introduzem incerteza no modelo permitindo variações ou resultados probabilísticos (Krone, 2004). Os parâmetros estocásticos possuem valores que estão sujeitos a aleatoriedade, e seus resultados não podem ser previstos com certeza.

Neste estudo do campo de tensões de engrenagens, alguns dos parâmetros determinísticos considerados foram:

- Geometria da engrenagem: A geometria da engrenagem, incluindo o número de dentes, módulo, ângulo de pressão, perfil do dente. Eles influenciam diretamente a distribuição de tensões na engrenagem.
- Material da engrenagem: As propriedades físicas e mecânicas do material utilizado na fabricação da engrenagem. Essas propriedades incluem a resistência à tração, dureza, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. O material afeta a capacidade da engrenagem de suportar cargas e determina sua resposta às tensões aplicadas.
- Condições de carregamento: Os parâmetros relacionados às condições de carregamento incluem a magnitude da carga, direção da carga, torque aplicado. Esses parâmetros influenciam a distribuição de tensões na engrenagem.
- Contato e interação entre engrenagens: Os parâmetros relacionados ao contato entre as engrenagens, como a largura de contato e o raio da face dos dentes também afetam a distribuição de tensões nos pontos de contato.

No estudo do campo de tensões de engrenagens, alguns dos parâmetros estocásticos que podem ser considerados incluem:

- Variações dimensionais: Existem variações dimensionais nas engrenagens devido a processos de fabricação, montagem e desgaste. Essas variações podem ser tratadas como parâmetros estocásticos, afetando as tensões nas engrenagens.
- Propriedades do material polimérico devido aos parâmetros de produção: Embora as propriedades do material sejam frequentemente tratadas como parâmetros determinísticos,

elas também podem apresentar alguma variação. No caso dos polímeros devido ao tempo de cura, absorção de umidade, espessura e disposição das camadas as propriedades mecânicas como resistência à tração, dureza e módulo de elasticidade, podem ter uma distribuição estatística dentro de uma faixa de valores aceitável.

- Cargas variáveis: As cargas aplicadas nas engrenagens podem variar devido a condições de operação variáveis, como mudanças na área de contato ou alinhamento. Essas variações nas cargas podem ser modeladas como parâmetros estocásticos, influenciando as tensões nas engrenagens.

3.1.8 Modelos Numéricos e Elementos Estudados

Os métodos numéricos utilizados nas simulações de contato foram: “Pure Penalty”, “Multi-Point Constraint” (MPC) e Normal Lagrange. O método “Pure Penalty” envolve adicionar um termo de penalidade para melhorar o processo de solução. Esse termo de penalidade inclui a matriz de rigidez na superfície de contato analisada. A matriz resulta do conceito de resistência à penetração imaginária entre corpos (Stefancu et al., 2011; ANSYS, 2007).

A Formulação Lagrange adiciona um grau adicional de liberdade, como a pressão de contato, para satisfazer a compatibilidade de contato (Lanoue et al., 2009). Consequentemente, em vez de resolver a força de contato, como a rigidez e a penetração do contato, a força de contato (pressão de contato) é explicitamente resolvida como uma restrição adicional (Hattori e Serpa, 2015). O método Normal Lagrange é assim chamado porque a fórmula do multiplicador de Lagrange é usada na direção normal, enquanto o método baseado em penalidade é usado na direção tangencial (Lanoue et al., 2009).

O MPC adiciona internamente equações de restrição para relacionar os deslocamentos entre as superfícies de contato. Essa abordagem não é baseada nos métodos anteriores. É uma maneira direta e eficiente de relacionar superfícies de regiões de contato que estão unidas ou conectadas (Zhang et al., 2012; Xie e Feng, 2009).

Os elementos finitos tridimensionais, como hexaedros, tetraedros, pirâmides e prismas, são utilizados em análises de elementos finitos para modelar diferentes formas e estruturas, sendo escolhidos com base nas características da geometria e do problema (Ansys, 2021; Moaveni, 2020; Huebner, 2008). Elementos de contato e interface são empregados para simular interações entre corpos, e elementos de fronteira são usados para

modelar comportamentos nas superfícies de um domínio (Zhang et al., 2012; Xie e Feng, 2009).

O elemento SOLID186 é um sólido tridimensional de 20 nós, utilizado para modelar materiais e estruturas em 3D. Ele é de ordem quadrática e adequado tanto para análises lineares quanto não lineares, incluindo grandes deformações e comportamentos plásticos. Cada nó do SOLID186 possui três graus de liberdade (deslocamentos nas direções X, Y e Z), tornando-o ideal para modelar geometrias complexas e peças com curvaturas. Além disso, suporta análises que envolvem elasticidade, plasticidade e fluência dos materiais. Já o elemento CONTA174 é projetado para definir superfícies de contato em análises tridimensionais. Esse elemento, que possui 8 nós, é frequentemente empregado em simulações de contato não linear e deve ser utilizado em conjunto com elementos de destino, como o TARGE170, para modelar a interação entre superfícies que podem se tocar, deslizar ou separar. CONTA174 também permite a inclusão de efeitos como atrito, adesão e separação durante o contato (Ansys,2021; Moaveni, 2020; Huebner, 2008).

O TARGE170 atua como uma superfície-alvo em análises de contato tridimensionais. Ele é usado para modelar superfícies rígidas ou deformáveis que interagem com os elementos de contato, oferecendo suporte a diferentes comportamentos, como deslizamento, atrito e separação entre as superfícies. Por sua vez, o elemento SURF154 é empregado para aplicar carregamentos de superfície em modelos tridimensionais. Ele permite a definição de condições de contorno ou cargas distribuídas, como pressão, temperatura ou convecção, em áreas planas ou curvas de elementos de volume, como o SOLID186 (Ansys,2021; Moaveni, 2020; Huebner, 2008). Esse elemento pode ter 4 ou 8 nós, dependendo do tipo de elemento ao qual está associado. Esses elementos desempenham funções complementares e muitas vezes são usados em conjunto, especialmente em simulações que envolvem contato entre superfícies, como engrenagens, juntas mecânicas e superfícies sujeitas a atrito ou desgaste. SOLID186 é responsável por modelar os sólidos 3D, enquanto CONTA174 e TARGE170 definem a interação entre superfícies. SURF154, por sua vez, permite a aplicação de carregamentos diretamente nas superfícies (Ansys,2021; Moaveni, 2020; Huebner, 2008). Esse conjunto de elementos é fundamental para garantir a precisão em análises complexas envolvendo materiais e contatos mecânicos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DELIMITAÇÃO DAS FERRAMENTAS NUMÉRICAS E ANALÍTICAS

Para todos os modelos analisados foram considerados condições previstas na literatura, assim como as condições de contorno de cada método. Inicialmente, foi simulado o modelo a ser tomado como referência na comparação dos resultados a serem obtidos no estudo. A partir dos dados experimentais foi possível efetuar as simulações numéricas empregando o método dos elementos finitos para previsão das distorções geradas nos campos de tensões de contato. Foram obtidos dados como: tensão normal e de cisalhamento, deformações e deslocamentos. Na realização das simulações numéricas por elementos finitos foi utilizado o programa Ansys®. No desenho das engrenagens foi utilizado o programa Inventor®, desenvolvido pela Autodesk®. No estudo analítico e de correlação digital de imagem foi utilizado o Matlab®. Todos os softwares são disponíveis para estudantes do campus.

4.2 EXPERIMENTOS DESENVOLVIDOS INICIALMENTE PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DEFORMAÇÕES

Inicialmente foram feitos estudos para a verificação e aprendizado do uso de equipamentos e dispositivos de aquisição de dados experimentais. Neste contexto foram realizados ensaios e simulações considerando as engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço, as quais são amplamente discutidas na literatura conforme (Juvinal e Marshek, 2008; Timoshenko e Goodier, 1970; Sackfield e Hills, 1983) para a verificação do comportamento relacionado às tensões e deformações devido ao contato entre os dentes. Considerando o carregamento estático dessas engrenagens em condições de desalinhamento radial e axial segundo Kumar (2019) os resultados seriam mais evidentes aos métodos numéricos e experimentais utilizados (Extensômetros e correlação digital de imagens, DIC). Assim esses resultados iniciais futuramente seriam utilizados como base de comparação com os resultados adquiridos com as engrenagens de resina geradas por manufatura aditiva conforme o Quadro 1.

4.2.1 Estudo sobre carregamento estático de engrenagens metálicas desalinhadas com extensômetros

Nesse experimento foram utilizadas duas engrenagens cilíndricas de dentes retos de módulo 3 com largura dos dentes de 28 mm e relação de redução de 1/2. O objetivo do experimento foi coletar dados precisos sobre as deformações específicas nas regiões dos dentes da engrenagem causadas pelo desalinhamento axial, utilizando extensômetros. Inicialmente, foram empregadas engrenagens de aço, cujo comportamento dos campos de tensão e deformação são amplamente conhecidos na literatura. Posteriormente, esses resultados foram comparados com os de engrenagens de resina impressa, submetidas a condições semelhantes, mas com esforços reduzidos. Essa comparação visa contribuir para preencher a lacuna existente na literatura sobre o comportamento do campo de tensões e deformações em engrenagens de resina impressa sob essas condições.

A engrenagem maior utilizada tinha 40 dentes e atuava como pinhão. O material das engrenagens foi utilizado o aço 1045 segundo o fabricante. O pinhão pode girar o suficiente para ocorrer o contato e travamento do engrenamento, mas não pode deslocar axialmente sobre o eixo. Neste eixo foi fixado um parafuso de cabeça sextavada onde o torque foi aplicado.

A engrenagem menor (coroa) foi fixada no segundo eixo. Este eixo foi desenvolvido de forma que pode se mover no sentido axial do mancal utilizando uma luva com ajuste deslizante gerando o desalinhamento estudado de forma estática. Essa engrenagem não pode girar devido ao bloco engastado na base rígida. A montagem do experimento é ilustrada na Figura 5.

Figura 5 - Montagem do experimento com engrenagens de aço

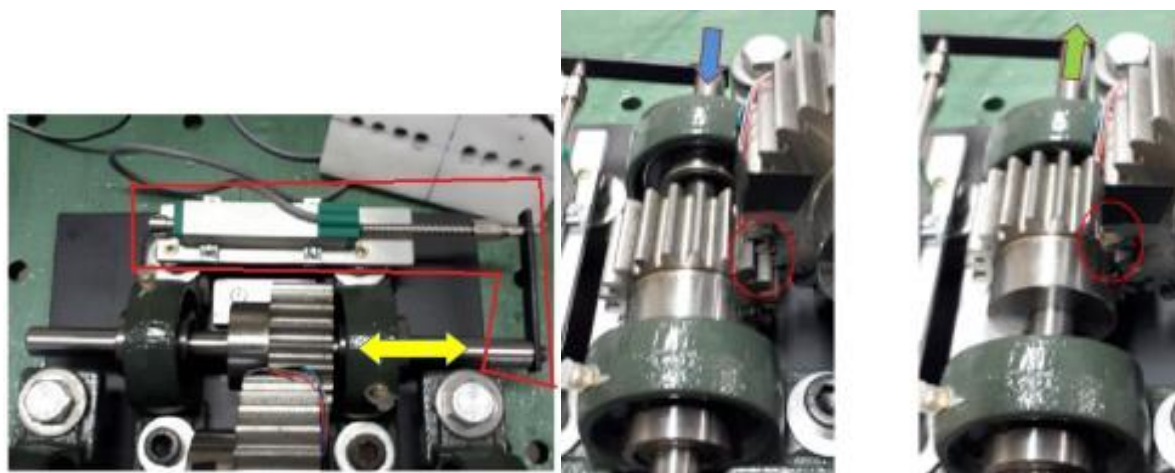


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No caso do desalinhamento axial a distância de centro a centro das engrenagens permanece inalteradas, mas uma engrenagem é movida ao longo de seu eixo de modo que o contato é perdido em parte de sua largura de face. Embora a relação de contato e a folga permaneçam iguais, a área de contato diminui e, devido ao aumento das tensões de contato e deformação, ocorre uma redução na rigidez da malha (Khan et al, 2019; Kumar et al., 2019; Saxena et al.,2015).

O deslocamento foi medido utilizando um sensor resistivo modelo KTC-75 com as características: 5 V de entrada, comprimento útil de 75 mm, resistência de $5\text{ k}\Omega \pm 20\%$ e erro linear de $\pm 0,05\%$, conforme a Figura 6. Variando se o deslocamento da haste do sensor preso paralelamente ao segundo eixo (da coroa móvel), o sinal gerado era enviado a unidade de aquisição de dados do sistema Hbm Catman® onde era exibido em tempo real o valor em milímetros.

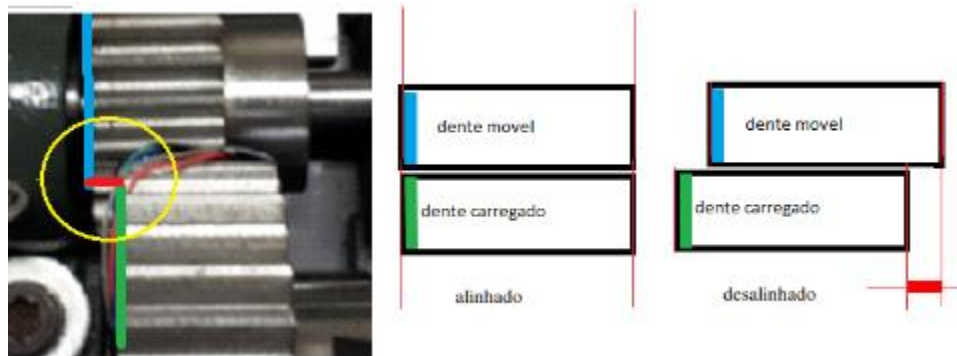
Figura 6 - Sensor utilizado e deslocamento no eixo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os deslocamentos utilizados foram: 0 mm, 2 mm e 8 mm. Conforme a Figura 7 a lateral do pinhão é delimitada pela linha verde, a coroa pela linha azul e a linha vermelha destaca o deslocamento. Ainda considerando a Figura 7 no diagrama foi utilizada a nomenclatura: do dente móvel como o dente da coroa, o carregado como o pinhão.

Figura 7 - Representação dos desalinhamentos entre o dente móvel e o dente carregado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 8 foi ilustrado como se comportou o engrenamento durante os ensaios, ocorre o contato de três dentes da coroa para dois dentes do Pinhão.

Figura 8 - Engrenamento entre o pinhão e a coroa utilizados, mostrando o número de dentes em contato



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O torque foi aplicado no eixo do Pinhão utilizando um torquímetro “de estalo” Flex-click da Geodore ilustrado na Figura 9. Este torquímetro faz um som de estalo quando chega ao torque anteriormente marcado no indicador.

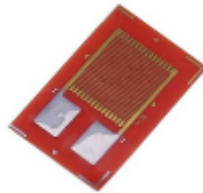
Figura 9 - Torquímetro Flex-click



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para aquisição de dados de deformação específica foram utilizados os extensômetros do modelo BF350-3AA da fabricante HT-Sensor ilustrado na Figura 10 com as características listadas na Tabela 1:

Figura 10 - Extensômetro BF 350-3AA



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

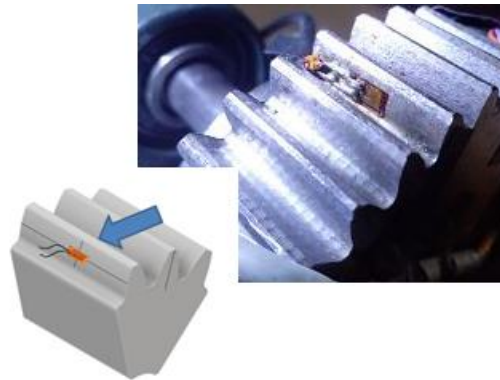
Tabela 1- Características dos extensômetros

Modelo	BF350-3AA
Resistência	350 Ohms
Tolerância de Resistência	$<\pm 0,1\%$
Limite de Deformação	2%
Temperatura de Operação	$-30^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$
Coeficiente de sensibilidade	2.0-2.20
Limite de tensão	2.0%
Material condutor	Constantan

Fonte: : Elaborado pelo autor (2024).

O primeiro ensaio realizado foi a obtenção de sinal no sentido longitudinal do extensômetro fixado na face do dente. O extensômetro foi ligado na configuração de 1/4 de ponte utilizando o sistema de aquisição de dados HBM, aplicando o torque de forma que ocorreria o aumento de forma gradual até o máximo de 40 Nm onde o torquímetro faria um “som de estalo”. A montagem e o diagrama da posição do extensômetro são ilustrados na Figura 11.

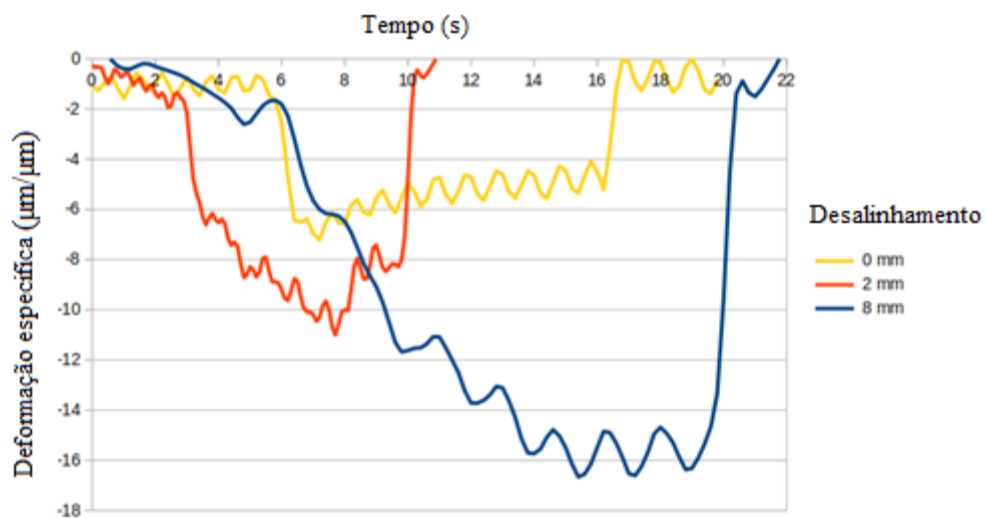
Figura 11 - Extensômetro longitudinal



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Entretanto o uso do torquímetro Flex-click ocorreu em duas consequências: os dados adquiridos tinham um elevado grau de oscilação com baixa sensibilidade e a ruptura da ponta do eixo. Foi gerado um gráfico com os dados da deformação específica em função do tempo devido ao carregamento conforme Figura 12.

Figura 12 - Dados do ensaio longitudinal com torquímetro Flex-click



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para continuar o estudo comportamento deste equipamento junto do sistema de aquisição de dados foi utilizado um torquímetro instrumentado com extensômetros segundo o trabalho de Encarnação (2019) e soldado outro parafuso na ponta do eixo ilustrados na Figura 13 e 14. Assim foi possível acompanhar em tempo real o torque aplicado junto ao sistema de aquisição de dados.

Figura 13 - Torquímetro com extensômetros para aquisição do torque em tempo real



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

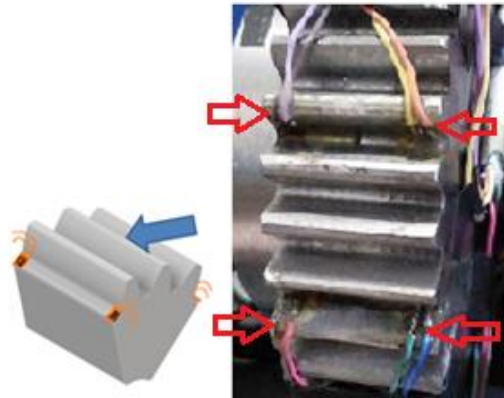
Figura 14 - Novo parafuso soldado na extremidade do eixo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O segundo ensaio realizado com as engrenagens de aço de modulo 3 foi a obtenção de sinal nos quatro extensômetros fixados entre a face e base dos dentes. Os extensômetros foram ligados na configuração de ponte completa utilizando o sistema de aquisição de dados HBM, aumentando o torque de forma gradual até o máximo de 32 Nm com o torquímetro instrumentado. A montagem e o diagrama das posições do extensômetros são ilustrados na Figura 15.

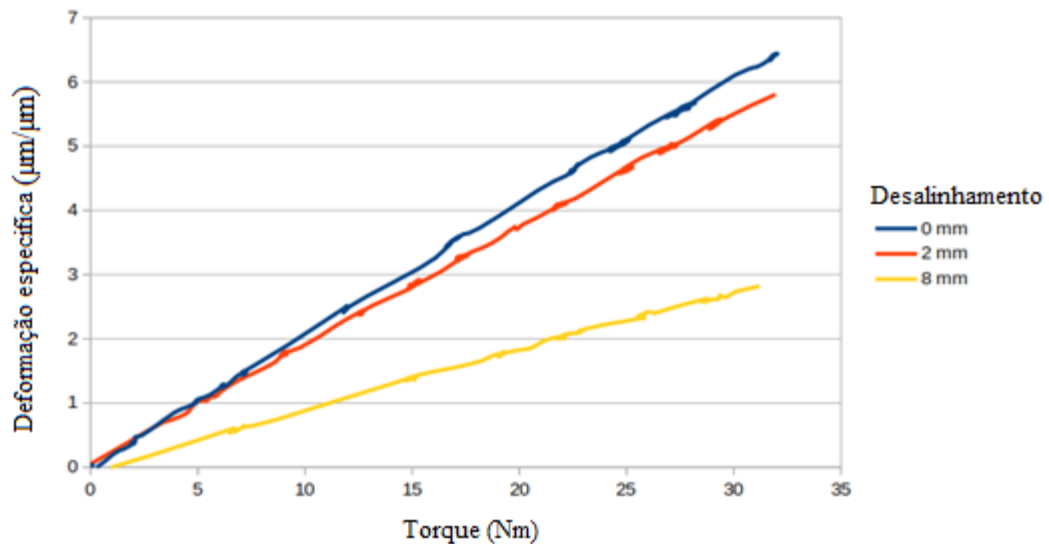
Figura 15 - Montagem da ligação de ponte completa na engrenagem de aço



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Neste ensaio ocorreu uma melhora na aquisição de dados conforme a Figura 16, porque na aquisição de sinais não ocorreu a grande oscilação com baixa sensibilidade. Agora o gráfico foi gerado através dos dados da deformação específica (eixo y) em função do torque aplicado (eixo x).

Figura 16 - Dados adquiridos no experimento com extensômetros ligados em ponte completa na engrenagem de aço



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2.2 Estudo dos métodos numéricos iniciais: Estudo da modificação de geometria

Nesta seção foi realizado um estudo considerando a modificação da geometria dos dentes de engrenagem conhecido como perfilamento e suas implicações sobre o comportamento do campo de tensões e deformações, ou seja, a alteração do caso de contato

cilindro-cilindro para o caso geral ou generalizado de contato conforme Oliveira e Silva, 2021. A engrenagem modificada estudada foi gerada a partir da modificação de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos de módulo igual a 3 com 20 dentes. A face e o flanco foram modificados deslocando os cantos laterais e superiores, gerando uma espessura de perfilamento de 0,2 mm, mantendo a curva envolvente no centro da face e do flanco. As propriedades das engrenagens estão listadas na Tabela 2.

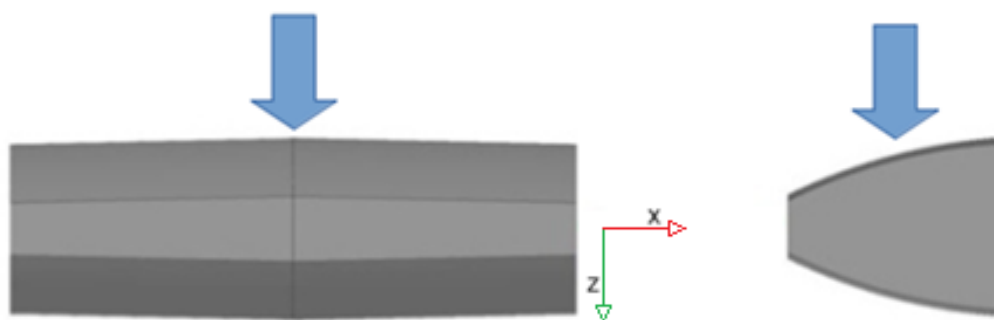
Tabela 2- Propriedades das engrenagens.

Propriedades	
Força externa	100 N
Raio R	18 mm
Raio R'	189 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O sólido gerado foi ilustrado na Figura 17. As engrenagens alteradas mantêm contato apenas na região central do dente (circunferência primitiva) e evitam o contato da borda.

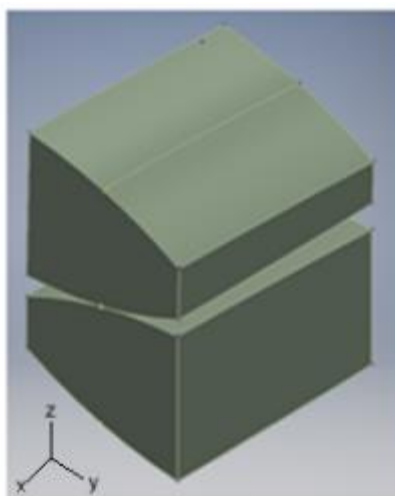
Figura 17 - Dente de engrenagem modificada, vista superior e lateral, as setas azuis indicam a região de contato



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O objetivo deste estudo foi compreender melhor os métodos numéricos utilizados em fenômenos de contato considerando o caso generalizado. O software comercial Ansys foi utilizado para desenvolver a aplicação do método numérico no módulo Static Structural do Workbench. A ferramenta de simetria no plano yz foi utilizada para gerar metade do modelo no Design Modeler como mostrado na Figura 18. Essa característica reduz o tempo de processamento e permite um maior número de elementos na malha.

Figura 18 - Contato entre os dentes perfilados.



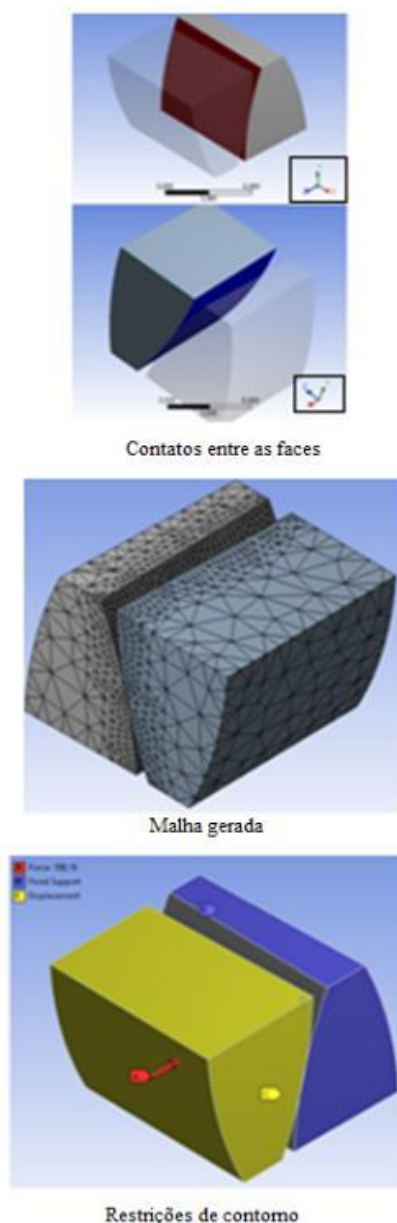
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O material utilizado nos sólidos foi o aço estrutural disponível na biblioteca de materiais do software, com coeficiente de Poisson de 0,3, módulo de elasticidade de 207 GPa, resistência à tração de 250 MPa e resistência última à tração de 460 Mpa semelhante ao ASTM A36.

Nas opções de contato, foram usados o "contact stiffness factor" igual a 0,1, a região "pinball" igual a 10 μm e o contato definido sem separação, considerando que os componentes sempre se tocam durante o carregamento. A região "pinball" é um parâmetro do elemento de contato que diferencia entre o estado do campo aberto ou fechado. Pode ser considerada como uma fronteira esférica ao redor de cada ponto para detecção de contato. Os métodos utilizados foram: Normal Lagrange, "Pure Penalty" e MPC.

A malha foi gerada automaticamente com os elementos: SOLID186, CONTA174, TARGE170 e SURF154 usados para a malha 3D irregular, com os recursos de tamanho adaptativo, transição rápida, suavização média e refinamento de malha usado nas faces de contato dos cilindros, e o refinamento foi realizado na opção três nas faces de contato. As restrições usadas neste sistema limitam o movimento do dente da engrenagem motora nas direções dos eixos x e y, enquanto o dente da engrenagem movida é restrito em todos os eixos. A carga externa usada tem uma intensidade de -100 N na direção do eixo z. Todos esses procedimentos são ilustrados na Figura 19.

Figura 19 - Regiões de contato entre os modelos tridimensionais dos dentes de engrenagem modificados, perfil de malha e restrições atribuídas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA RESINA UTILIZADA

A análise das propriedades mecânicas da resina utilizada foi iniciada através de ensaios de tração e flexão seguindo as normas ISO 527-2 (2019) e ISO 178 (2012). Com estes ensaios seria possível determinar o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da resina após a cura. De acordo com a norma ISO 527 (2019), foram utilizadas cinco amostras para cada ensaio realizado. A máquina de ensaios estava equipada com uma célula de carga do tipo

SLBL-5 kN. Foi utilizado a taxa de deslocamento de 5 mm/min para o ensaio de tração e 3 mm/min para o ensaio de flexão. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Shimadzu conforme a Figura 20.

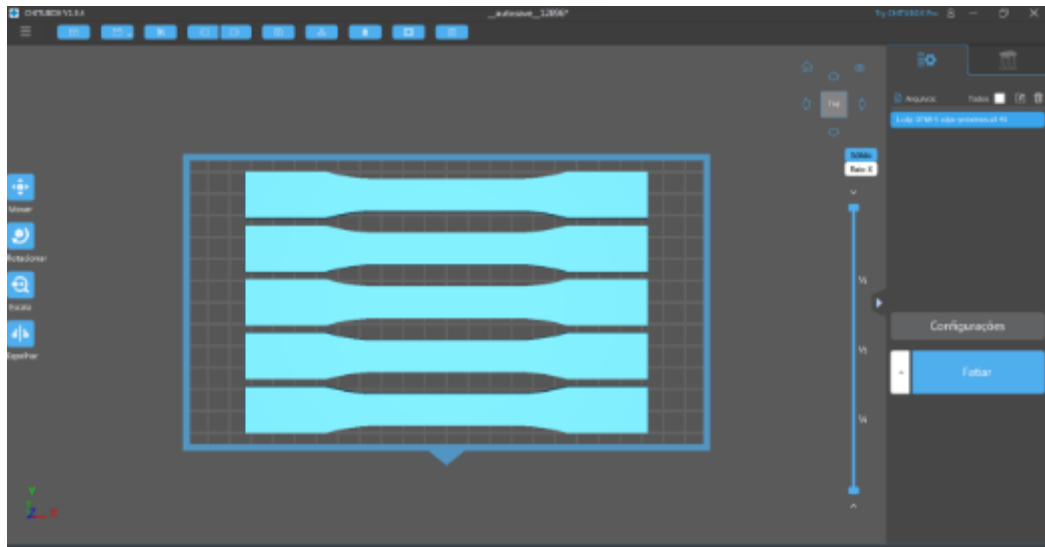
Figura 20 - Máquina universal com equipamentos para o ensaio de tração e flexão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para este estudo foram produzidos os corpos de prova (CDP) de tração e flexão utilizando o software Chitubox e a impressora Saturn 2 Elegoo conforme as Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 - Software fatiador Chitubox



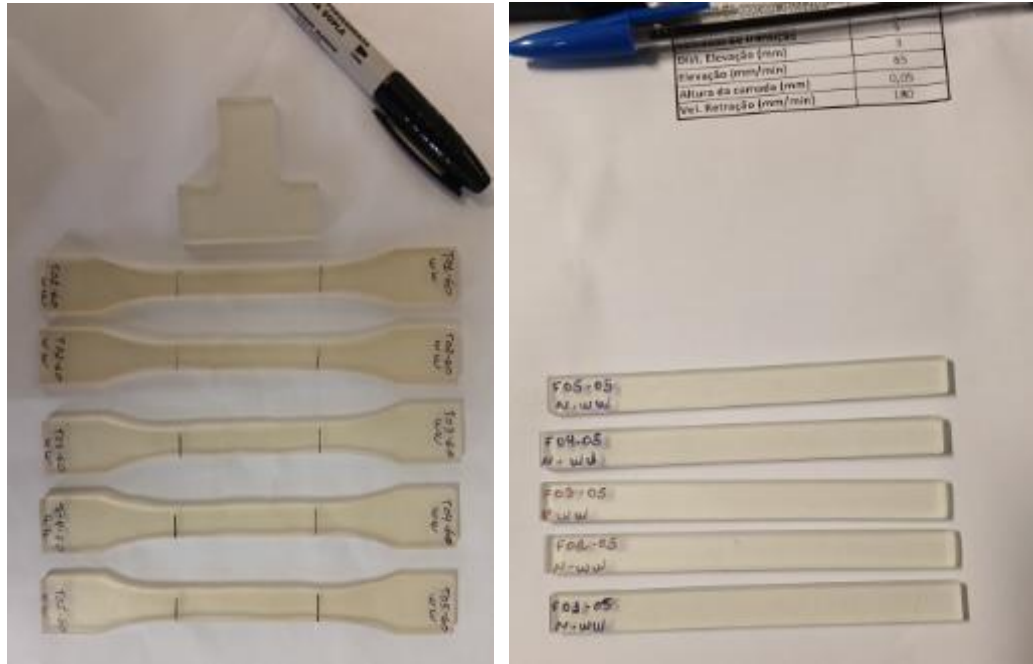
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 22 - Impressora Saturn 2 Elegoo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 23 - CDPs impressos para os ensaios de tração e flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 3- Dimensões do Cdps

Dimensões do Cdp do Ensaio de Tração		Dimensões do Cdp do Ensaio de Flexão	
Comprimento Total	170 mm	Comprimento Total	110 mm
Comprimento de Referência (comprimento útil)	80 mm	Largura da Seção Transversal	10 mm
Largura da Seção Útil	10 mm	Altura da Seção Transversal	4 mm
Largura da Seção de Fixação	20 mm	Distância dos Apoios do suporte	65 mm
Raio de Transição	20 mm		
Altura da Seção Transversal	4 mm		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os parâmetros utilizados na impressão 3d foram listados na Tabela 4:

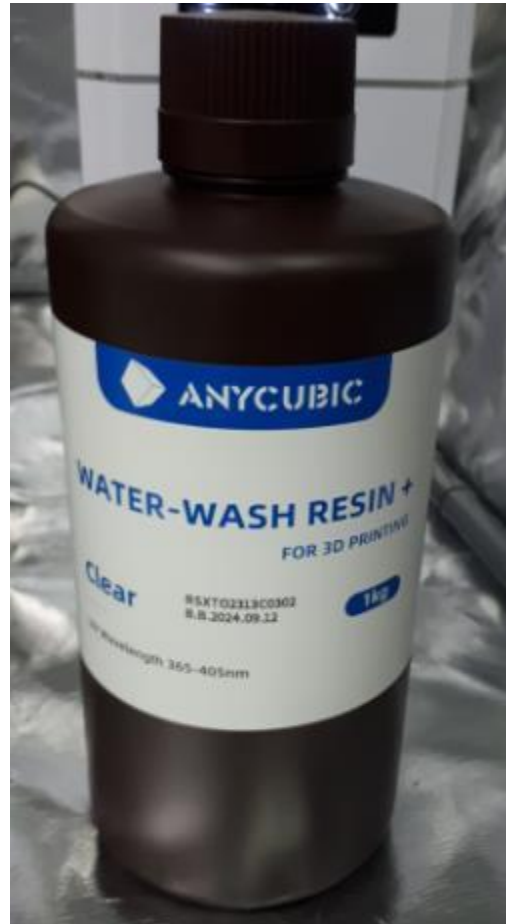
Tabela 4- Parâmetros de impressão

Tempo de exposição	2,2 s
Tempo de exposição de base	20 s, com 5 camadas de base
Altura de camada	0,05 mm
Sentido da impressão	Normal a maior face do CDP
Tempo de pós cura	60 min

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A resina utilizada foi a *Anycubic Water-Wash Resin+Clean* (Translúcida) cujas características informadas pelo fabricante são listadas na Tabela 5.

Figura 24 - Resina utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 5 - Características da resina utilizada

Comprimento de onda UV	365-405 nm
Densidade	1.15 - 1.20 g/cm ³
Dureza	80 Shore D
Resistência a tração	30-45 MPa
Alongamento na ruptura	8%-15%
Módulo de elasticidade	1600-1800 MPa
Resistência a flexão	50-60 MPa
Módulo de flexão	1500-1600 MPa
Resistência ao impacto Izod	50-60 J/m

Fonte: Anycubic (2024).

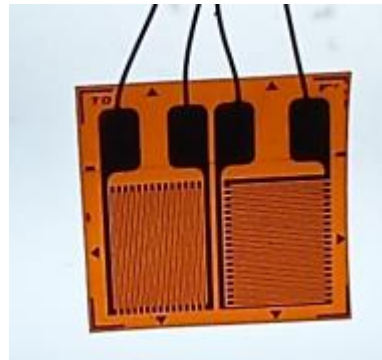
Durante o ensaio também foram instrumentados os CDP com extensômetros de duas grades com as características listadas na Tabela 6 e na Figura 25.

Tabela 6 - Características Dos Extensômetros de duas grades

Modelo	BF350-4BB(11)
Resistência	$349.9 \pm 0.2 \, \Omega$
“Gage fator”	$2.11 \pm 1 \, \%$
Comprimento de cada grade	4.0 x 4.1 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

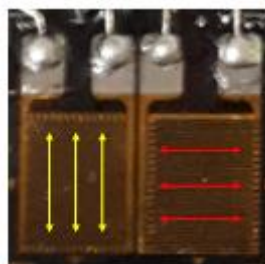
Figura 25 - Extensômetros de duas grades



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os CDPs instrumentados foram os utilizados nos ensaios de tração, com o objetivo de adquirir dados sobre a deformação específica no sentido longitudinal e transversal do CDP, para depois definir o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Os extensômetros utilizados são do modelo com duas grades onde as grades são posicionadas na direção longitudinal e transversal de forma separada em uma única base isolante flexível conforme ilustrado na Figura 26. O sistema de aquisição utilizado foi ilustrado na Figura 27: “*HBM Quantum*” junto do software “*Catman Easy*”. Os extensômetros foram configurados conforme a Figura 28.

Figura 26 - Direções das grades



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 27 - Sistema de aquisição de dados HBM utilizado no ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 28 - Extensômetro fixado no CDP de ensaio de tração

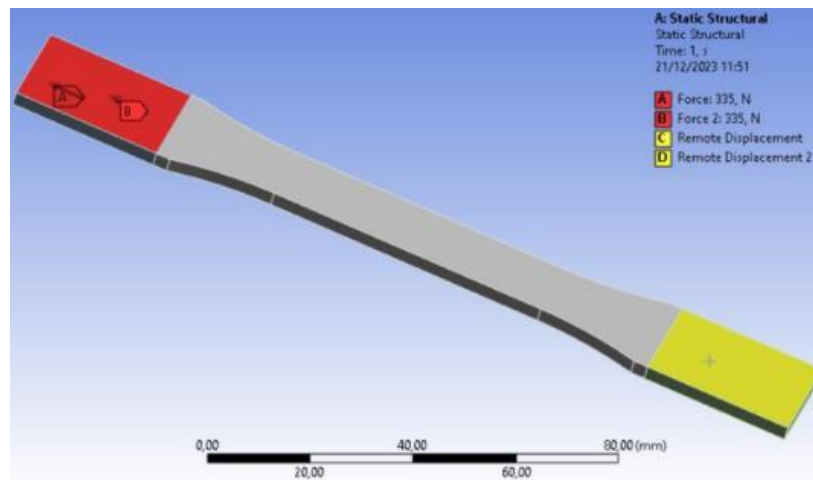


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os modelos tridimensionais dos corpos de prova para análise numérica foram desenvolvidos e submetidos a simulações no módulo *Static Structural* do software Ansys Workbench. Na biblioteca de materiais foi criado o material *Water Wash-resina* usando as propriedades obtidas com os ensaios mecânicos de tração dos CDP.

A construção do modelo do CDP de tração foi realizada utilizando-se o *Ansys Workbench*, sendo modelada uma peça homogênea, dividida em três partes, foi dividida desta maneira para representar as regiões que ficaram dentro dos mordentes da máquina de ensaios e a região que sofreu a deformação medida. As condições de contorno (aplicação das restrições e forças) são apresentadas na Figura 29.

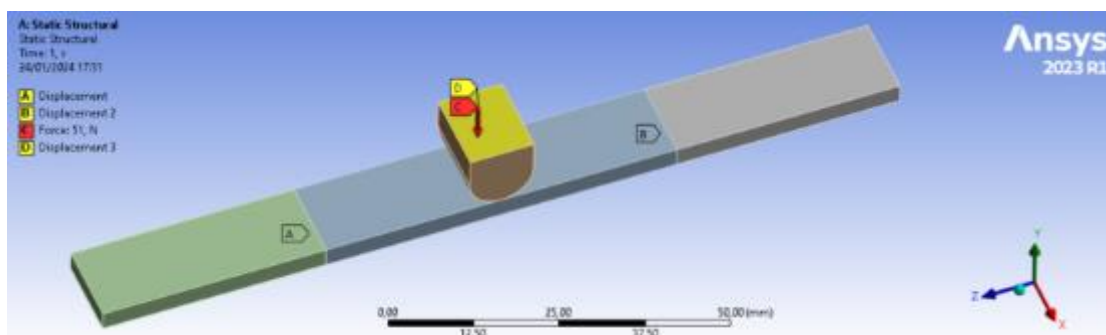
Figura 29 - Restrições ao modelo do CDP de ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

De maneira análoga para a construção do modelo do CDP de flexão também foi utilizado o *Ansys Workbench*. Neste modelo foram utilizadas duas restrições de movimento que representando os suportes (“*displacement A*” e “*displacement B*”) e um punção para aplicar o carregamento conforme mostrado na Figura 30. O “*displacement D*” é a restrição de movimento da punção, permitindo deslocamento apenas no eixo vertical (Y).

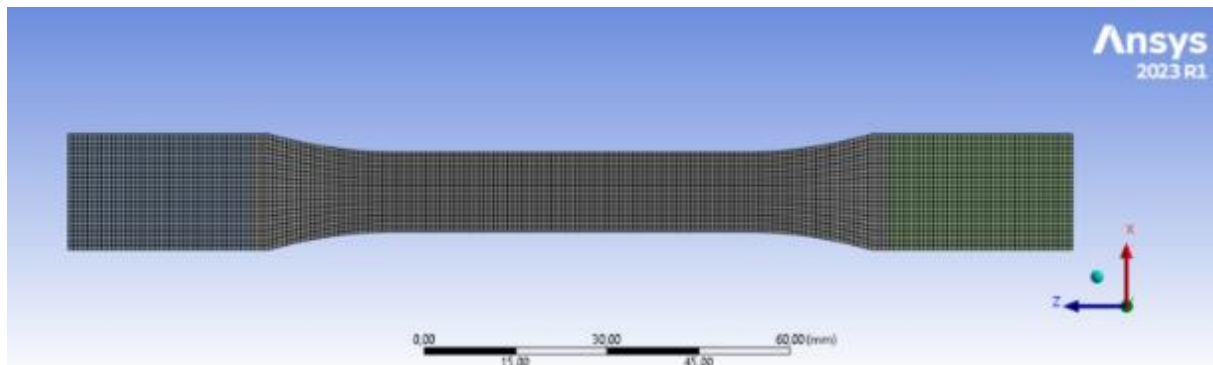
Figura 30 - Restrições ao modelo do CDP de ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

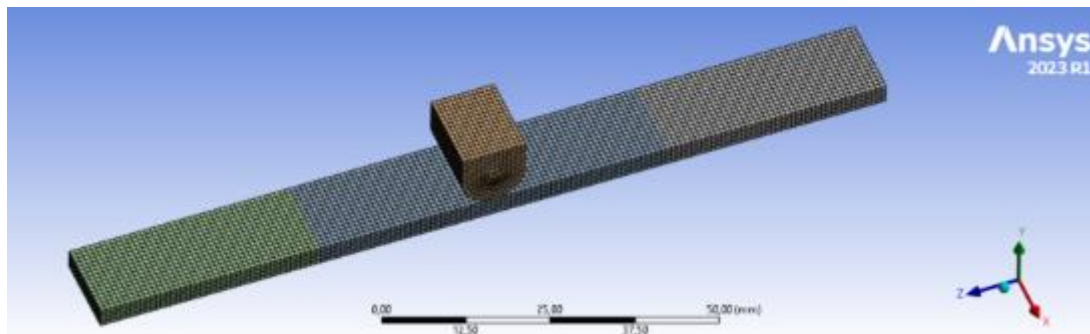
A confecção da malha dos elementos finitos foi feita utilizando-se os elementos *SOLID186*, *CONTA174*, *TARGE170* e *SURF154* para ambos os casos (tração e flexão). O contato existente entre as seções do CDP, em ambos os ensaios, foi do tipo *bonded*, no caso do modelo de flexão o contato entre a punção e o CDP foi do tipo *frictionless*. O número total de nós e elementos gerados no modelo de tração foram de 99.735 e 20.160, respectivamente e no modelo de flexão 66.213 13.488, respectivamente. A malha obtida foi apresentada na Figura 31 (tração) e Figura 32 (flexão).

Figura 31 - Malha dos elementos finitos para o modelo de tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 32 - Malha dos elementos finitos para o modelo de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.4 MÉTODO DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

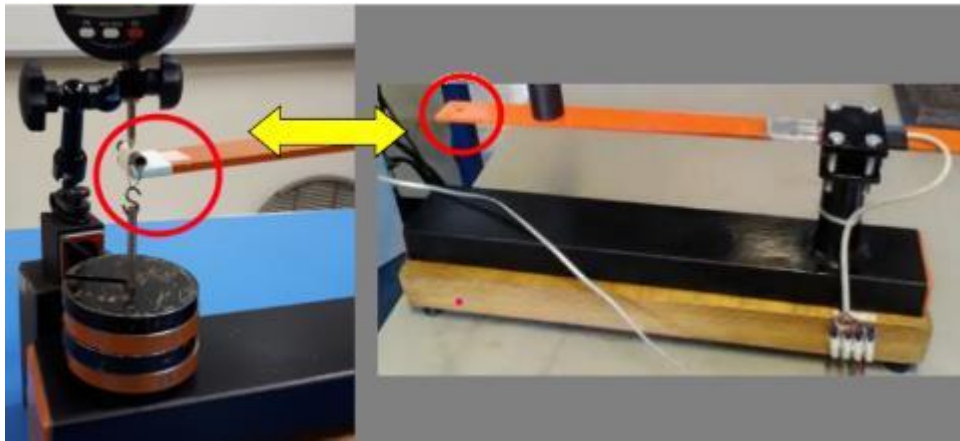
A correlação digital de imagens (DIC, do inglês: *digital image correlation*) foi utilizada para verificação do comportamento das peças sob carregamento, principalmente a deformação específica e o deslocamento nos eixos x e y. Este método foi utilizado através do software Matlab utilizando o programa de código livre Ncorr.

4.4.1 Testes de viabilidade com um transdutor e teste em uma chapa fina com furo concentrador de tensão.

Nestes ensaios foram estudados a viabilidade do uso deste modo de análise experimental com aquisição de imagens utilizando equipamentos de baixo custo, ou seja, câmeras não profissionais e câmera digital.

No teste inicial com o transdutor foram utilizados quatro discos e um suporte conforme a Figura 33, todos com massa conhecida, o intuito era verificar a capacidade de medir deslocamentos, o nível de precisão e parâmetros necessários neste caso do eixo y em relação à haste (O transdutor foi um equipamento desenvolvido anteriormente para medição de deflexão de cabinas de elevadores assistivos).

Figura 33 - Teste com transdutor



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O fim da haste foi pintado de branco conforme o detalhe circulado na Figura 33. Nesta região foi utilizado um rolete oco com quatro milímetros de diâmetro para a fixação do suporte e apoio de medição do relógio comparador. Foi utilizado um relógio comparador, com resolução de 0,01 mm digital *Digimess* ilustrado na Figura 34.

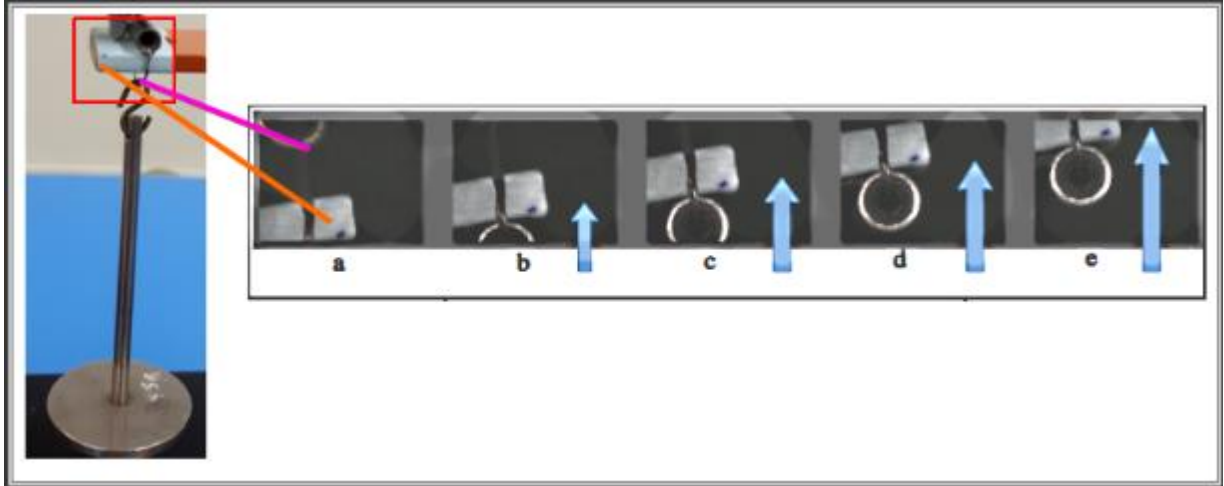
Figura 34 - Relógio comparador



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A deflexão da haste metálica com o carregamento de cada disco era medida simultaneamente com o relógio comparador, a partir disso foram feitos os carregamentos e imagens de cada acréscimo de disco conforme a Figura 35 onde o ponto azul era a referência.

Figura 35 - Deflexão da viga em cada acréscimo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por causa do posicionamento da câmera a imagem foi adquirida de forma invertida, subindo o ponto azul de referência após cada acréscimo de disco. Estas imagens sequenciais do ensaio foram transformadas para o formato de 8 bits (.tif), e tratadas com o *ImageJ* controlando o nível de brilho e contraste. Após isso essas imagens (.tif) foram carregadas no programa Ncorr onde foi verificado o deslocamento no eixo y. Com os resultados da análise de imagens do Ncorr foram feitas as comparações com os resultados dos métodos analíticos e experimentais com o relógio comparador.

Para o método analítico foi utilizado a equação da deflexão da viga engastada com carregamento na extremidade livre segundo a equação 26 e os parâmetros como as massas de cada disco e características da haste que foram listados na Tabela 7.

$$\delta = \frac{(PL^3)}{\left(3E\frac{bh^3}{12}\right)} \quad (26)$$

Onde a deflexão da extremidade livre (δ) é função do carregamento (P), comprimento da haste (L), módulo de elasticidade (E) e momento de inércia da haste ($bh^3/12$).

Tabela 7- Parâmetros utilizados no ensaio do transdutor

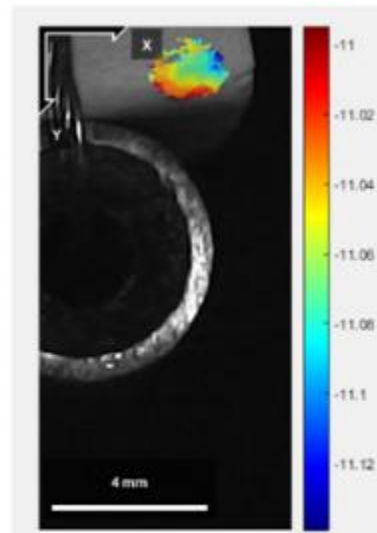
Discos	Massa de cada disco (kg)	Peso Total - P (N)
1	0,279	2,742
2	0,283	5,517
3	0,285	8,313
4	0,287	11,124
Características da haste		
Comprimento - L		0,35 m
Largura - b		0,038 m
Altura - h		0,004 m
E Alumínio		68,9 GPa

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

No Quadro 2 foram ilustrados os dados obtidos em cada método e a imagem da análise do DIC em destaque. O erro neste caso é a diferença percentual entre as medidas. Neste estudo o erro foi de aproximadamente 3% nos dois casos comparados com o DIC.

Quadro 2 - Dados obtidos no experimento com DIC e transdutor

Método	Deslocamento
Analítico	11,39 mm
Experimental relógio	10,65 mm
Experimental Dic	11,05 mm
Comparação	Erro
Analítico/Relógio	6,50%
Analítico/Dic	2,99%
Relógio/Dic	-3,76%



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O segundo teste utilizando o CDP com furo concentrador de tensão tinha como intuito verificar a capacidade de visualização das regiões de deformações específica nas direções x, y e no plano xy da peça sem aferição de valores. A partir da comparação com os campos gerados no software Ansys, seria possível saber se os parâmetros e procedimentos de captação de imagens foram adequados para esse estudo de imagens.

Foi utilizado uma chapa fina de aço com comprimento de 234 mm largura de 30 mm com furo de 8 mm de diâmetro. O CDP foi pintado inicialmente inteiramente de branco com tinta spray esmalte fosco, em seguida foi utilizado o mesmo tipo de tinta, mas na cor preto fosco para realização dos pontos dispersos. A tinta deveria ser fosca para não ocorrer reflexos.

O ensaio de tração foi realizado na máquina de ensaios Shimadzu com a célula de carga de 5 kN e carregamento de 250 N conforme a Figura 36, aquisição de imagens neste ensaio foi realizado com uma câmera digital de 14 megapixel Fujifilm FinePix S2980 com sensor tipo CCD (dispositivo de carga acoplada) e com lentes: *Fujinon zoom lens* - 18x zoom - 5 - 90 mm - f/3.1-5.6. Para estabilizar as imagens a câmera foi apoiada em um tripe que também tinha um anel de luz onde era possível controlar a intensidade luminosa.

Figura 36 - Ensaio DIC na chapa fina

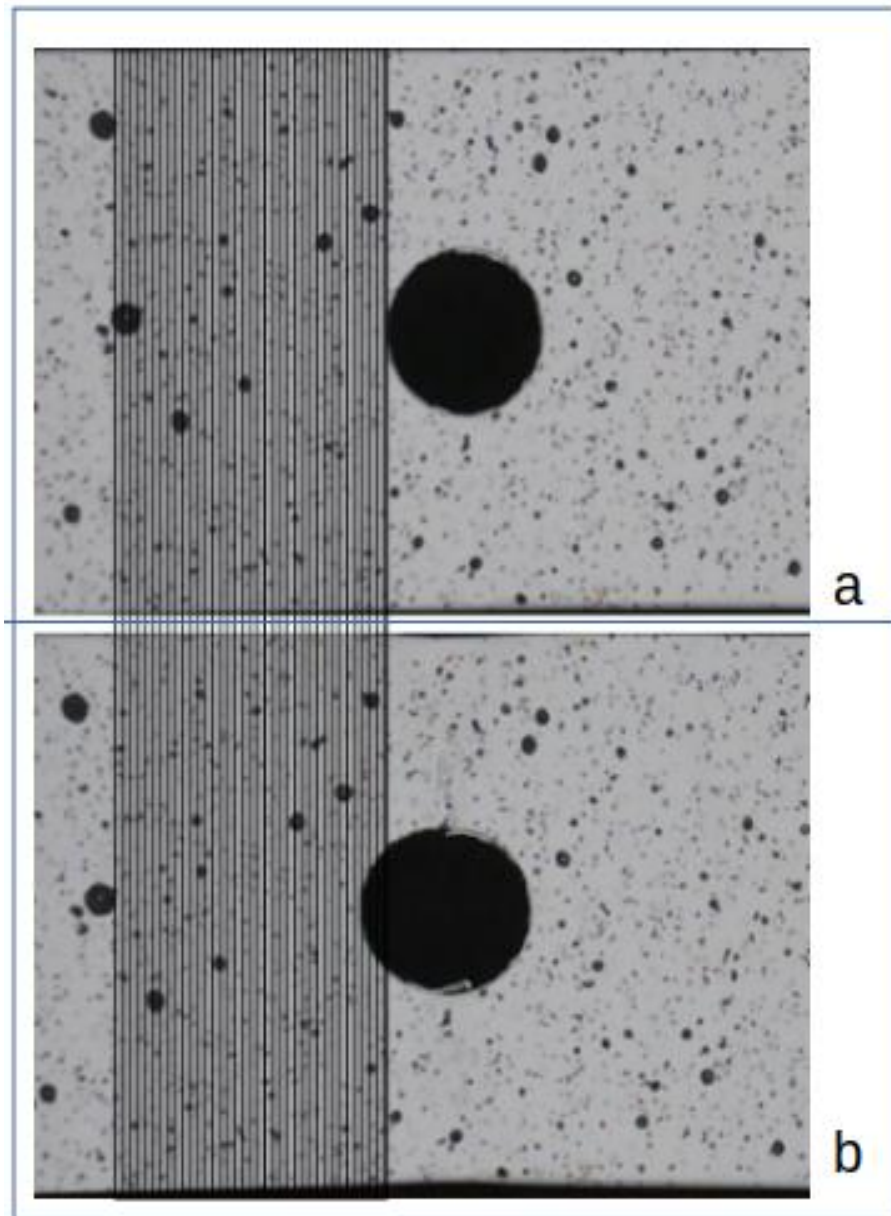


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 37 foram apresentados como foi o início (a) e o final (b) do deslocamento dos pontos do CDP durante o ensaio. As linhas foram adicionadas apenas para a melhor

ilustração do deslocamento dos pontos a esquerda dos furos sem escala. Pode ser verificado em (b) que devido a usinagem do furo correu a formação de irregularidades onde possivelmente fragilizou e nucleou uma trinca no CDP.

Figura 37 - Comportamento do CDP durante o ensaio: (a) início, (b) fim

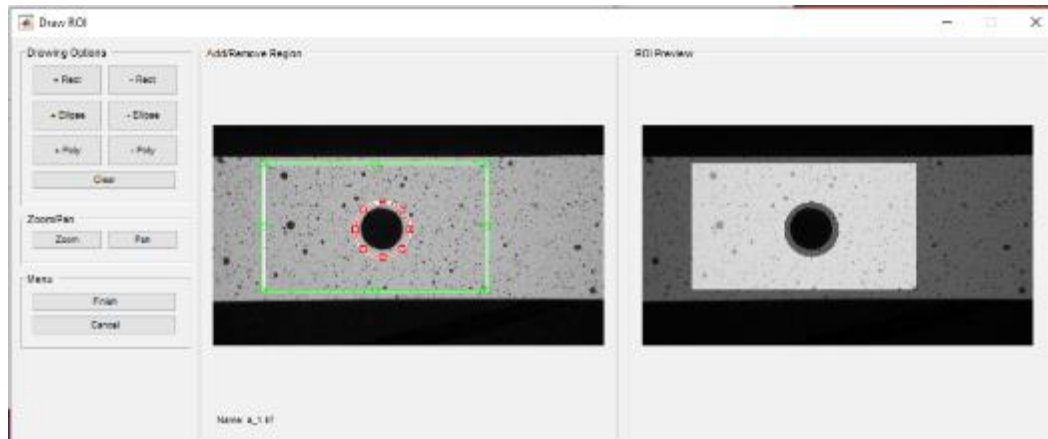


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No software Ncorr foi definido as restrições iniciais da região de interesse do estudo conforme a Figura 38. Conforme Blaber, 2015; Remesan, 2014; Ncorr, 2023 o retângulo verde define a área onde deverão ser analisados os deslocamentos dos pontos, o círculo

vermelho limita a região que deverá ser excluída da análise devido à rugosidade da perfuração

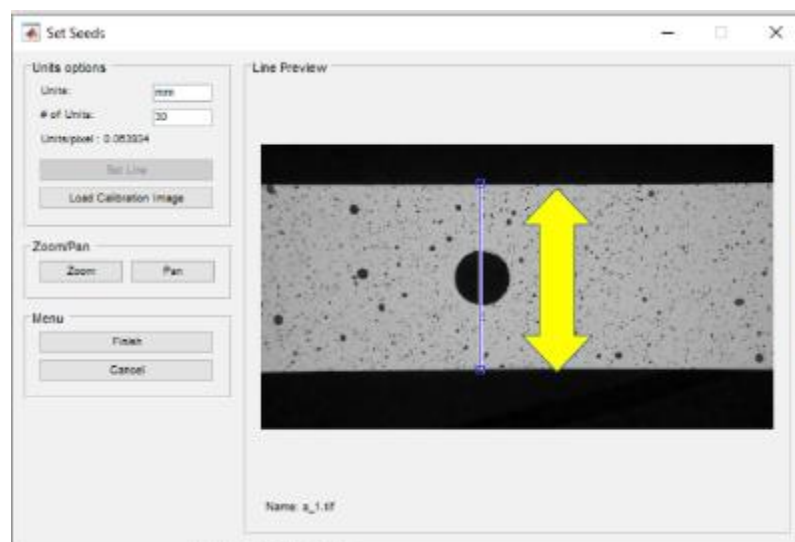
Figura 38 - Região de interesse



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 39 foi traçada a linha azul próxima da seta amarela, delimitando o comprimento do CDP. Esta linha serve para a conversão da medida em milímetros para pixel da imagem para a análise das deformações específicas conforme Blaber, 2015; Remesan, 2014; Ncorr, 2023.

Figura 39 - Delimitação da largura do CDP



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

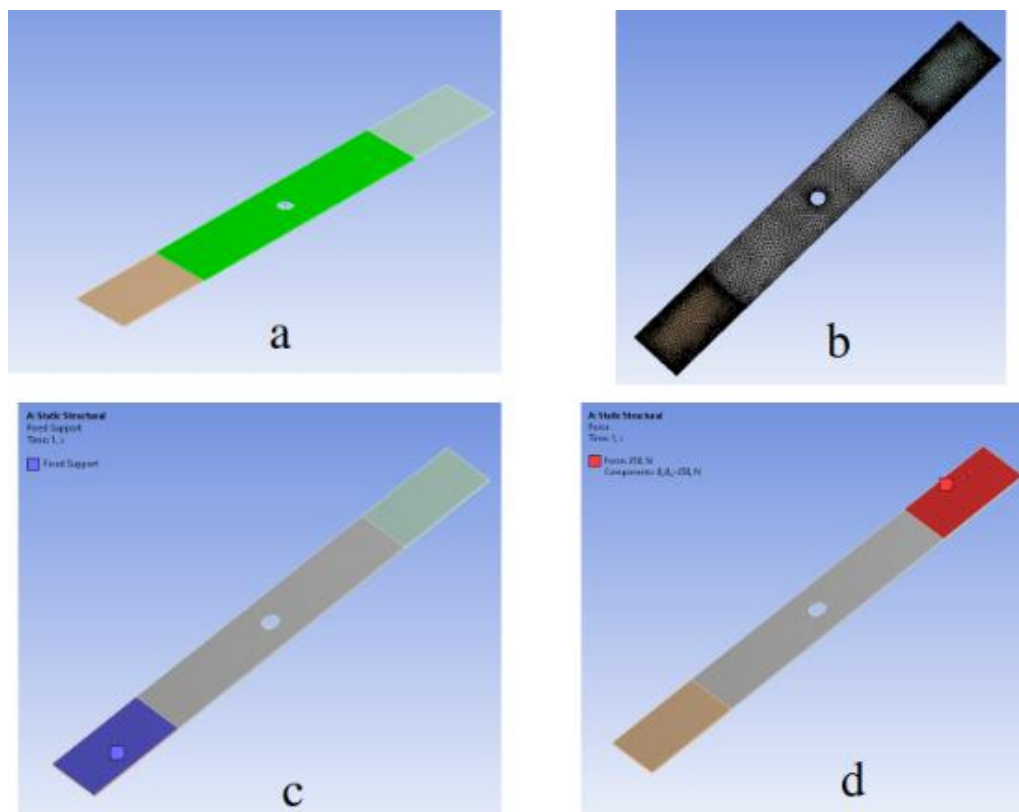
No software ANSYS, foi modelado um sólido com as mesmas dimensões do CDP real, contudo, o modelo foi dividido em três segmentos, semelhante a simulação do CDP de resina, conforme ilustrado na Figura 40 (a): dois retângulos nas extremidades (marrom e cinza),

criados por meio do método "Add Frozen", que representam as áreas de contato com as garras da máquina de ensaio, e uma parte central (em verde) com um furo, sujeita à deformação.

O comando "Add Frozen" foi utilizado no *Geometry Modeler* para especificar que essas regiões deveriam ser tratadas como "congeladas", ou seja, sem sofrer deformações. Já o contato entre as extremidades (marrom e cinza), e a região central do furo foi definido como *bonded*, o que garante que essas partes permanecessem rigidamente conectadas, impedindo deslocamentos ou separações entre elas durante a análise.

A Figura 40 (b) apresenta a malha gerada para os três sólidos, totalizando 106.192 nós e 53.492 elementos. Os tipos de elementos usados foram: *SOLID186*, *CONTA174*, *TARGE170* e *SURF154*. Foi aplicado um refinamento de grau três ao CDP. As condições de contorno, incluindo suporte fixo e a aplicação de uma carga de 250 N, são ilustradas nas Figuras 40 (c) e 40 (d), respectivamente.

Figura 40 - CDP modelado no Ansys: (a) Divisão dos segmentos, (b) Malha, (c) Suporte, (d) Carregamento

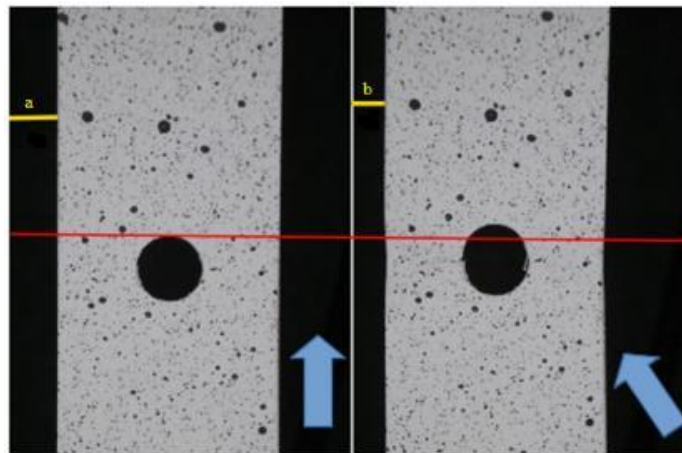


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 41 foi ilustrado o comportamento do CDP durante o ensaio. No canto superior esquerdo da Figura 41 no início do ensaio a distância "a" entre o CDP e a margem

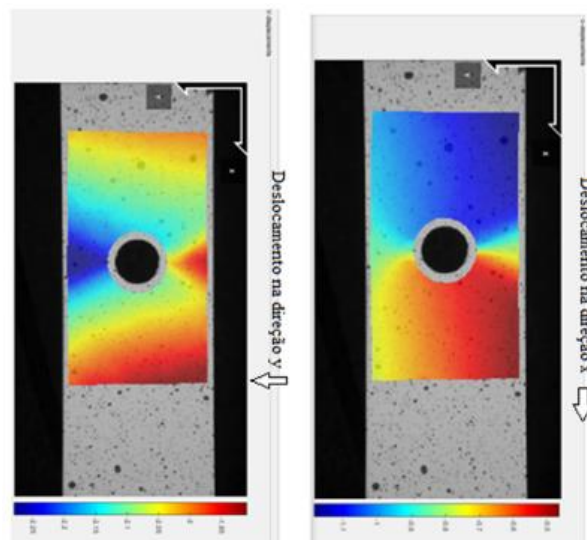
da Figura 41 tem aproximadamente 8 mm. Na direita no fim do ensaio esta distância agora marcada como “*b*” é menor, tem quase a metade do tamanho, isto significa que durante o ensaio o CDP se ajustou novamente entre as garras da máquina do ensaio e o movimento não foi totalmente linear. Na Figura 42 são ilustrados os dados adquiridos no ensaio, é possível notar o gradiente de cores perto do furo central no deslocamento na direção *y* mostrando o estreitamento característico esperado deste tipo de CDP.

Figura 41 - Deslocamento do CDP durante o ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 42 - Gradiente de cores devido ao deslocamento nas direções *x* e *y* do CDP

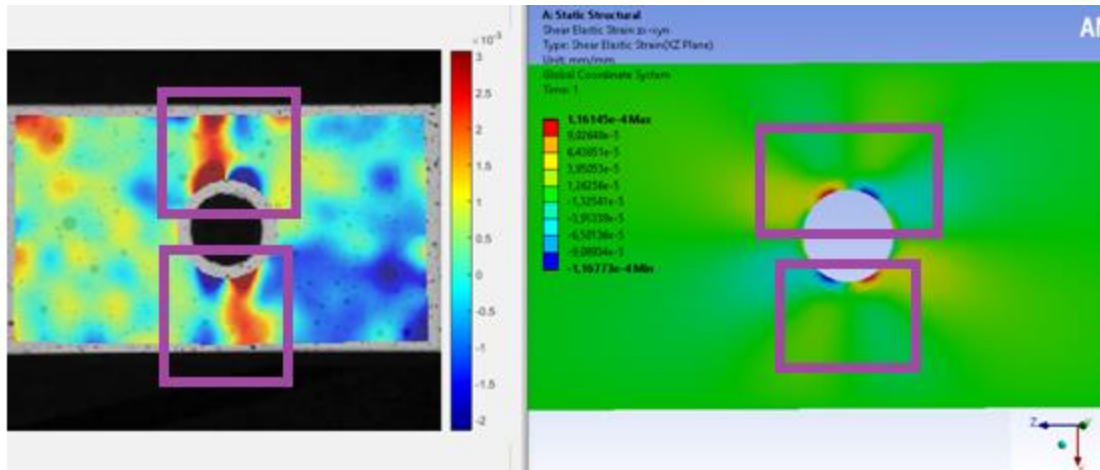


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nas Figuras 43.44 e 45 são ilustrados os dados sobre as deformações específicas nas direções *x*,*y*, plano *xy* comparadas com os dados adquiridos da simulação. A trinca no CDP acentuou os gradientes de cores nas deformações da direção *x* e *y* no DIC. Entretanto nas

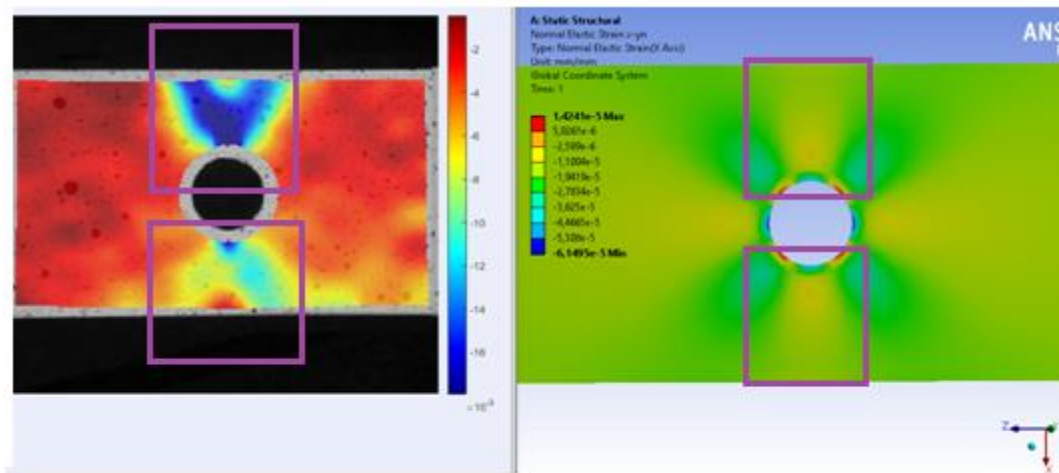
regiões delimitadas pelos retângulos é possível notar as regiões com maior deformação de forma coerente nos dois métodos

Figura 43 - Deformação específica no plano xy



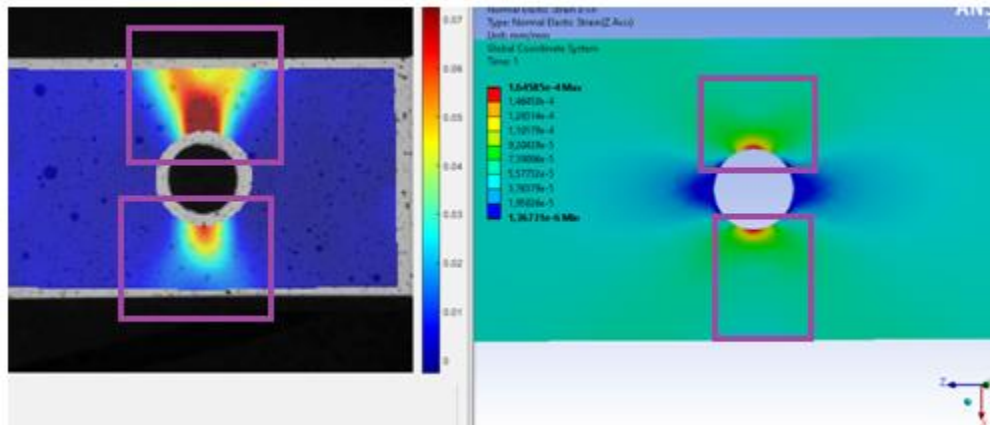
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 44 - Deformação específica na direção x



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 45 - Deformação específica na direção y



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.4.2 Teste com DIC nas engrenagens de aço

Este experimento, teste com DIC nas engrenagens de aço, foi realizado para verificar o comportamento da deformação específica dos dentes em condição próxima de travamento por meio de aquisição de imagens. Nesta condição era esperada a tensão e deformação ocorrer predominantemente na região contato conforme (Kubota, 1963; Bergseth e Björklund, 2010). Neste experimento para aquisição de imagens foi utilizado uma câmera digital com conexão USB com resolução de 2 megapixel com distância focal de 15 mm a 40 mm e sensor de imagem CMOS (semicondutor de óxido metálico complementar).conforme a Figura 46.

Figura 46 - Câmera digital USB



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

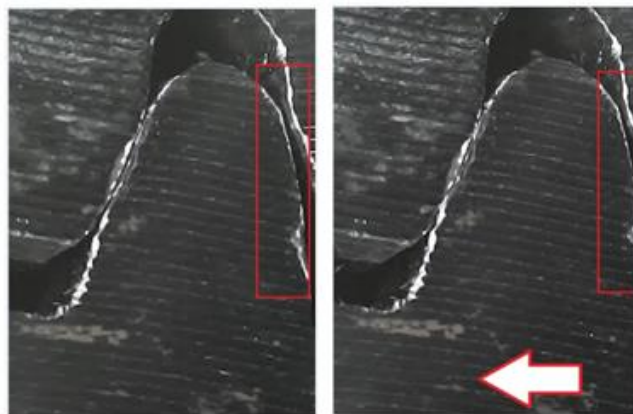
Os dentes do engrenamento foram pintados com padrão específico para aquisição do método DIC utilizando tinta esmalte fosca preta e branca conforme Blaber, 2015; Remesan,

2014; Ncorr, 2023. Inicialmente a parte da peça a ser estudada foi lixada, polida e coberta de tinta branca. Após a tinta branca secar foi aplicado um jato disperso e afastado da tinta preta. Esse jato afastado gera pontos espaçados de tinta preta que foram analisados pelos softwares para a definição do deslocamento desses pontos. Esse sistema de aquisição de imagens DIC pode medir o deslocamento dos pontos em pixels e converter em milímetros conforme Blaber, 2015; Remesan, 2014; Ncorr, 2023.

O ensaio foi filmado utilizando a câmera com a taxa de aquisição de 30 quadros por segundo. Em todos os ensaios foram gerados vídeos de aproximadamente 5 segundos com resolução de 640x480 pixels. Utilizando o software VLC os vídeos foram cortados quadro a quadro gerando em média 150 imagens. Essas imagens foram editadas no software ImageJ, onde foram recortadas e convertidas para matriz preta e branca.

Na Figura 47 o ensaio foi realizado propositalmente na engrenagem sem acabamento, ou seja, lixamento e polimento. Neste caso ficaram aparentes os sulcos da usinagem, gerando regiões opacas e claras. Os pontos mais claros foram gerados pelo reflexo da luz do microscópio. O sentido do movimento do dente do pinhão é demonstrado na imagem. A coroa neste caso está fixa e não pode girar. Os retângulos vermelhos foram inseridos para demonstrar o quanto foi pequeno o deslocamento. O carregamento foi de 20 Nm aplicado no eixo do pinhão.

Figura 47 - Dentes sem acabamento

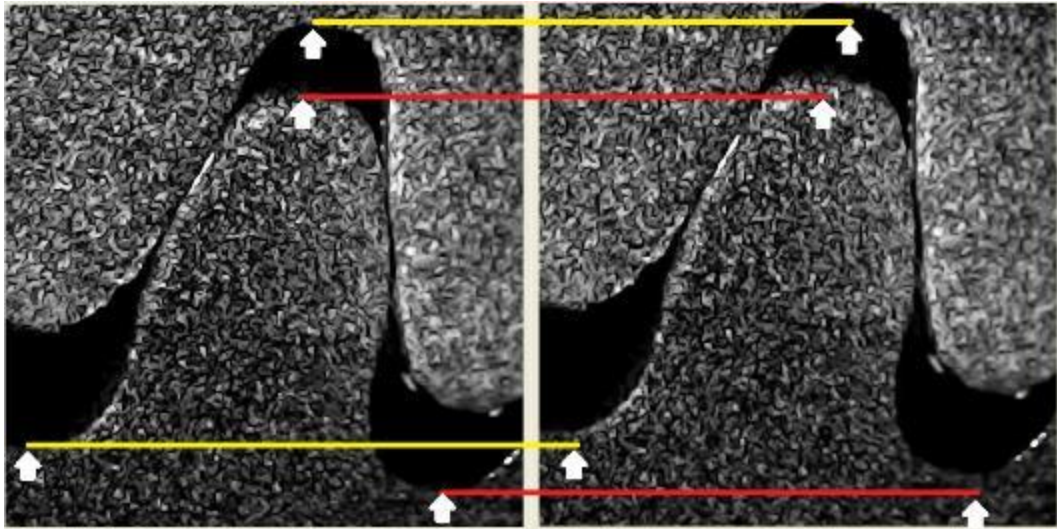


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 48 os dentes foram pintados após o polimento. A mistura de pontos brancos e pretos criou esse aspecto "marmorizado" nos dentes. As setas brancas marcam o ponto inicial sem carregamento na esquerda da Figura 48 e na direita serve de referência para

verificar o deslocamento após o carregamento. Os mesmos parâmetros de carregamentos foram utilizados novamente.

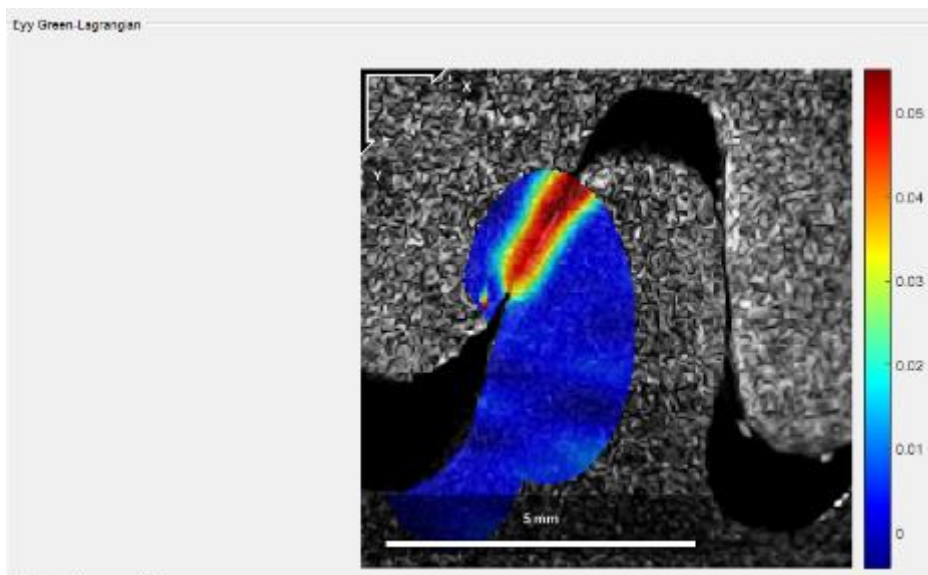
Figura 48 - Carregamento nos dentes pintados, pontos iniciais e finais



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

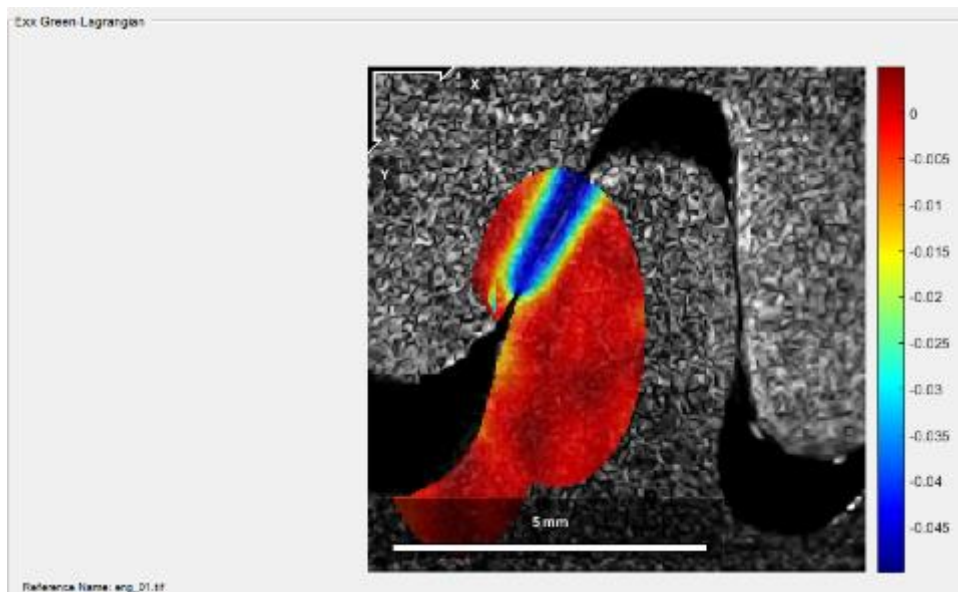
Os dados adquiridos neste ensaio de deformação específica nas direções x (E_{xx}), y (E_{yy}) e plano xy (E_{xy}) na região de contato a esquerda do dente são ilustrados nas Figuras 49, 50 e 51. Conforme esperado as deformações se concentraram na região de contato, e considerando o torque relativamente baixo para o aço e a condição de travamento, foi possível perceber que a região da base do dente não sofreu deformação expressiva.

Figura 49 - Deformação específica na direção y



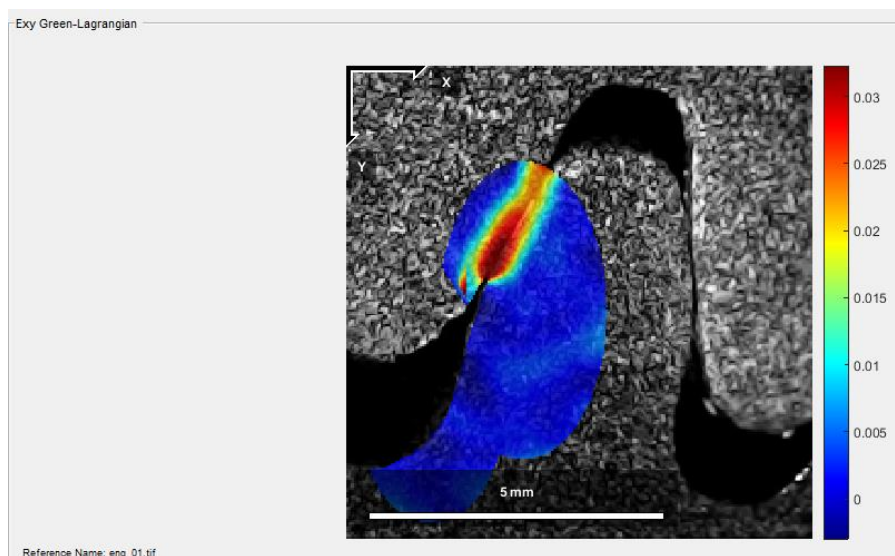
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 50 - Deformação específica na direção x



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 51 - Deformação específica no plano xy



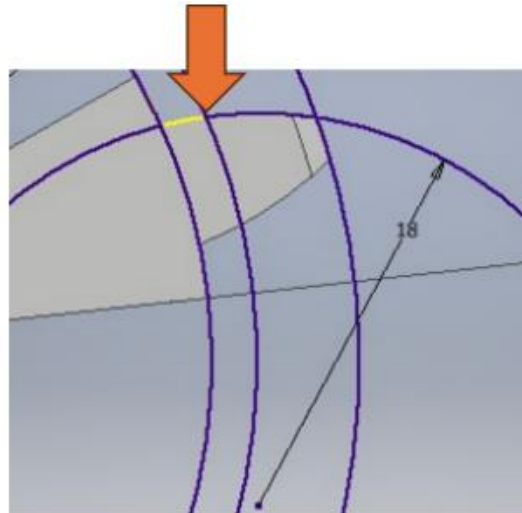
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.5 COMPRESSÃO DOS DISCOS DE RESINA.

Para o estudo da mecânica do contato dos dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos (Juvinal e Marshek, 2008; Timoshenko e Goodier, 1970; Sackfield e Hills, 1983) foi considerado a simplificação das condições de contorno deste problema no qual o raio de

curvatura do dente na região do diâmetro primitivo de uma engrenagem é adotado como o diâmetro de um cilindro conforme Langlois (2016) ilustrado na Figura 52.

Figura 52 – Raio da circunferência no ponto onde o diâmetro primitivo intercepta o arco da face do dente de engrenagem estudado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Essa simplificação foi utilizada para a verificação da viabilidade do uso dos métodos experimentais de DIC e fotoelasticidade com equipamentos de baixo custo para futuramente ser utilizados na verificação de tensões e deformações específicas nas engrenagens. O estudo segue o caso generalizado de contato. Assim foram desenvolvidos os discos com o mesmo raio da região de contato entre os dentes das engrenagens cilíndricas de dentes retos com módulo 3 com largura de 8 mm.

A metodologia experimental de fotoelasticidade com discos e a análise numérica conforme (Saikiran e Purushotham, 2019; Umezaki e Takahashi, 1989; Hung e Ma, 2003) demonstravam o comportamento esperado em carregamentos compressivos em materiais como policarbonato, epóxi e polimetilmetacrilato (Acrílico). A partir disso foi realizado o estudo com a resina transparente já utilizada nos outros experimentos. Os discos foram produzidos pela impressora Elegoo Saturn 2 com os parâmetros segundo a Tabela 4 e com o diâmetro de 36 mm e espessura de 11 mm.

O procedimento após a retirada das peças da mesa era a lavagem com água e a cura. A lavagem da peça de resina é uma etapa fundamental no pós-processamento de objetos impressos em 3D por fotopolimerização. Ela serve para remover o excesso de resina líquida que permanece aderida à superfície da peça após a impressão. Esse excesso, se não for removido, pode comprometer o acabamento, a precisão dimensional e a funcionalidade da peça. Na cuba de lavagem era agitada a água com a peça imersa para remover a resina não

curada, o tempo de imersão adotado foi de 5 minutos, água utilizada era potável. A imersão prolongada na lavagem pode danificar a peça alterando as dimensões esperadas ou fragilizando o material (Abbasnezhad, 2024; Garibaldi et al., 2024; Sirinterlikci e Ertekin, 2023; Cazhamannil et al, 2022; Mayer et al.,2021).

A cura na cabine consistia em expor as peças a luz ultravioleta (UV) para completar a polimerização dos materiais que não foram completamente solidificados durante a impressão. A luz UV ativa os foto iniciadores remanescentes na peça, promovendo a formação de ligações cruzadas entre as cadeias de polímeros. Isso completa a polimerização, aumentando a rigidez e a resistência da peça (Barkane, 2021; Liu, 2023; Cazhamannil et al, 2022; Mayer et al.,2021). Os equipamentos são ilustrados na esquerda da Figura 53 e o disco sob luz UV na direita.

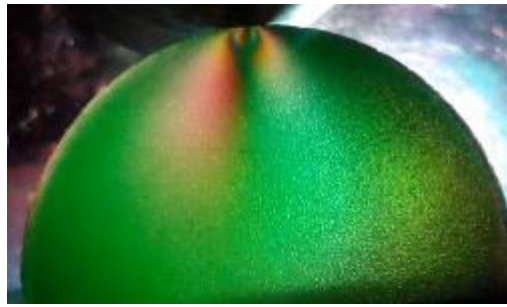
Figura 53 - Cuba de lavagem, cabine de cura e disco sob luz UV



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a cura foi realizado a remoção das camadas iniciais de base que ficavam em contato com a mesa. Essa camada apresenta um aspecto áspero conforme o acabamento da mesa da impressora Saturn 2. Quando foi realizado um teste sem a remoção da camada de base conforme a Figura 54, o disco ficava com um aspecto de pequenas cavidades como “casca de laranja”.

Figura 54 - Disco antes do tratamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a remoção da camada eram utilizadas lixas de granulometria 400 e 600 em formato de disco. As lixas eram fixadas com velcro em uma peça chamada “suporte de boina para furadeira”. Após o desbaste das camadas de base ($0,25 \sim 0,5$ mm) as peças foram polidas com disco específico de polimento feito de tecido *jeans* utilizando pasta de polimento para materiais poliméricos utilizando uma parafusadeira de velocidade controlada. O processo de desbaste e os equipamentos de polimento são ilustrados na Figura 55.

Figura 55 - Remoção de camada e equipamentos de polimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Foram produzidos 16 discos polidos para o estudo considerando 8 para o método DIC e 2 para a fotoelasticidade ilustrados na Figura 56.

Figura 56 - Discos para fotoelasticidade e DIC

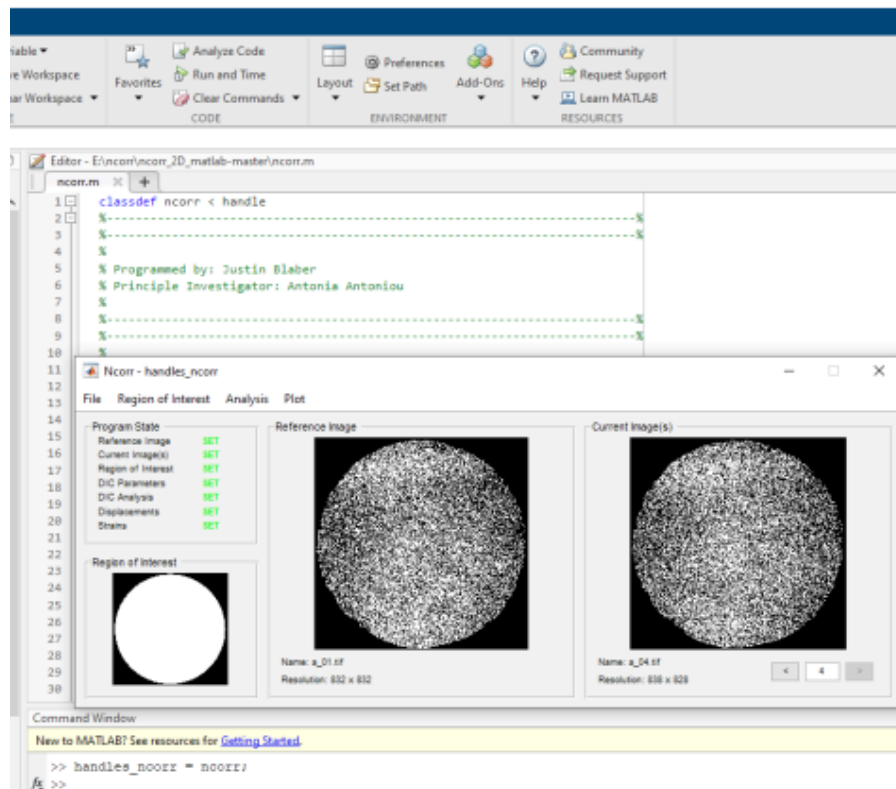


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.5.1 Fotoelasticidade e Testes de DIC em Discos

Para a análise de deformações nos discos, foi aplicada a técnica de DIC (Correlação de Imagem Digital). A DIC foi realizada utilizando o software NCorr, desenvolvido no ambiente Matlab, conforme ilustrado na Figura 57

Figura 57 - Interface do software NCorr

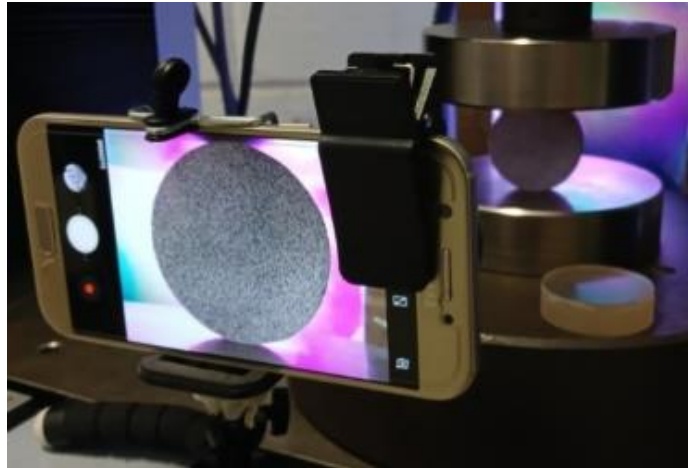


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As amostras foram polidas, pintadas de branco e salpicadas com tinta preta para criar um padrão aleatório que permitisse ao código rastrear os deslocamentos dos pontos conforme Blaber, 2015; Remesan, 2014; Ncorr, 2023. A aquisição dos vídeos foi feita com uma câmera

de smartphone de 20 MP montada em um suporte, com resolução FHD 1920x1080, conforme mostrado na Figura 58.

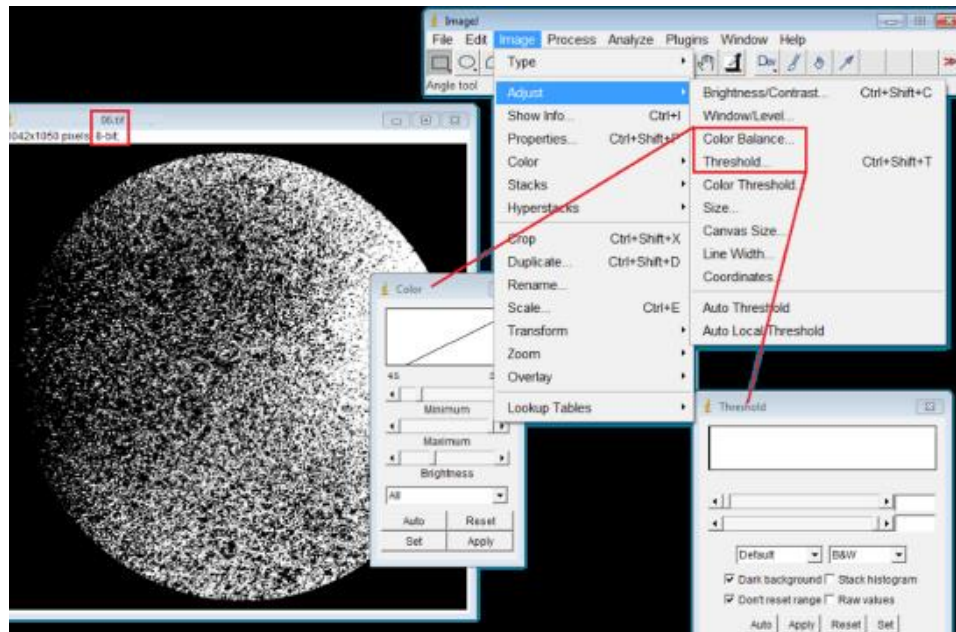
Figura 58 - Aquisição de vídeo do teste de DIC



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a aquisição dos vídeos, foram extraídas imagens/quadro dos discos em incrementos de carga (a cada 1000 N até o máximo de 3000 N) para uso no NCorr. As imagens foram cortadas dos vídeos e processadas em lotes utilizando o software ImageJ. Foram convertidas para escala de cinza de 8 bits, com ajuste de equilíbrio de cores (brilho ajustado para 300) e aplicado *threshold (default B&W)* para aprimorar e melhorar a distribuição dos pontos na imagem conforme Blaber, 2015; Remesan, 2014; Ncorr, 2023 e ilustrado na Figura 59.

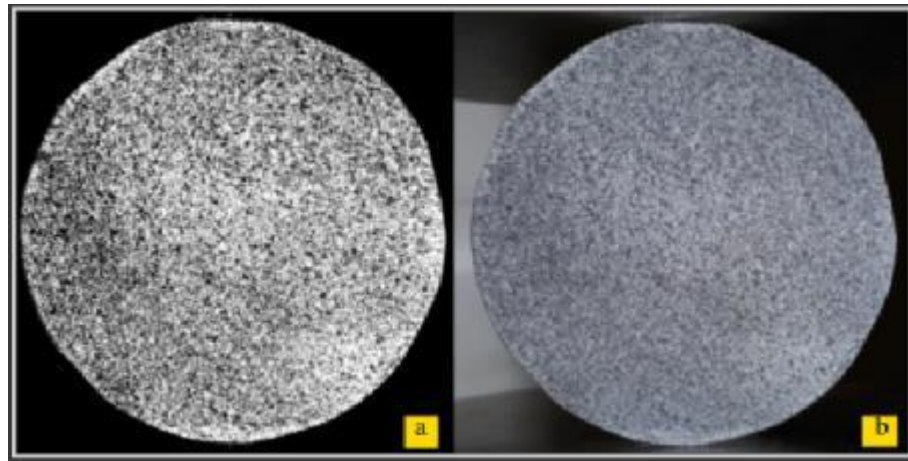
Figura 59 - Processamento das imagens.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 60 foi ilustrado o disco antes (a) e depois do processamento (b).

Figura 60 - Imagem do disco: (a) Imagem após o processamento. (b) Imagem antes do processamento

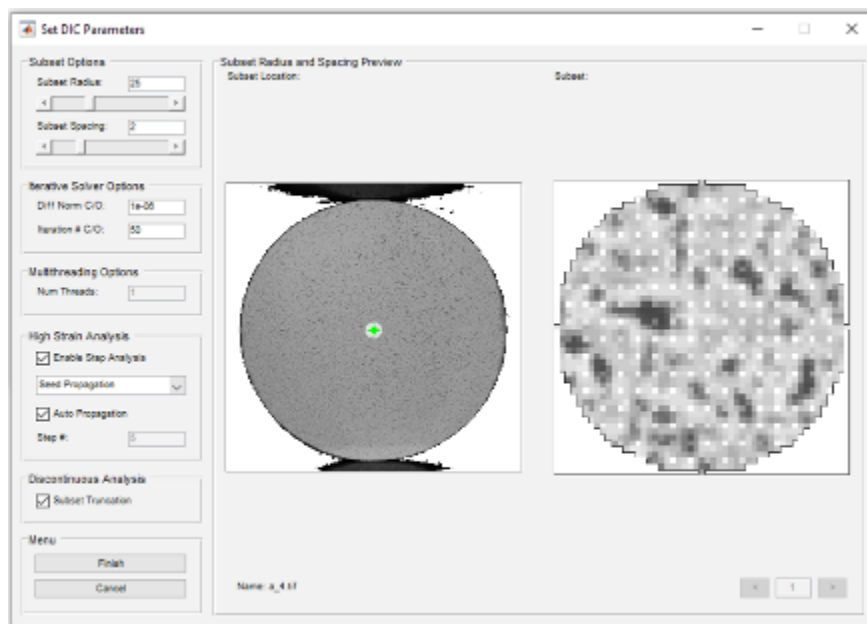


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O processo seguiu as etapas ilustradas nas Figuras 61-63: primeiro, foram definidos os parâmetros iniciais para a análise, incluindo a seleção de "sementes", que servem como pontos de referência na superfície do material. Em seguida, foi aplicado o modelo de deformação Lagrangiano para calcular os deslocamentos, permitindo o rastreamento das

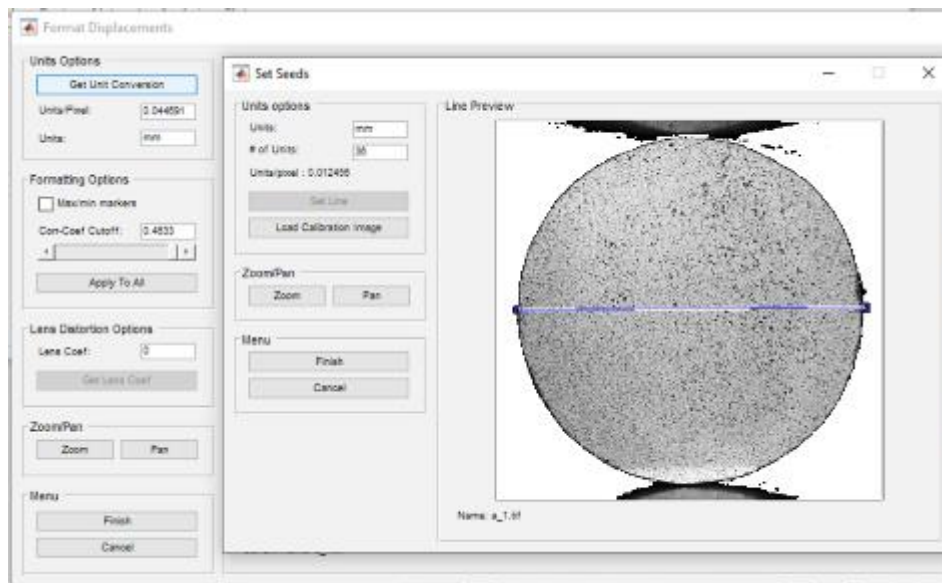
trajetórias desses pontos (Blaber et al., 2015; Irwansyah et al., 2024; Tambusay e Suryanto, 2020). Por fim, foi traçada uma linha de referência para estabelecer a relação entre o comprimento real do objeto e o número de pixels na imagem, permitindo a calibração do sistema. Esse procedimento possibilita a conversão das medidas de pixels em valores reais de deformação, garantindo a precisão necessária para gerar um gráfico de deformação que represente as mudanças dimensionais do material sob carga (Blaber et al., 2015; Irwansyah et al., 2024; Tambusay e Suryanto, 2020).

Figura 61 - Definição dos parâmetros de análise



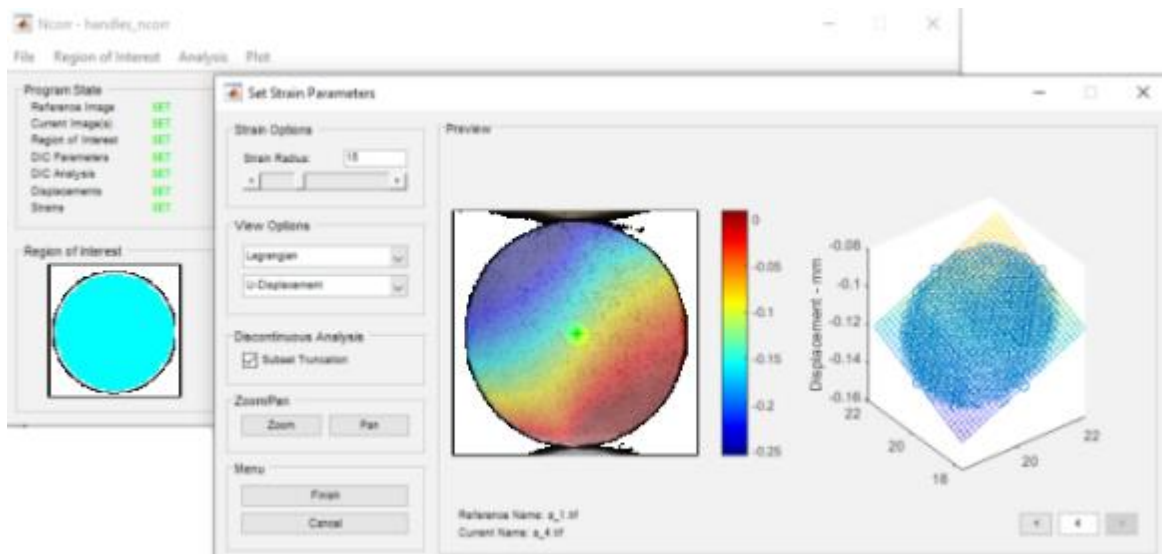
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 62 - Definição da relação entre comprimento da linha e pixels



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

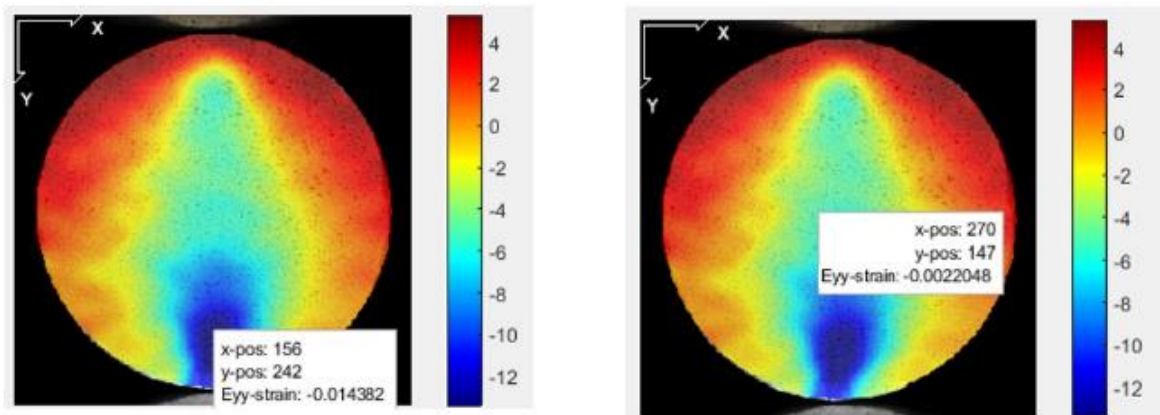
Figura 63 - Definição dos parâmetros para deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

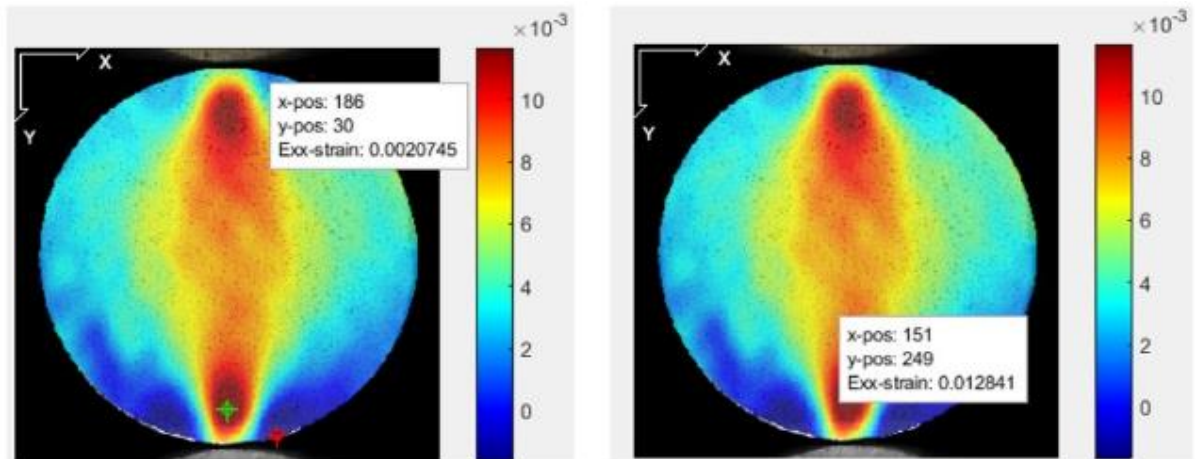
Os dados de deformação específica do ensaio do DIC dos discos são ilustrados nas Figuras 64-66. Nas Figuras foram utilizados marcadores de pontos e deformações para a comparação com os métodos analíticos e numéricos.

Figura 64 - Deformação específica na direção y



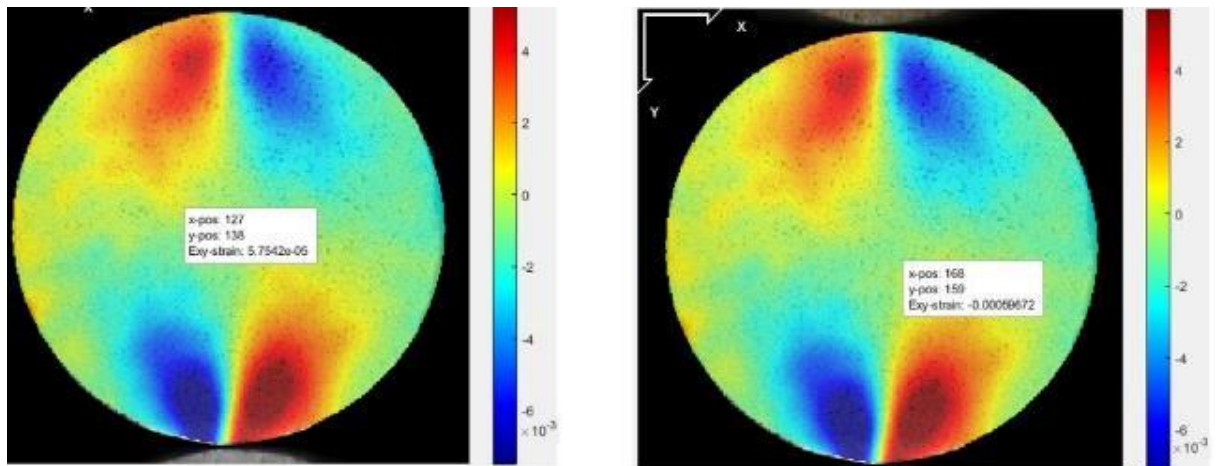
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 65 - Deformação específica na direção x



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

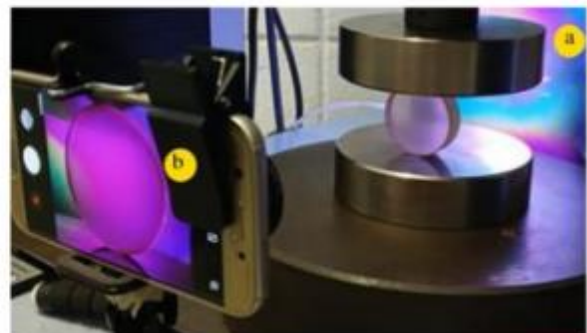
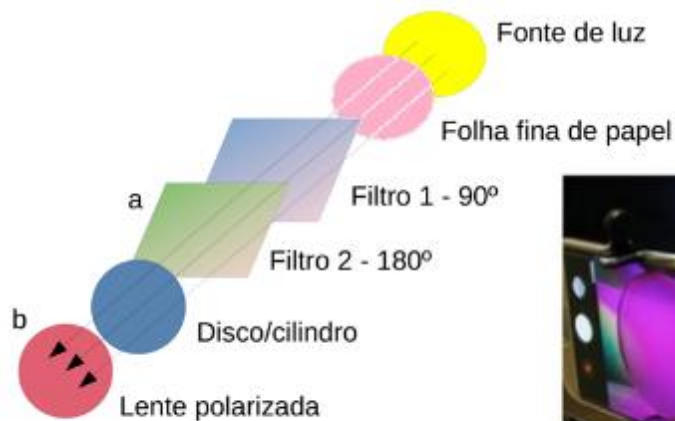
Figura 66 - Deformação específica no plano xy



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No estudo do comportamento do campo de tensões em discos sob compressão, também foi utilizada a fotoelasticidade. O procedimento foi implementado com equipamentos de baixo custo, conforme mostrado na Figura 67 com duas camadas de filme polarizador (a) posicionadas entre a fonte de luz e o disco, uma lente de 35 mm com filtro polarizador circular/linear (CPL) (b) acoplada ao celular.

Figura 67 - Configuração de aquisição de vídeo para o teste de fotoelasticidade e componentes utilizados: (a) filme polarizador, (b) lente CPL e (c) controle da fonte de luz LED.

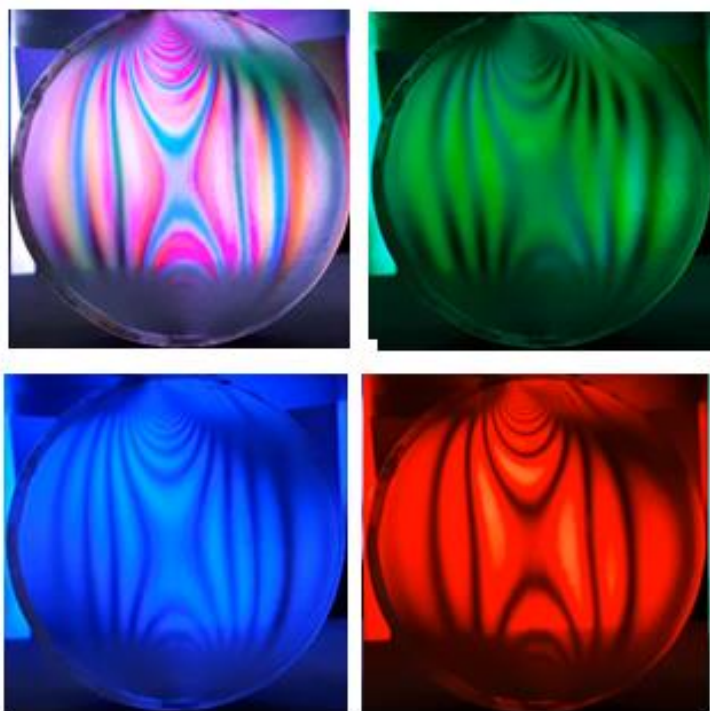


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os filmes polarizadores foram posicionados a 90 graus entre si, e um papel translúcido foi utilizado para reduzir a intensidade da luz. A lente CPL foi ajustada a 90° em relação aos filtros, conforme (Vargas-Isaza et al.,2023; Kim et al.,2023; Marín-Miranda et al., 2022). A fonte de luz utilizada foi uma lâmpada LED com capacidade de seleção de cor por controle remoto, facilitando a visualização de franjas fotoelásticas que indicam os campos de tensões no disco polido (Ramesh, 2021; Magalhaes et al., 2015; Doca e Pires, 2014). O efeito de mudança de cor nos ensaios dos discos foi ilustrado na Figura 68.

A quantidade de franjas observadas está diretamente relacionada ao comprimento de onda da luz utilizada polido (Ramesh, 2021; Magalhaes et al., 2015; Doca e Pires, 2014). Como o retardamento óptico depende do comprimento de onda, a mudança na cor da fonte luminosa altera a densidade das franjas visíveis. Luz com menor comprimento de onda, como azul ou violeta, resulta em um maior número de franjas, pois a interferência ocorre com maior frequência. Já luz com maior comprimento de onda, como vermelho, reduz a quantidade de franjas, tornando o padrão menos detalhado. Dessa forma, a escolha da cor da luz influencia a resolução da análise das tensões no material polido (Ramesh, 2021; Magalhaes et al., 2015; Doca e Pires, 2014).

Figura 68 – Influência das cores no ensaio de fotoelasticidade



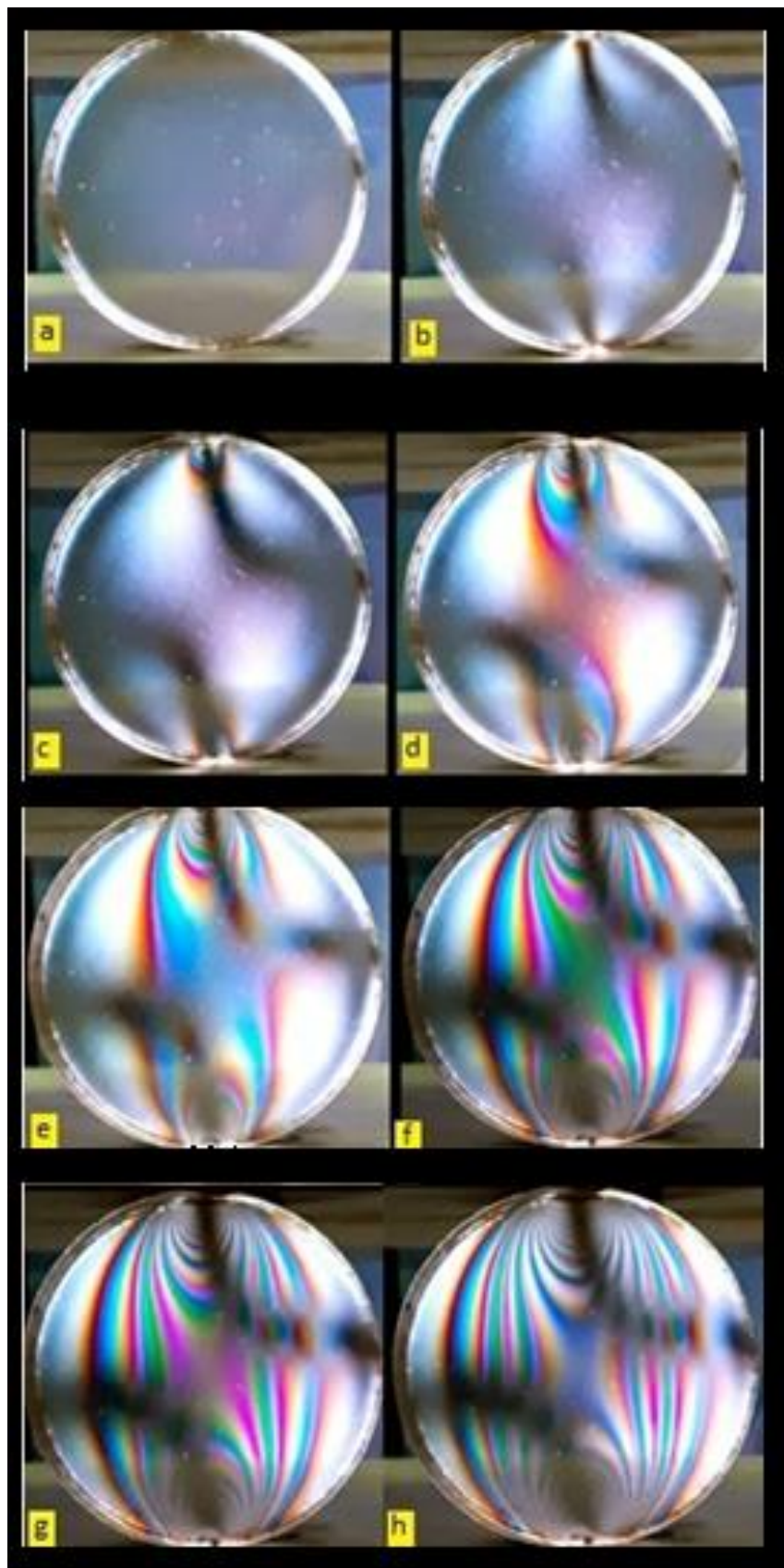
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A força de compressão aplicada nos testes de fotoelasticidade e DIC em acréscimos a uma taxa de 20 N por segundo. Após a aquisição do vídeo, imagens/quadro dos discos foram extraídas em incrementos específicos de carga conforme a Figura 69 e a Tabela 8.

Tabela 8- Carregamento em cada quadro do vídeo

Quadro	Carregamento
a	0 N
b	50 N
c	150 N
d	300 N
e	600 N
f	1300 N
g	1700 N
h	3000 N

Figura 69 - Quadros do vídeo com o aumento de carregamentos

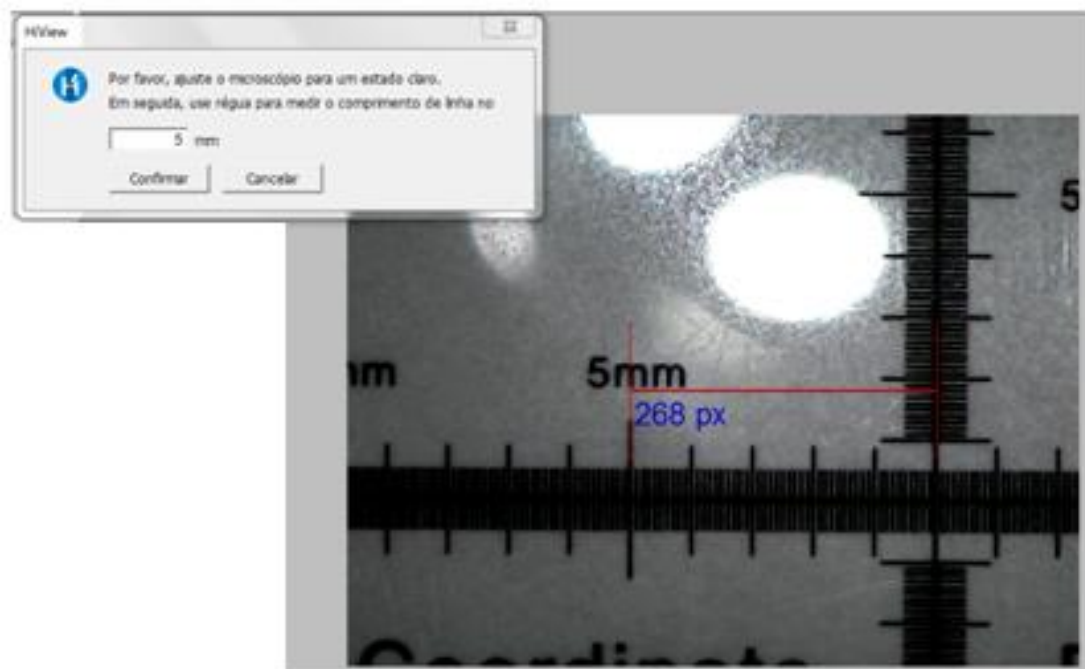


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.5.2 Experimento sobre o índice de refração

Para a determinação do índice de refração da resina foi realizado o experimento inspirado no artigo de Gonçalves, (2019) onde foi determinado o índice de refração em discos de gelatina utilizando apontadores laser e transferidores. Foi utilizado a câmera digital junto do software Hview como sistema de aquisição de imagem, sendo calibrado com o filme plástico graduado disponibilizado pelo fabricante. Conforme a Figura 70 com o filme posicionado acima da peça foi ajustado a escala em pixel da imagem para 5 mm.

Figura 70 - Ajuste de escala



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

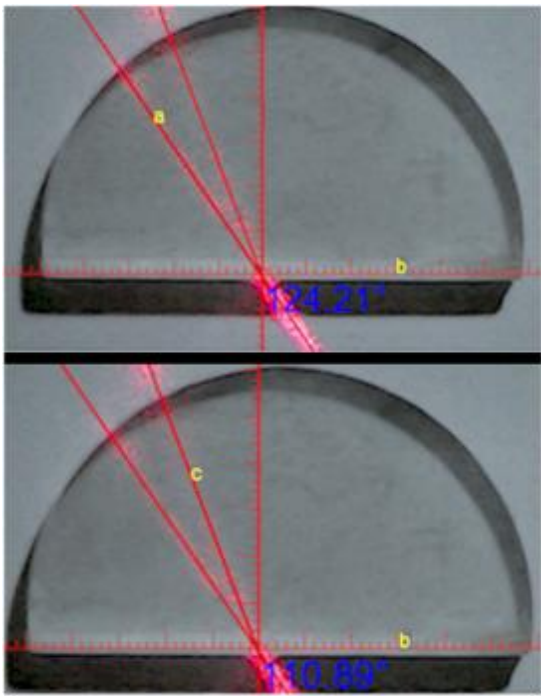
Segundo a equação 13 na mudança de meio material pode ser determinado o índice de refração com a medição dos ângulos de entrada e saída do feixe de luz. Segundo Gonçalves, (2019) o índice de refração do ar foi adotado igual a um. Assim foram medidas nove vezes conforme a Tabela 9 os feixes de luz gerados devido à inclinação da fonte de luz incidente na base plana da metade do disco de resina conforme a Figura 71.

Tabela 9 - Ângulos de entrada e saída no experimento do índice de refração

Ângulo medido em graus		Radianos (φ)		Seno (φ)	
entrada	saída	entrada	saída	entrada	saída
124,210	110,890	0,435	0,284	0,422	0,281
130,010	114,440	0,512	0,308	0,490	0,303
139,070	119,270	0,540	0,339	0,514	0,333
119,340	107,640	0,597	0,368	0,562	0,360
135,130	116,860	0,666	0,407	0,618	0,396
144,930	122,280	0,698	0,427	0,643	0,414
128,150	113,300	0,788	0,469	0,709	0,452
114,930	106,300	0,856	0,511	0,756	0,489
120,960	109,450	0,959	0,563	0,818	0,534

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

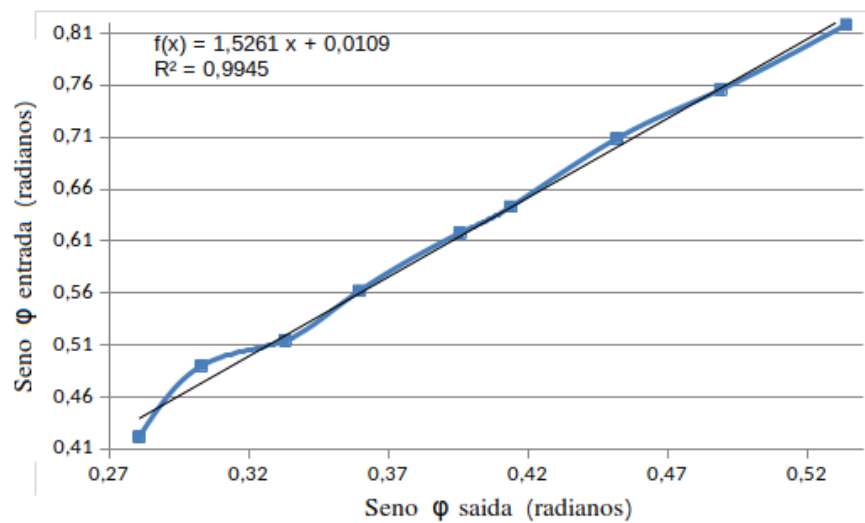
Figura 71 - Feixes de luz no experimento do índice de refração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Foram anotados os ângulos entre o feixe de entrada "a" e a linha horizontal graduada gerada pelo software "b" como ângulo de entrada. Os ângulos de saída foram delimitados entre as linhas "c" geradas pelo laser e novamente a linha horizontal "b". O programa tinha como limitação a medição apenas de ângulo entre uma nova linha e a linha horizontal graduada. Para contornar essa limitação os valores eram subtraídos de 90° e convertidos para radianos para a plotagem do gráfico na Figura 72. Com os valores medidos e obtidos foi gerado um gráfico de dispersão do índice de refração da resina.

Figura 72 - Gráfico dos dados do índice de refração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com o gráfico de dispersão entre os pontos gerados entre o ângulo de entrada e de saída (em radianos) foi obtido o índice de refração igual a 1,52 através da linha de regressão. A hipótese inicial era que essa resina poderia ser um composto de epóxi, visto que a fabricante não especifica sua formulação e epóxi é um material utilizado em várias resinas fotossensível. Os índices refrativos médios das resinas epóxi convencionais variam entre 1,50 e 1,56 segundo Su (2002). Para materiais como o epóxi, que são frequentemente usados em estudos de fotoelasticidade devido à sua transparência e propriedades fotoelásticas, o valor aproximado do coeficiente ótico de tensão (f_σ) costuma estar na faixa de $2 \times 10^{-6} \text{N/m}$ a $4 \times 10^{-6} \text{N/m}$ segundo Ramesh e Lewis (2002).

A ordem de franja (N) em análise fotoelástica representa o número de franjas que aparecem entre dois pontos em um material sob tensão. Cada franja isocromática corresponde a um nível de diferença de tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) constante no material. Com a ordem de franja N encontrada foi possível plotar gráficos do comportamento das tensões e deformações nos discos utilizando o Matlab que eram dependentes da equação 27 relacionada a fotoelasticidade.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{(N \times f_\sigma)}{h} \quad (27)$$

Onde:

- $\sigma_1 - \sigma_2$: Diferença entre as tensões principais.

- f_σ : Coeficiente ótico de tensão do material.
- h : Espessura do disco.

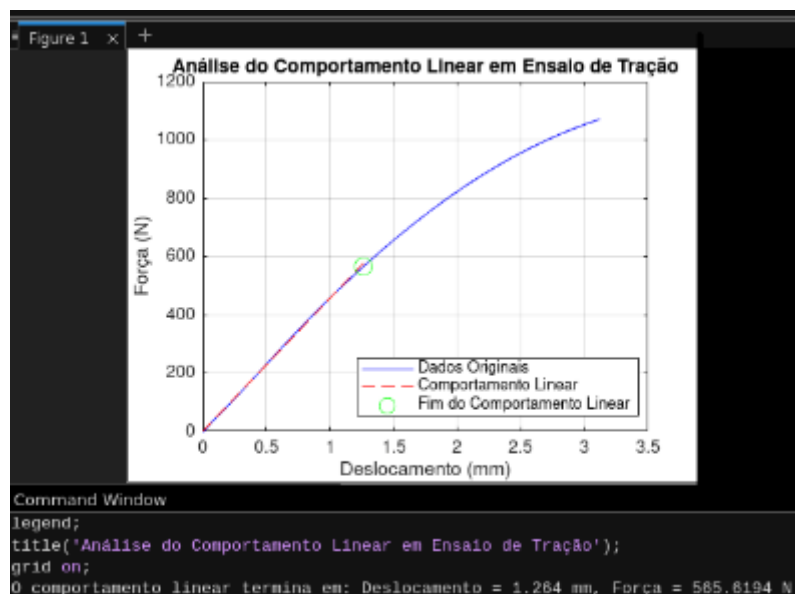
4.6 ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DOS DISCOS

4.6.1 Desenvolvimento dos códigos e simulações

Foram desenvolvidos dois códigos no software Matlab para analisar os resultados das curvas dos ensaios de tração e flexão da resina, com o objetivo de identificar o ponto em que o comportamento elástico termina. Esses códigos estão nos Quadros 3 e 4 no anexo e foram úteis para automatizar a determinação do módulo de elasticidade da resina em ambos os ensaios e também para definir a linha de deformação plástica no ensaio de tração.

No código do teste de tração, uma reta é ajustada aos pontos iniciais dos dados para definir o comportamento linear inicial. Em seguida, cada ponto após essa região é analisado para identificar desvios significativos da linha reta calculada. O primeiro ponto onde o desvio excede um limite de tolerância é marcado como o fim do comportamento linear. O código imprime os dados originais, a linha de ajuste linear inicial e marca o ponto onde a linearidade termina, exibindo o deslocamento e a força nesse ponto no gráfico. O gráfico foi ilustrado na Figura 73.

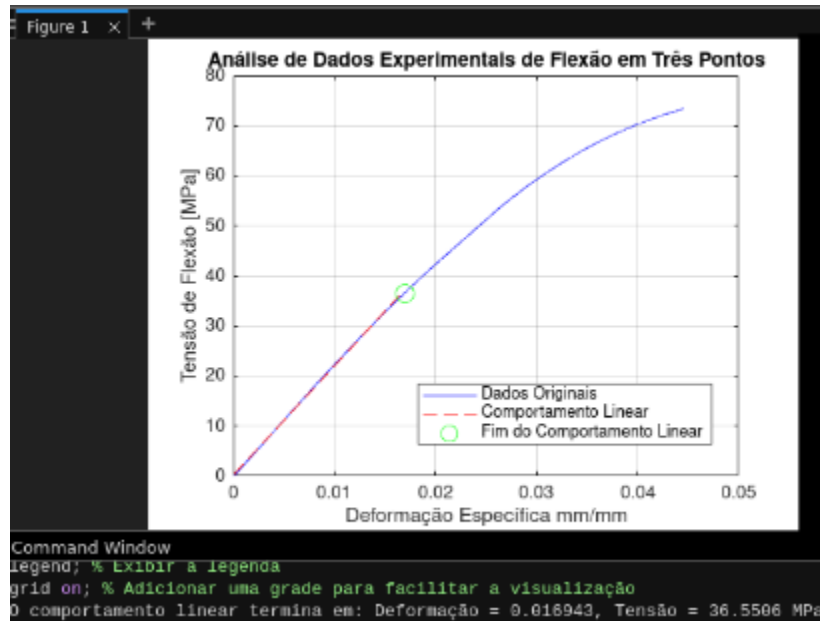
Figura 73 - Janela do gráfico do código do teste de tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O código do teste de flexão processa dados experimentais de um teste de flexão em três pontos para identificar e analisar: O comportamento linear da curva tensão por deformação; calcular o módulo de elasticidade e imprimir os resultados; destacar a região linear e o ponto onde o comportamento transita de linear para não linear conforme a Figura 74.

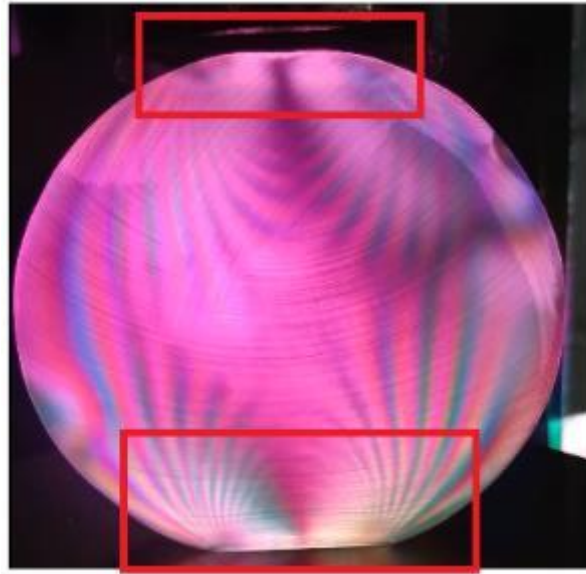
Figura 74 - Código do teste de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para as simulações numéricas, foi usado novamente o módulo Static Structural do software Ansys. O material apresentou uma região significativa de deformação plástica no ensaio de compressão dos discos conforme a Figura 75, o que foi considerado nas simulações dos discos e das engrenagens.

Figura 75 - Regiões com deformação plástica com carregamento de 4000 N

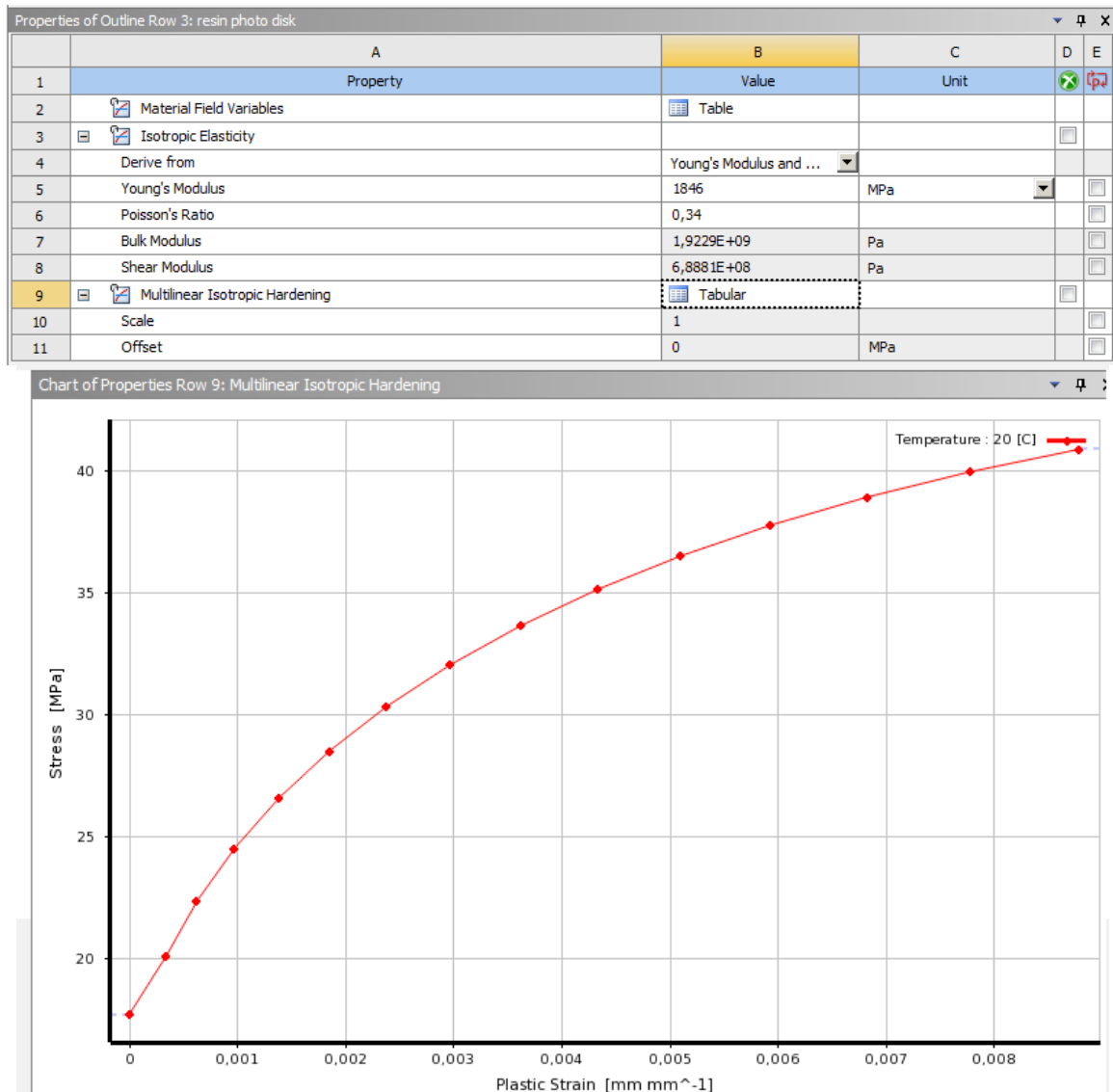


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A caracterização do material foi realizada criando-se um novo material na biblioteca do software, conforme mostrado na Figura 76. Baseado nos dados experimentais obtidos nos ensaios dos CDP de resina e nos códigos de Matlab desenvolvidos foi utilizado o recurso da linha de deformação plástica MISO (*Multilinear Isotropic Hardening*).

O módulo volumétrico e o módulo de cisalhamento foram preenchidos automaticamente pelo software após a especificação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

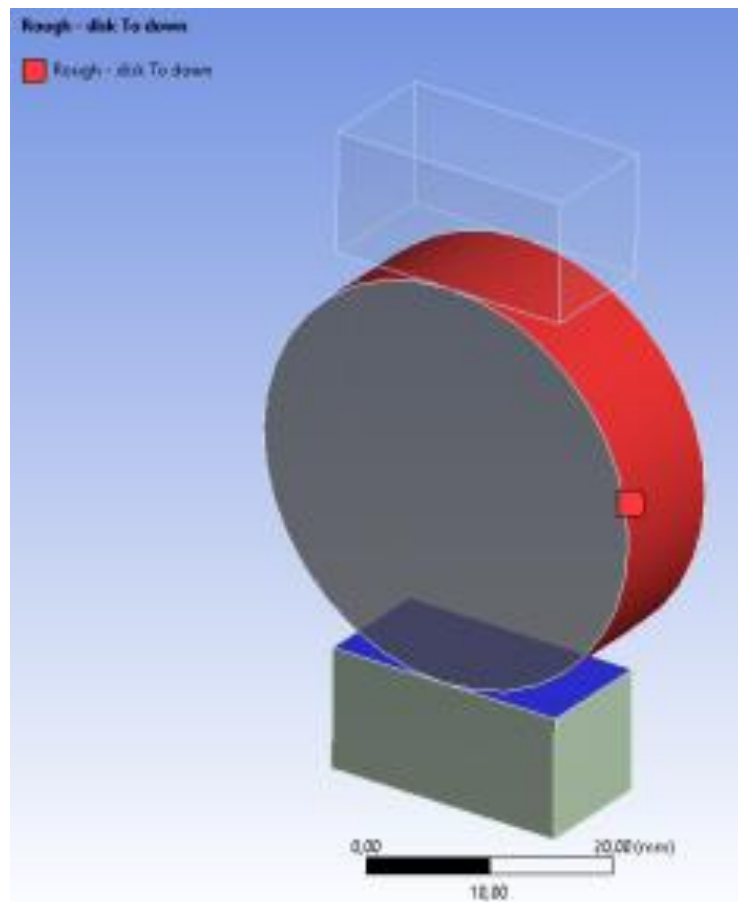
Figura 76 - Caracterização do novo material



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os modelos tridimensionais dos discos foram criados no *Design Modeler*, com as mesmas dimensões dos reais: diâmetro de 36 mm e espessura de 11 mm. Os suportes que aplicam compressão aos discos foram feitos com material de aço estrutural disponível na biblioteca do software. Os contatos entre os suportes e os discos foram definidos como ásperos, conforme mostrado na Figura 77, eliminando a necessidade de restrições adicionais de movimento; nesse caso, o coeficiente de atrito é tratado como infinito.

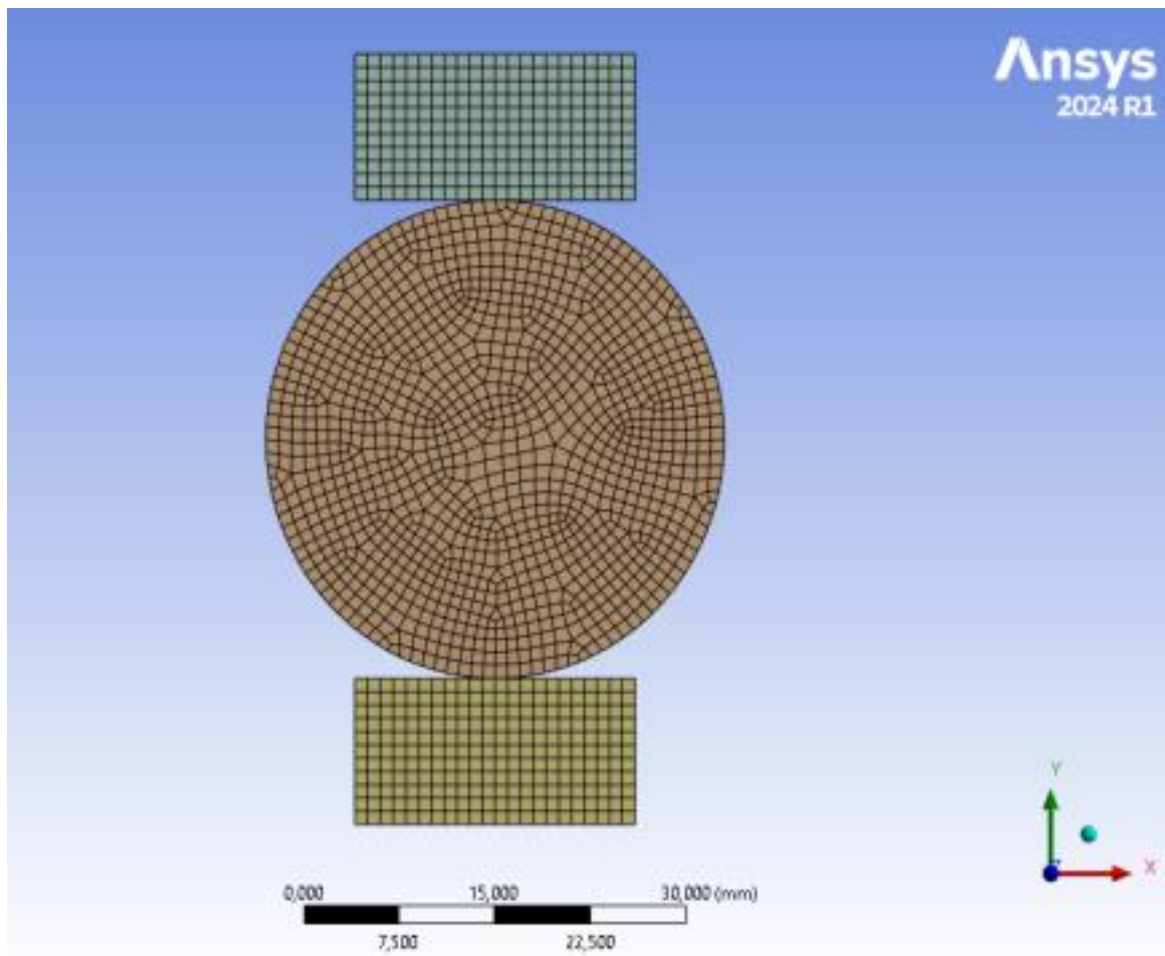
Figura 77 - Contato entre os suportes e o disco



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A geração da malha para a simulação foi realizada utilizando o método de dimensionamento de malha, garantindo volumes uniformes hexaédricos. O tamanho do elemento foi definido como 1 mm. Além disso, a técnica *multizone* foi aplicada para alinhar as linhas dos elementos nos pontos de contato entre os suportes e os discos, conforme mostrado na Figura 78. Os tipos de elementos usados foram: SOLID186, CONTA174, TARGE170 e SURF154.

Figura 78 - Malha criada nos suportes e no disco com 82.053 nós e 18.172 elementos.

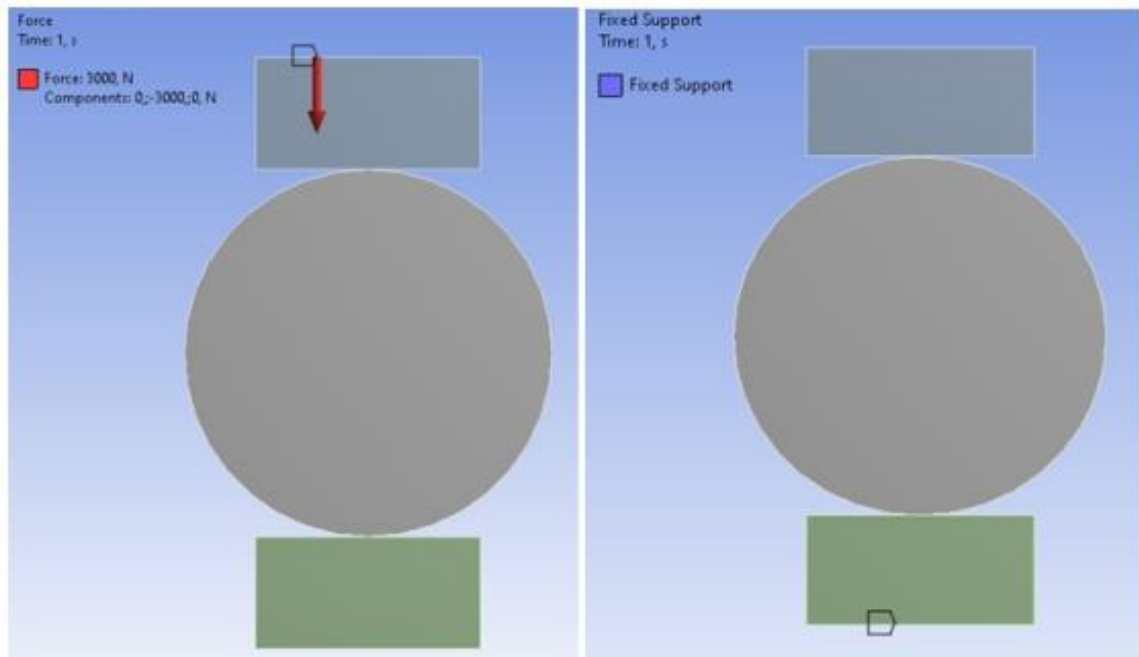


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Essa estratégia foi essencial para a formulação de contato de Lagrange, que impõe restrições de não penetração e detecção de contato nos nós, conforme (Kim, 2023; Doca, 2014). O algoritmo de contato utilizado foi o método de Lagrange aumentado, com detecção de contato no ponto de integração de Gauss, considerando o fator de rigidez de contato igual a 1,0. Para definir as condições de contorno da simulação, foram estabelecidas as seguintes condições, conforme mostrado na Figura 79:

- Força compressiva: aplicada no topo do suporte superior.
- Suporte fixo: restrição de movimento imposta na base do suporte inferior.

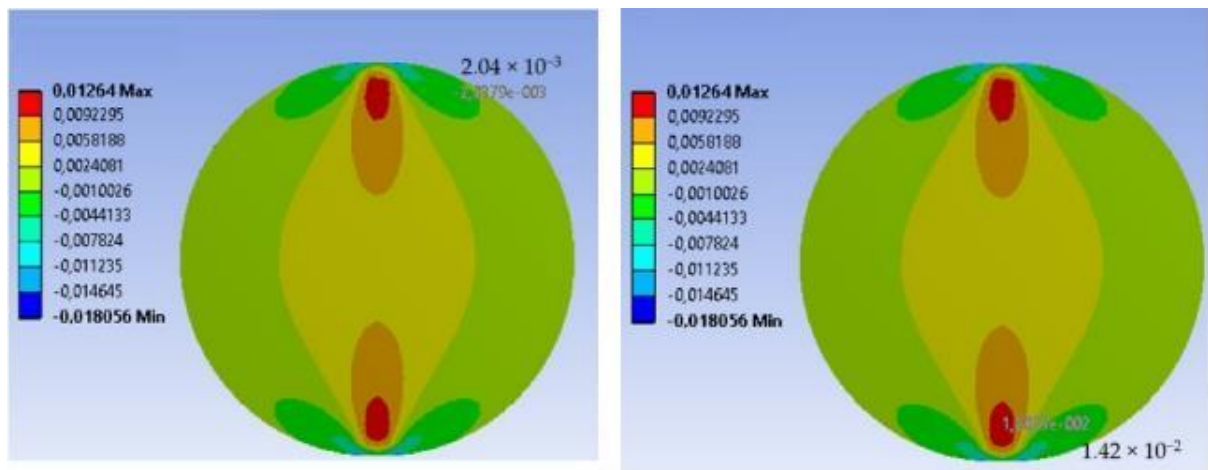
Figura 79 - Condições de contorno nos suportes e disco



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

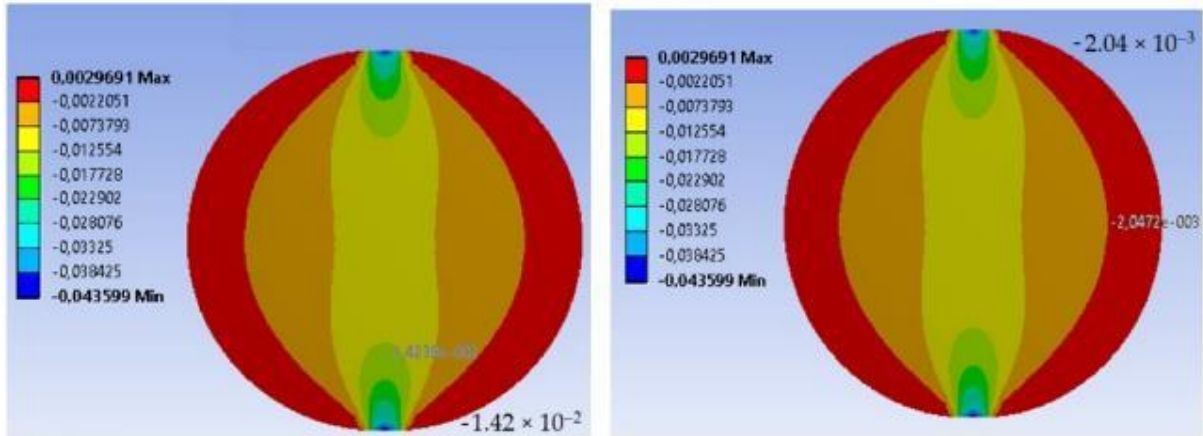
Os dados adquiridos da simulação da compressão dos discos são ilustrados nas Figuras 80,81 e 82:

Figura 80 - Deformação específica direção y



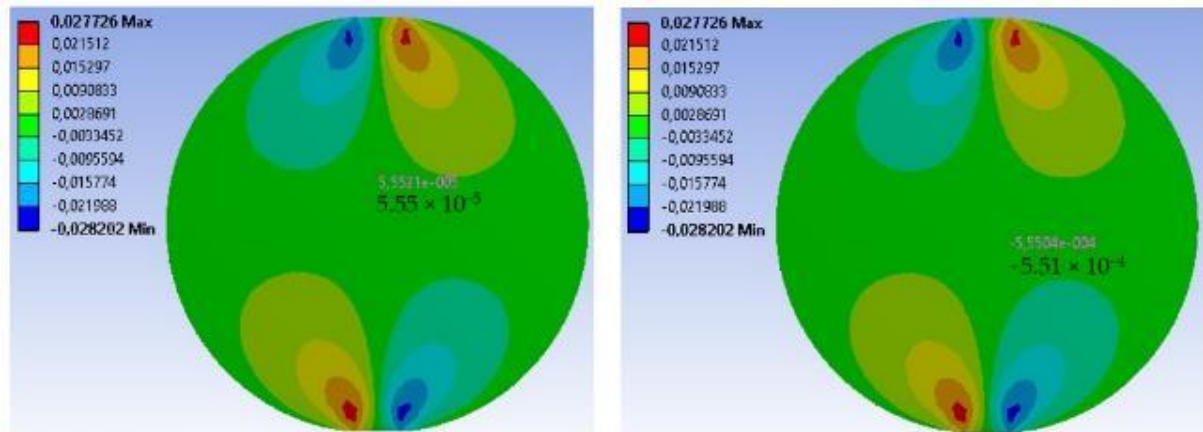
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 81 - Deformação específica direção x



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 82 - Deformação específica plano xy



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.6.2 Campo de tensões nos discos de resina com fotoelasticidade

As equações do método analítico (que definem o valor exato do campo de tensões em função de x e y , com origem no centro do disco) foram estudadas de acordo com as Equações 9-12 e 28-30 segundo (Ramesh, 2021; Magalhães et al., 2015; Doca, 2014), para prever com precisão o comportamento da distribuição de tensões nos discos de resina durante as simulações.

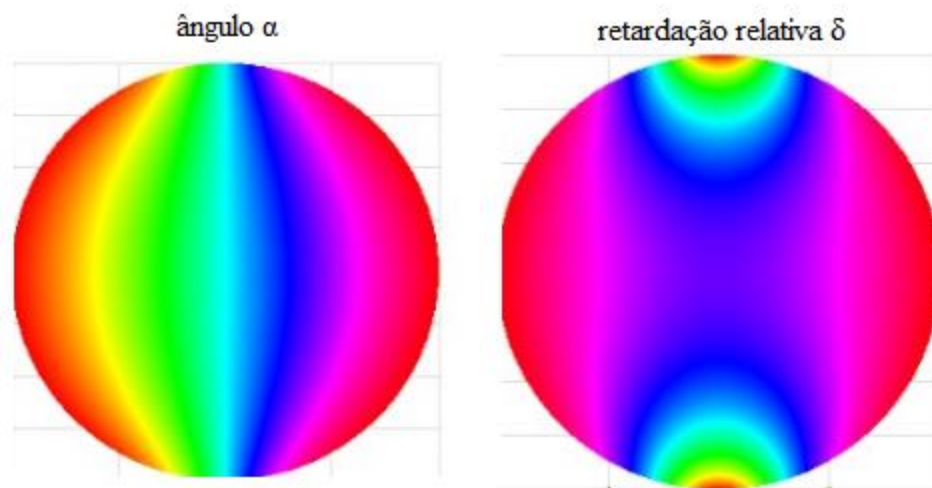
$$\delta = \frac{2\pi H}{F} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (28)$$

$$\alpha = 0,5 \times \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right) \quad (29)$$

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \mu)} \quad (30)$$

Na análise de fotoelasticidade, isocromático indica linhas ou superfícies onde a tensão ou a intensidade da cor são constantes, isóclina refere-se a linhas ou curvas de igual desvio da luz ao passar por um meio anisotrópico. O valor teórico de δ isocromático está relacionado com dois componentes principais de tensão, σ_1 e σ_2 , conforme a Equação 28. Em contraste, o ângulo teórico da isóclina α pode ser calculado pela Equação 29 utilizando os componentes de tensão σ_x , σ_y e τ_{xy} . Para a técnica de medição de fase, os parâmetros a serem obtidos são o ângulo α e a retardação relativa δ , os quais indicam, respectivamente, a direção e a diferença dos esforços principais. O gráfico sem escala destes parâmetros foi ilustrado na Figura 83.

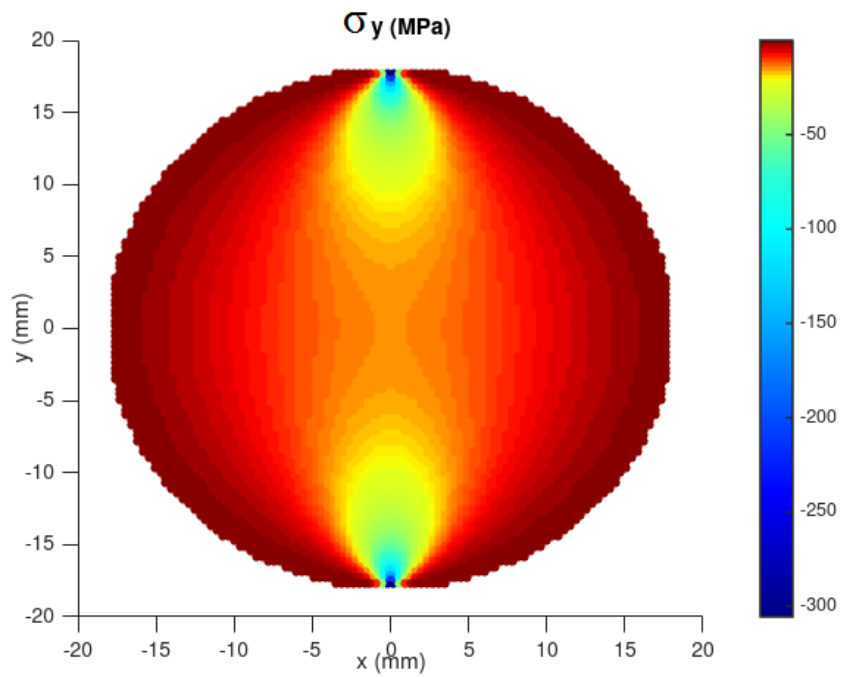
Figura 83 - Ângulo α e retardação relativa δ



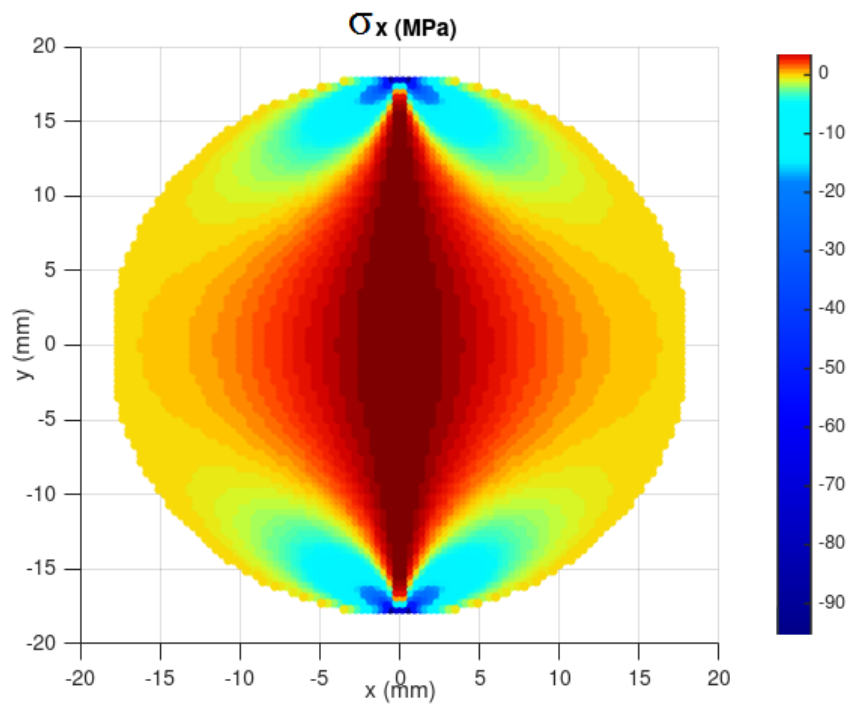
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nas equações foram utilizadas as dimensões reais do disco (diâmetro de 36 mm e espessura de 11 mm), a carga aplicada (3000 N, compressiva ao longo do eixo y, mesmo valor utilizado no ensaio dos discos reais), o módulo de elasticidade da resina (1846 MPa) e o coeficiente de Poisson 0,34. Os gráficos de tensão, deformação e cisalhamento foram gerados utilizando o software Matlab conforme o Quadro 5 no anexo.

Os gráficos desenvolvidos por este código são ilustrados nas Figuras 84-91. No caso das deformações específicas Figuras 89-91 foi utilizado o recurso de “*probe*” (*medidas do ponto*) para marcar pontos para a comparação com os outros métodos.

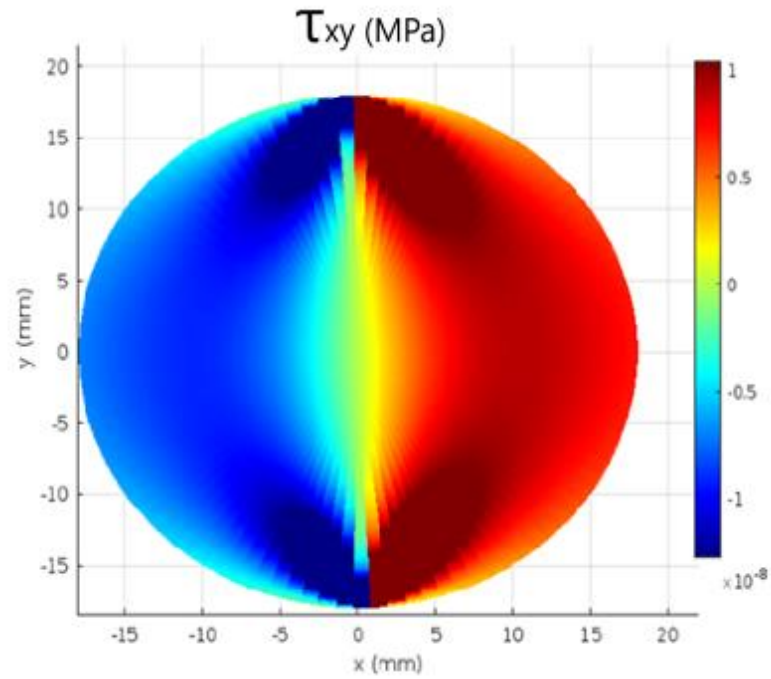
Figura 84 - Tensão normal na direção y

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 85 - Tensão normal na direção x

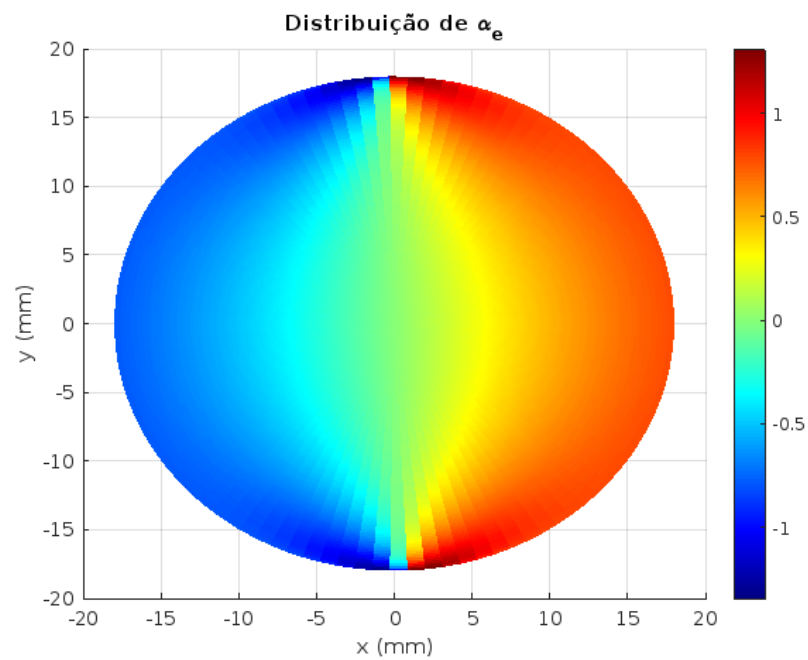
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 86 - Tensão de cisalhamento no plano xy



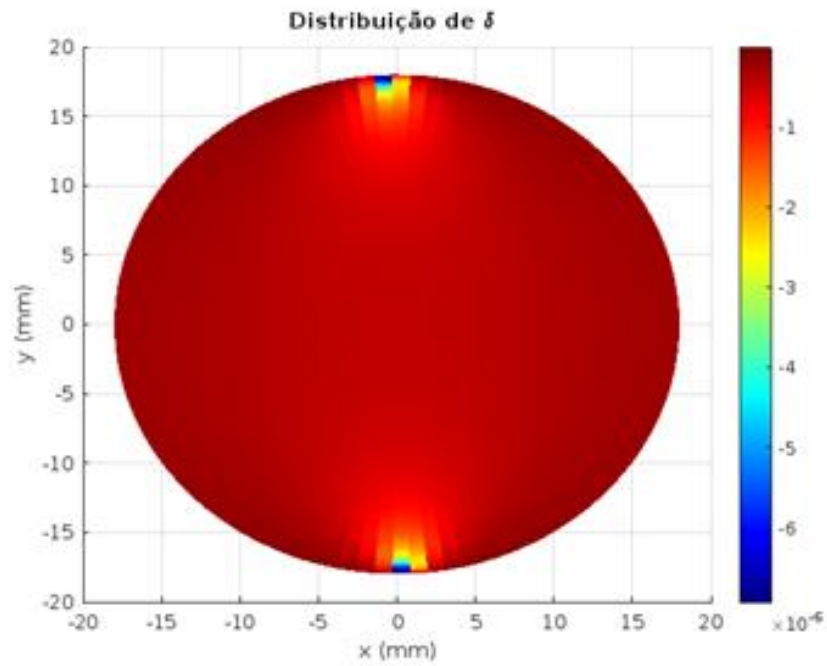
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 87 - Ângulo α



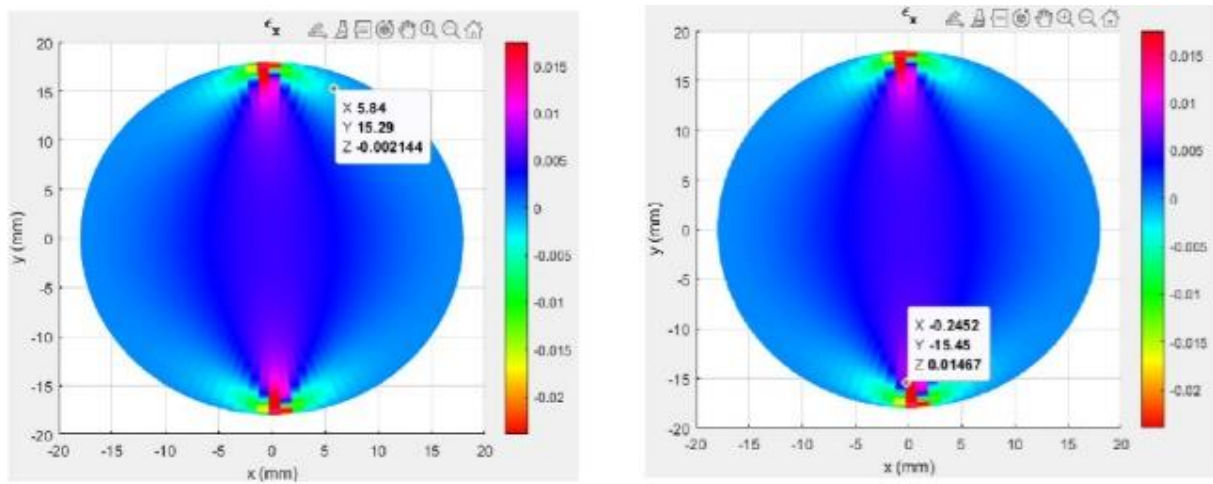
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 88 - Retardação relativa δ



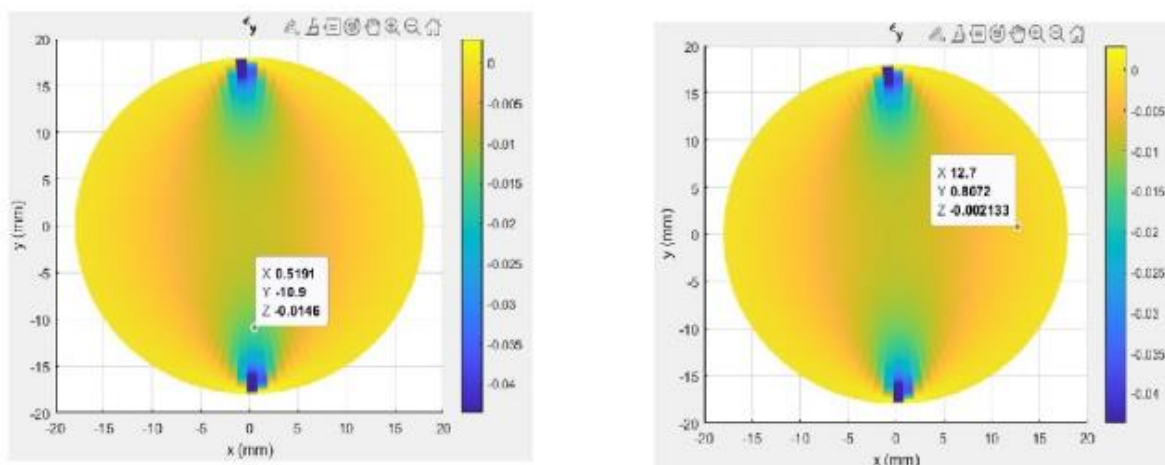
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 89 - Deformação específica na direção x



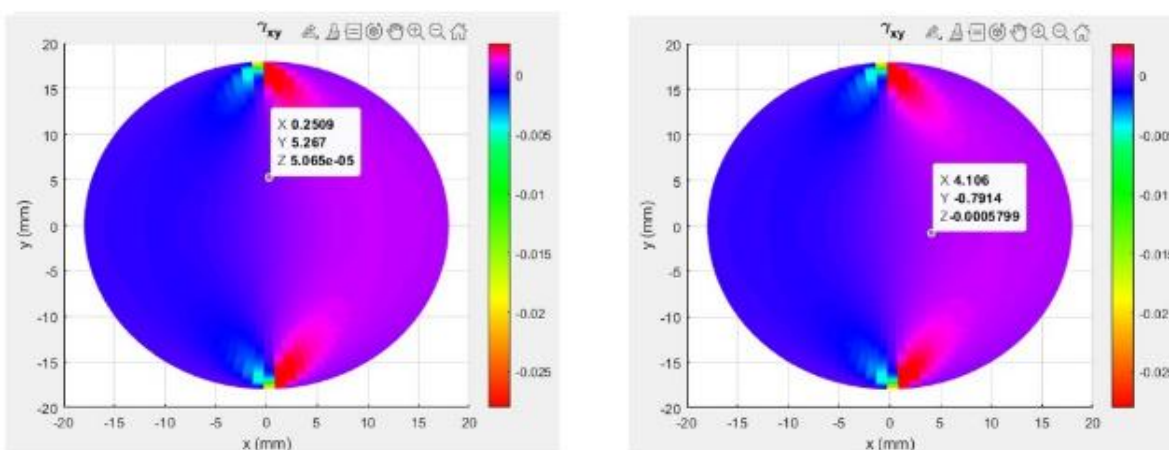
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 90 - Deformação específica na direção y



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 91 - Deformação específica no plano xy

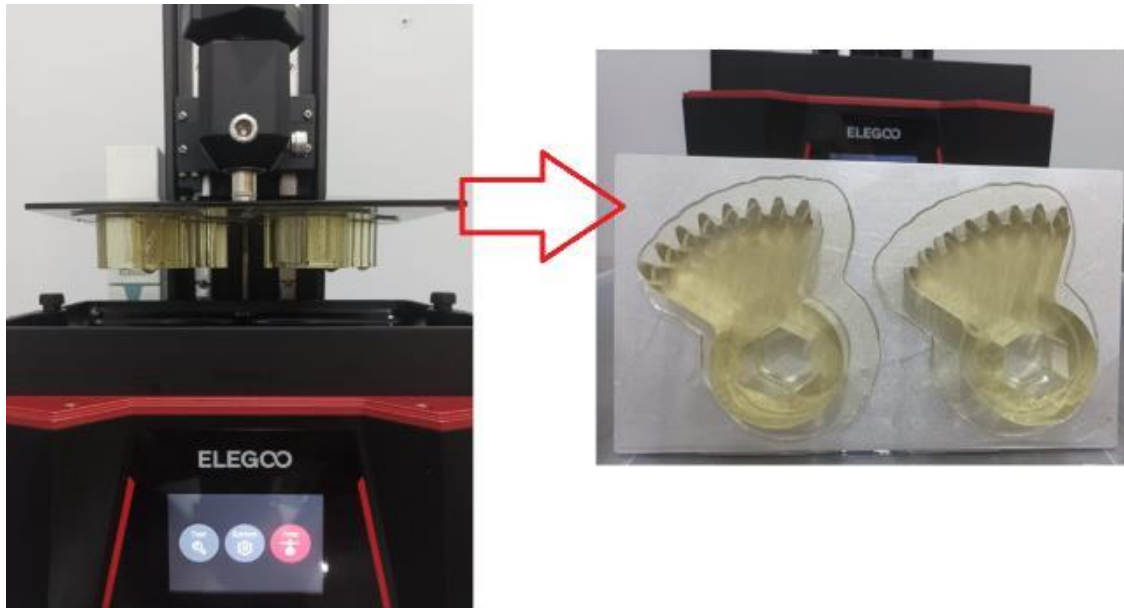


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.6.3 Estudo sobre carregamento estático de engrenagens de resina desalinhadas com extensômetros

Nesse experimento foram utilizadas duas engrenagens cilíndricas de dentes retos modificadas ilustradas na Figura 92 de módulo 3 com largura dos dentes de 20 mm produzidas de resina pelo processo MSLA na impressora Elegoo Saturn 2. Seguindo os mesmos parâmetros da Tabela 4.

Figura 92 - Engrenagens modificadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

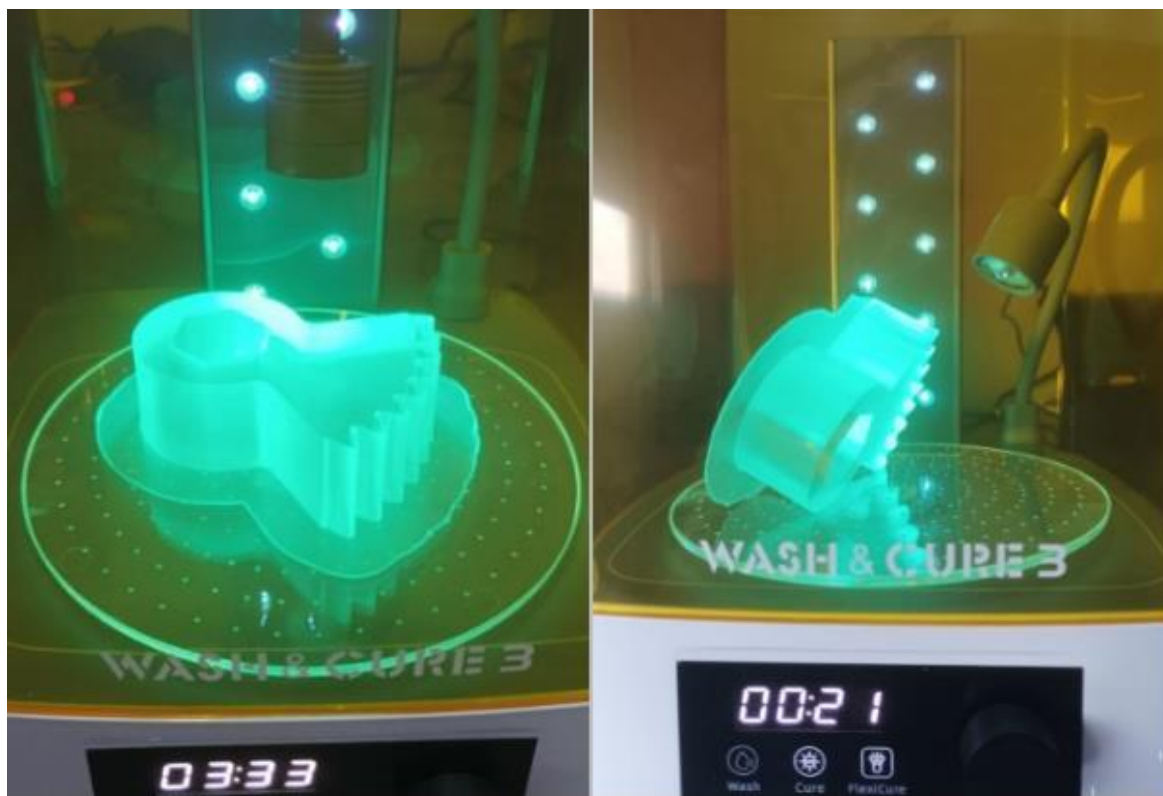
O tempo de lavagem foi 6 minutos para remover a resina não solidificada do furo sextavado e dos dentes. Após a secagem as engrenagens foram curadas por uma hora. O processo de lavagem e cura foi ilustrado na Figura 93 e 94.

Figura 93 – Remoção do excesso de resina não curada na impressora



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

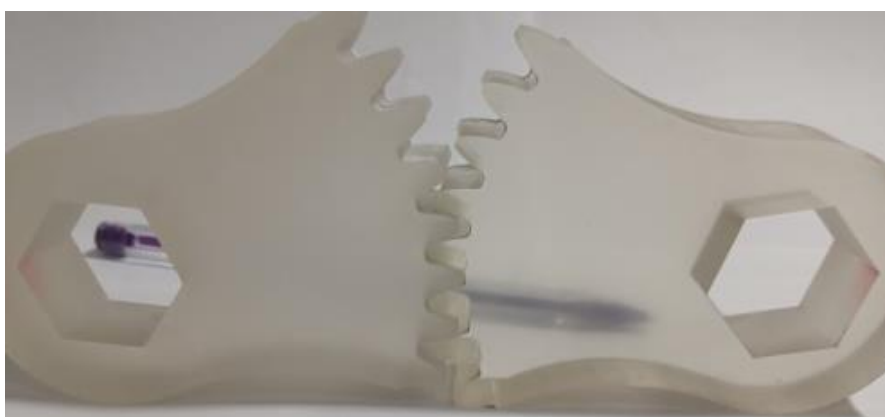
Figura 94 - Cura das peças



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a cura foi removido a camada base que se estendida além do contorno da engrenagem. O procedimento foi semelhante aos dos discos utilizando as lixas de granulometria 400 e 600 com a finalização de polimento. A diferença entre as peças antes e depois do polimento foi ilustrada na Figura 95. A engrenagem polida ficou translúcida.

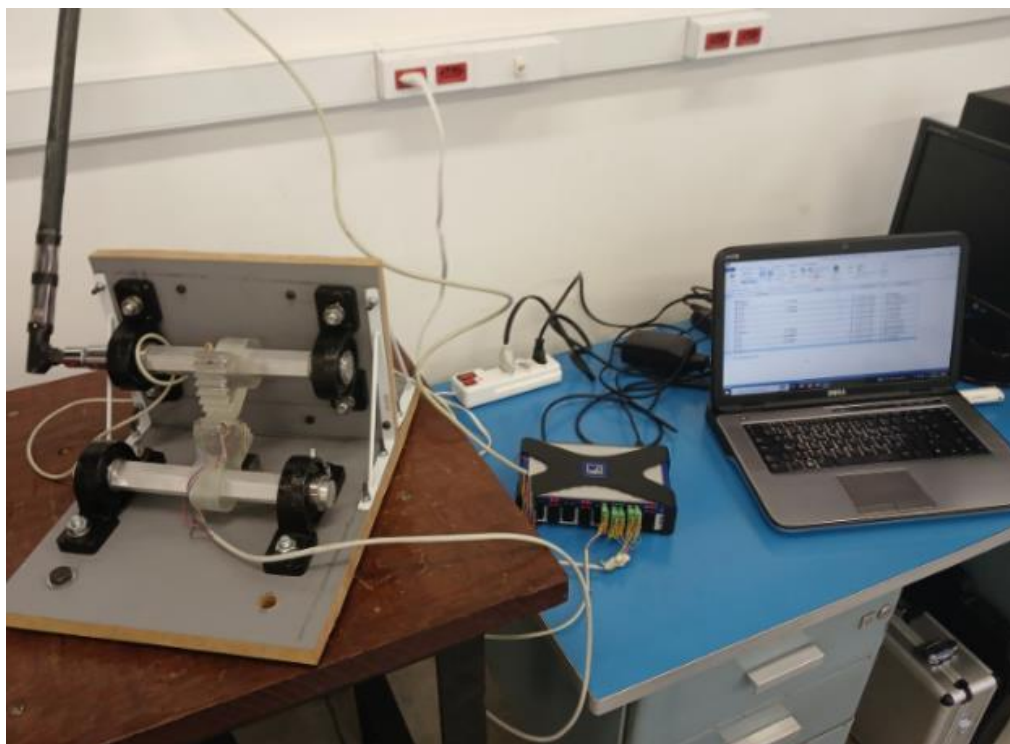
Figura 95 - Diferença de acabamento entre as peças



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Neste experimento foi realizada a aquisição de dados com extensômetros das deformações específicas nos dentes da engrenagem devido ao desalinhamento axial semelhante ao experimento realizado com as engrenagens de aço conforme a Figura 96. O pinhão pode girar livremente para ocorrer o contato e travamento do engrenamento, e pode deslocar axialmente sobre o eixo sextavado de uma polegada. O eixo foi fixado entre dois mancais pedestais com rolamentos oscilantes. Os mancais podem ser movidos 5 mm para alinhamento radial das engrenagens. Neste eixo pode ser acoplado um adaptador tipo soquete sextavado onde o torque foi aplicado.

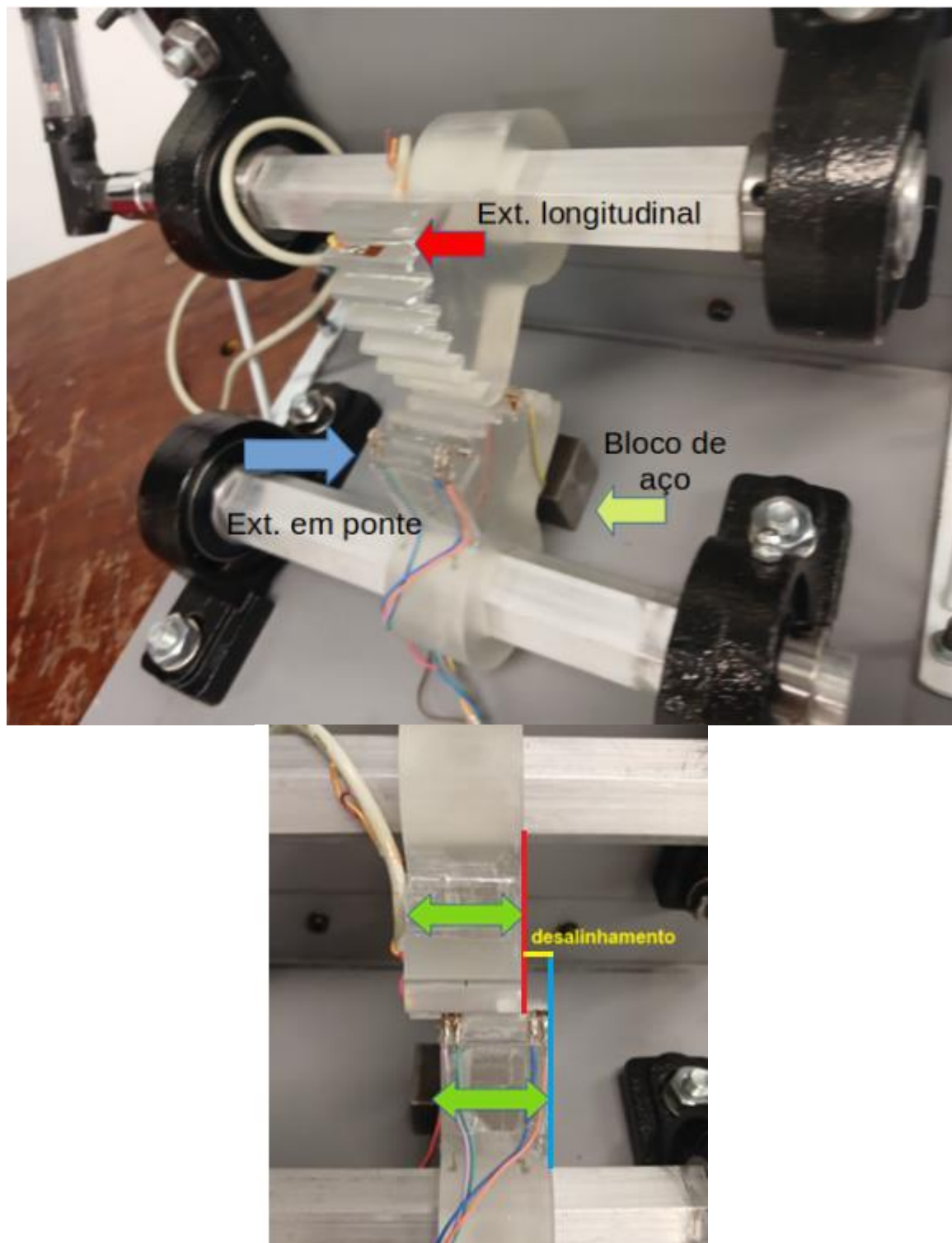
Figura 96 - Experimento com engrenagens de resina, montagem dos equipamentos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A coroa foi fixada no segundo eixo que era semelhante ao eixo do pinhão exceto que não tem encaixe para o soquete. Também utiliza o mesmo modelo de mancal pedestal com rolamentos e possui mobilidade para os alinhamentos. Essa engrenagem pode girar, mas o movimento foi travado devido ao bloco de aço apoiado abaixo dela e sobre a base rígida. Este conjunto de eixos e engrenagens modificadas foi desenvolvido de forma que pode existir o movimento no sentido axial e radial dos eixos conforme a Figura 97. Assim as engrenagens foram produzidas com ajuste deslizante possibilitando o desalinhamento estudado de forma estática.

Figura 97 - Montagem dos extensômetros, bloco de apoio e mobilidade das engrenagens



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No caso do desalinhamento axial a distância de centro a centro das engrenagens permanece inalteradas, mas uma engrenagem é movida ao longo de seu eixo de modo que o contato é perdido em parte de sua largura de face. O espaço amostral do deslocamento foi de

0 mm, 2 mm e 8 mm. O torque foi aplicado no eixo do Pinhão conforme Figura 98 utilizando o torquímetro instrumentado com extensômetros segundo o trabalho de Encarnação (2019).

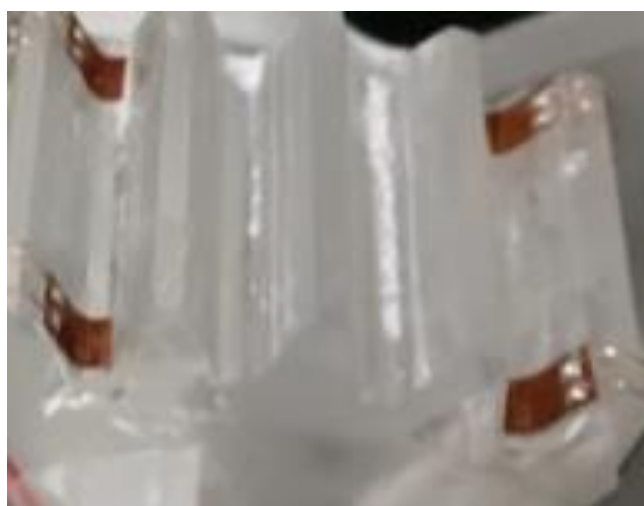
Figura 98 - Aplicação de torque no eixo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nesses experimentos foram estudados o comportamento da deformação específica na base e na face do dente. Foram utilizados os extensômetros BF350-3AA conforme a Figura 99 da fabricante HT-Sensor com propriedades listadas na Tabela 1.

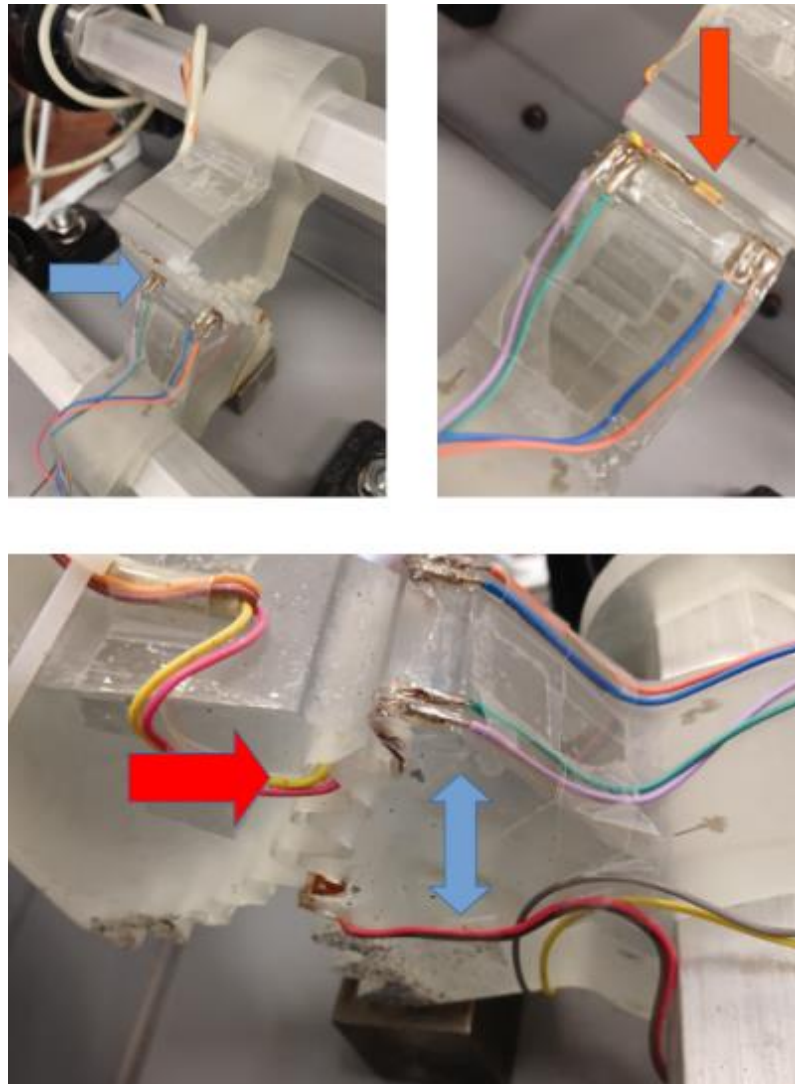
Figura 99 - Extensômetros do modelo BF350-3AA



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O primeiro ensaio realizado foi a obtenção de sinal no sentido longitudinal do extensômetro fixado na face do dente (indicado pela seta vermelha na Figura 100). O extensômetro foi ligado na configuração de 1/4 de ponte utilizando o sistema de aquisição de dados HBM. Foram repetidos 3 vezes para cada deslocamento (0 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm), utilizando o torque aumentando de forma gradual até o máximo de 9 Nm. Em cada curva (tempo, deformação específica). O segundo ensaio realizado com as engrenagens de resina de módulo 3 foi a obtenção de sinal nos quatro extensômetros fixados entre a face e base dos dentes (indicados na Figura 100 pela seta azul). Os extensômetros foram ligados na configuração de ponte completa utilizando o sistema de aquisição de dados HBM. Foram repetidos 3 vezes para cada deslocamento (0 mm, 2 mm, 8 mm), aumentando o torque de forma gradual até o máximo de 9 Nm. Em cada curva (tempo, deformação específica). A montagem do equipamento foi ilustrada na Figura 100.

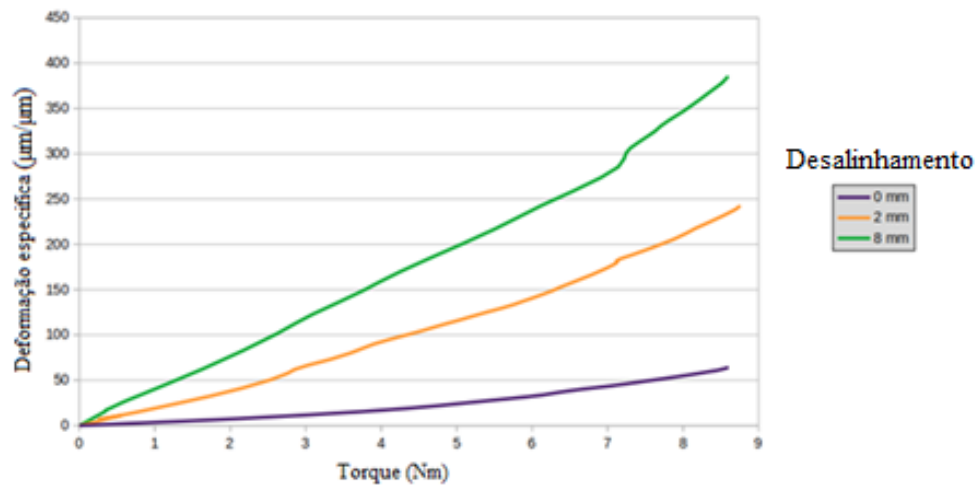
Figura 100 - Indicação da posição dos extensômetros nas engrenagens modificadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados do ensaio com extensômetro longitudinal estão representados no gráfico da Figura 101. Observa-se que a deformação aumenta proporcionalmente ao torque aplicado, especialmente na linha verde, correspondente ao desalinhamento de 8 mm.

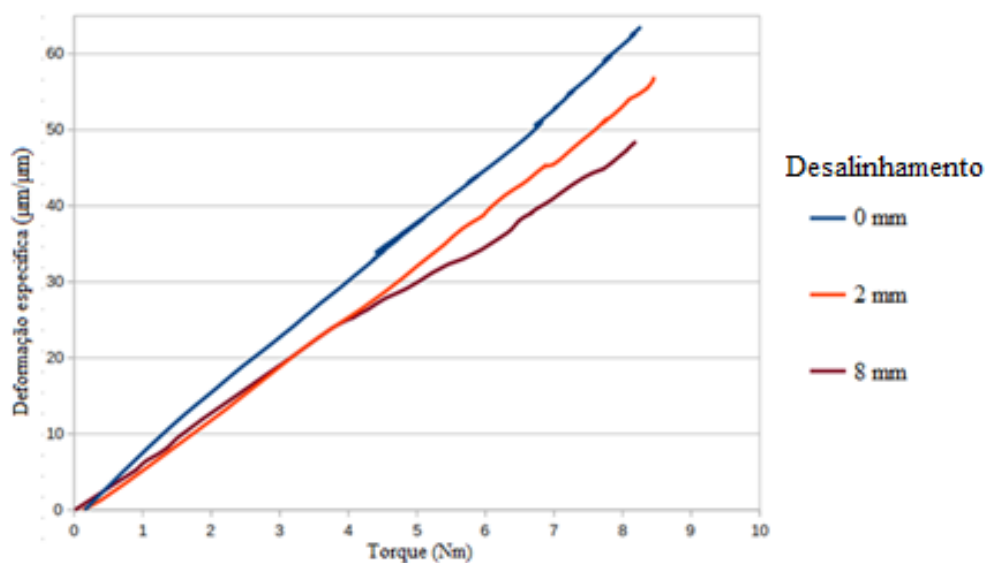
Figura 101 - Experimento com extensômetro longitudinal na engrenagem de resina



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No outro experimento considerando a ligação de ponte completa na base e lateral dos dentes conforme a Figura 102, os dados adquiridos são semelhantes ao do ensaio da engrenagem de aço considerando a diminuição da inclinação das retas com o aumento do torque. Entretanto a linha de 8 mm de resina não obteve a inclinação mais acentuada como a de aço.

Figura 102 - Experimento com ponte completa na base e lateral dos dentes da engrenagem de resina



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

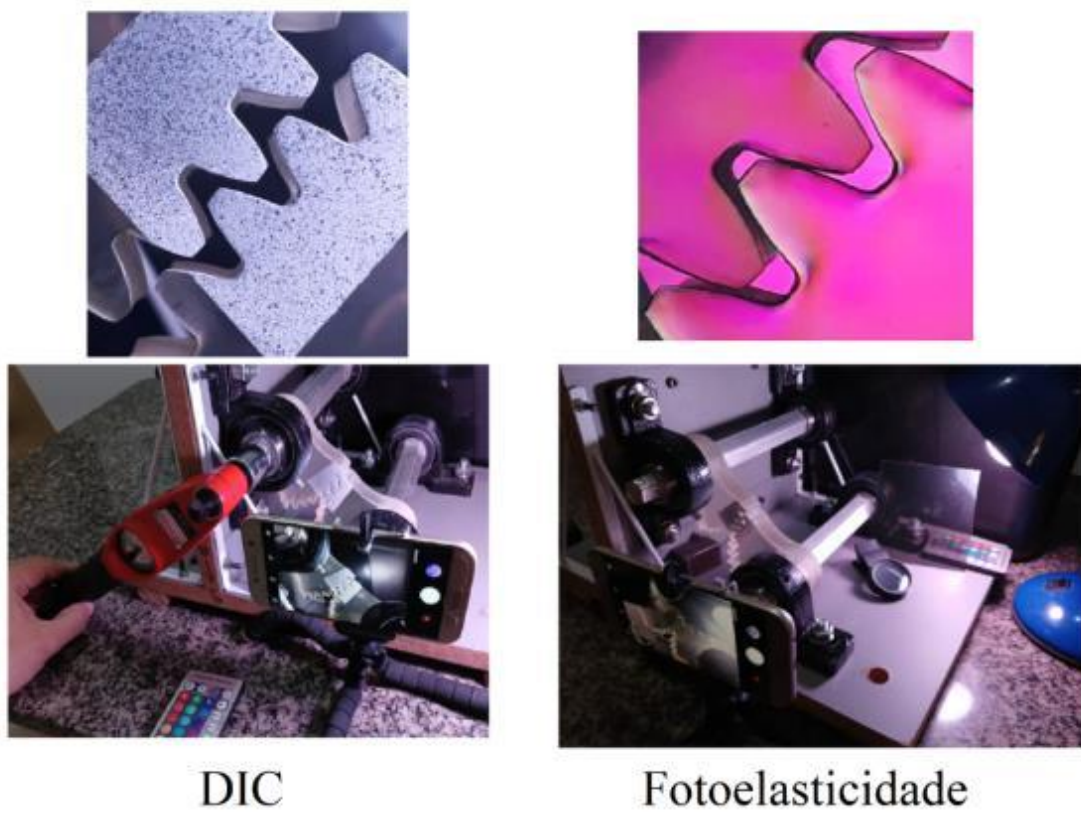
A resina utilizada para a impressão da engrenagem apresentou um comportamento mecânico de deformação semelhante ao observado no experimento com aço. Em ambos os casos, as curvas de deformação se afastaram à medida que o desalinhamento aumentava, respeitando as devidas proporções relacionadas aos diferentes módulos de elasticidade, torque aplicado e volume das peças. Essa semelhança foi evidenciada dentro de um espaço amostral delimitado, com carregamento estático variando de 0 a 9 Nm.

4.6.4 Desalinhamento radial das engrenagens de resina com DIC e fotoelasticidade

Para o experimento com DIC partes dos dentes das engrenagens modificadas de resina foram pintadas com padrão específico anteriormente feito nos discos utilizando tinta preta e branca. O procedimento de aquisição de imagens foi repetido: Inicialmente a região da peça a ser estudada foi polida e coberta de fundo branco; após a tinta branca secar foi aplicado um jato disperso e afastado da tinta preta. Esse jato afastado gera pontos espaçados de tinta preta que foram analisados pelos softwares para a definição do deslocamento desses pontos. No outro experimento de fotoelasticidade foi a engrenagem foi girada para apenas os dentes sem tinta ficarem expostos, alente CPL foi acoplada a câmera e o filme polarizador foi adicionado em frente a fonte de luz.

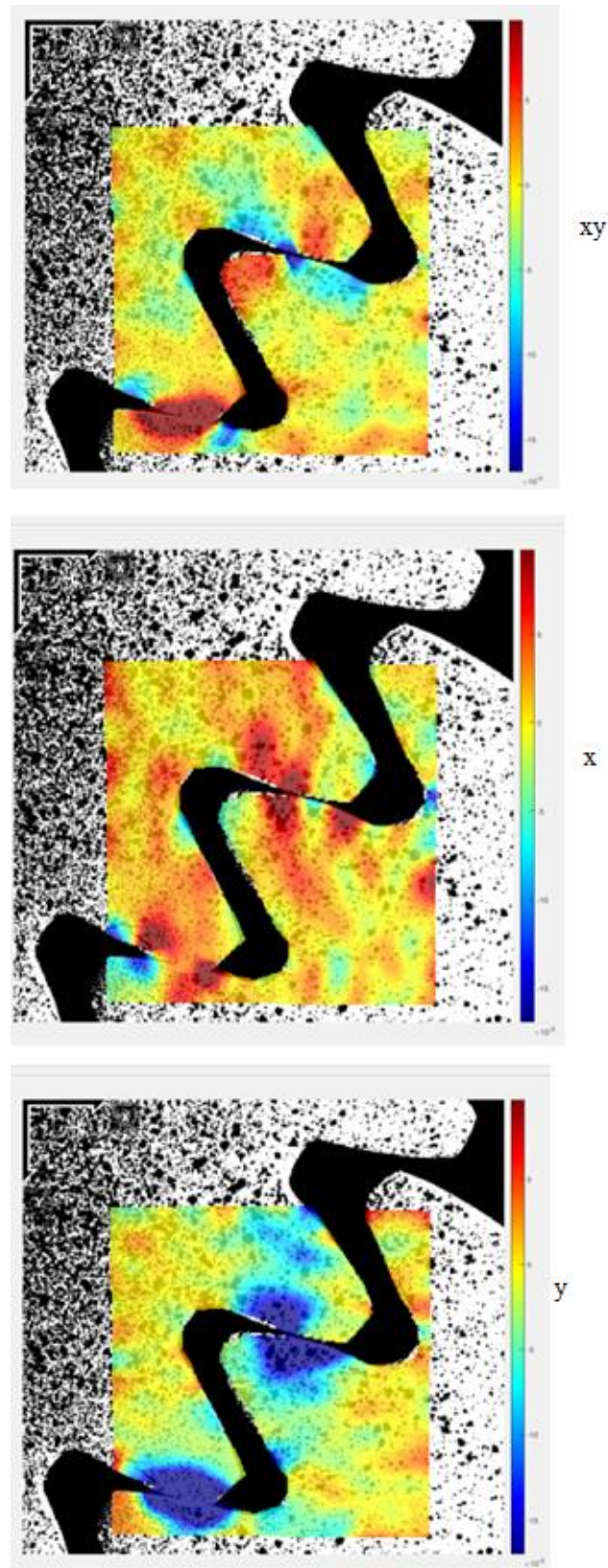
As engrenagens de resina foram montadas no suporte, o eixo superior recebeu o torque aumentando gradativamente até 9 Nm aplicado por um torquímetro com mostrador de ponteiros *Geodore Torqueleader* serie ADS25 número 0AK001450 calibrado. O segundo eixo foi travado de modo a engrenagem não se mover. Utilizando um celular foi gravado o vídeo do ensaio. O procedimento foi ilustrado na Figura 103. Os dados obtidos neste experimento são ilustrados nas Figuras 104-107.

Figura 103 - Montagem para os ensaios de DIC e fotoelasticidade com engrenagens de resina



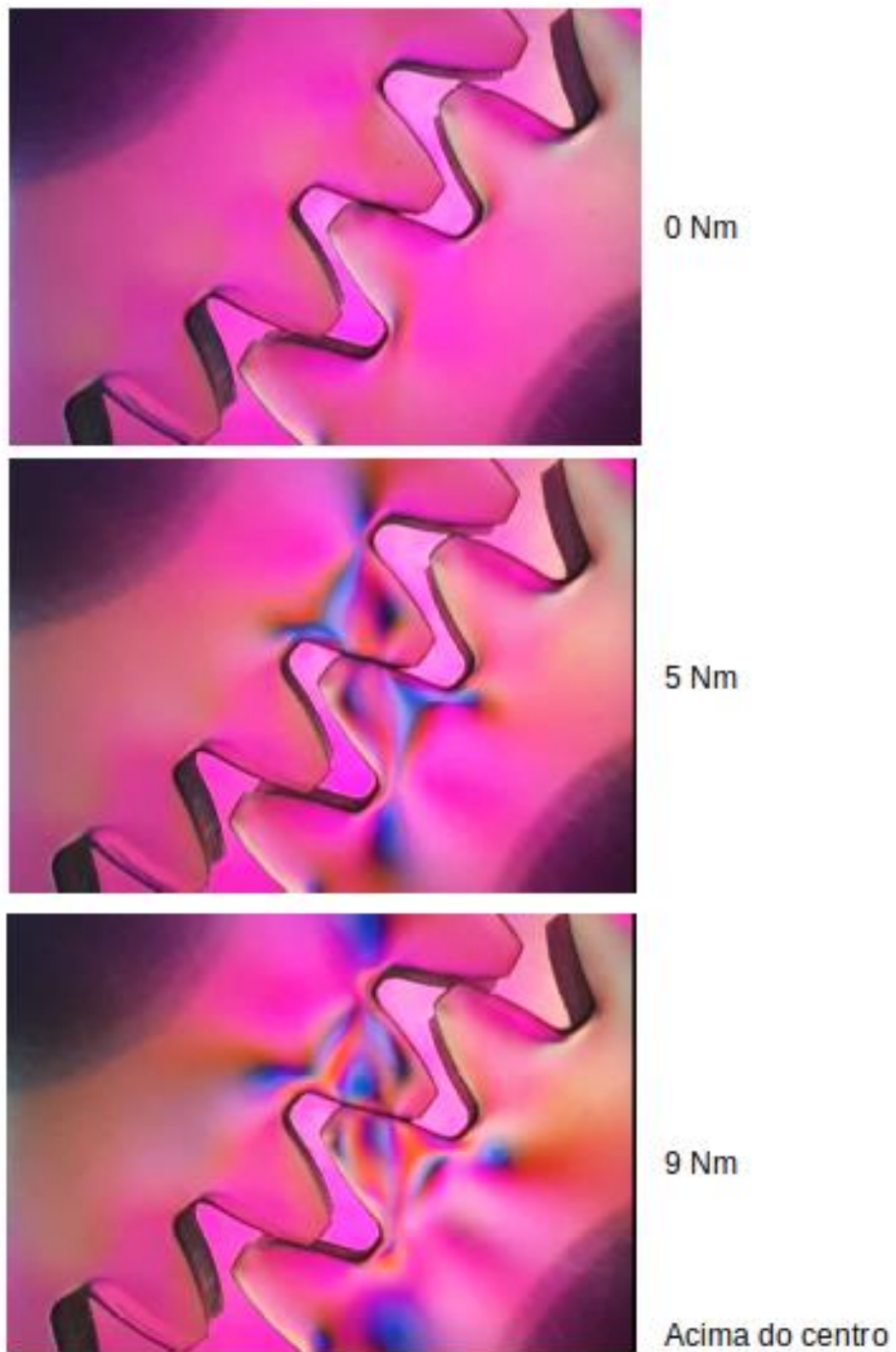
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 104 - Deformações específicas no plano xy e nas direções x e y, acima do diâmetro primitivo



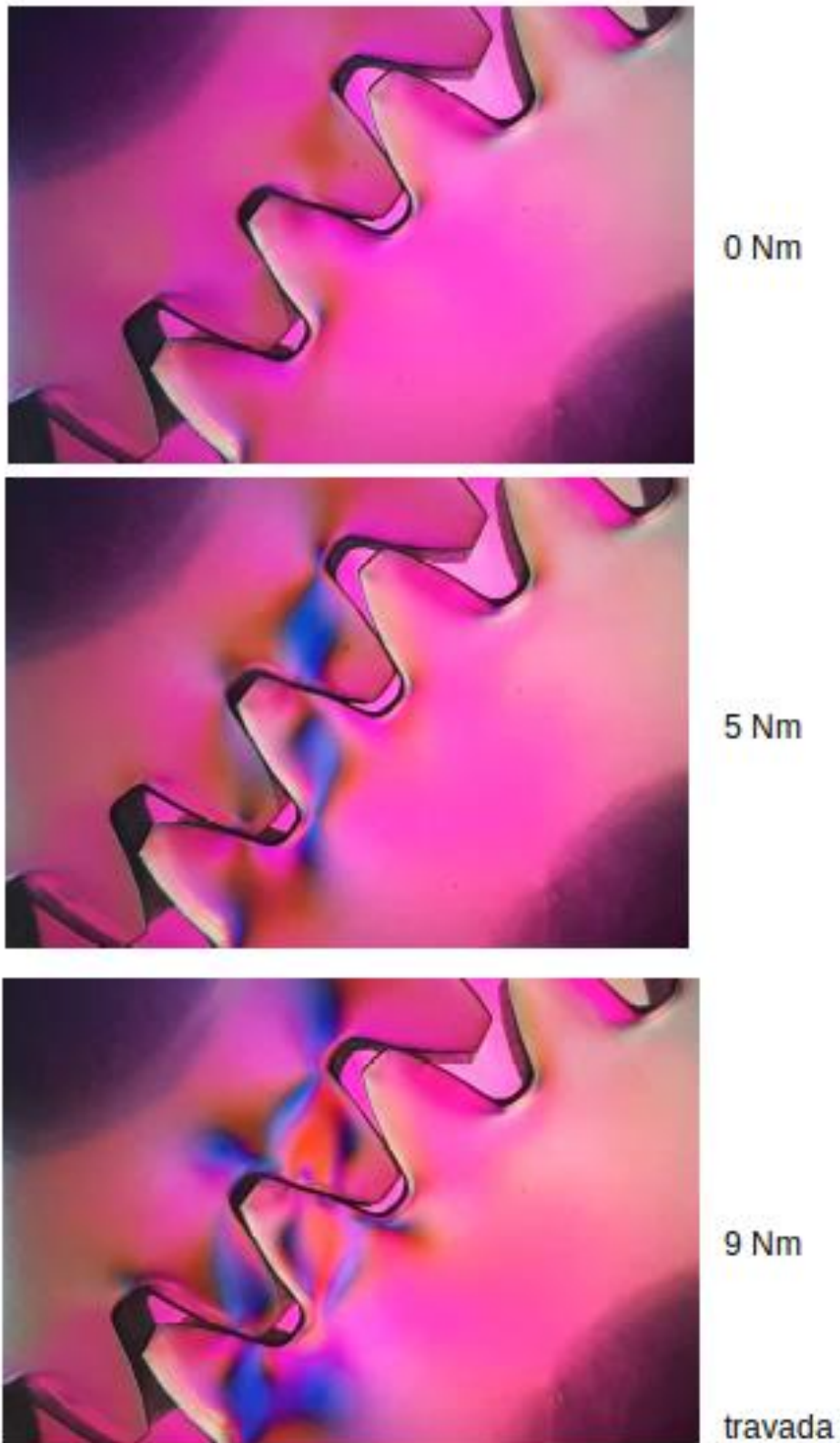
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 105 - Tensões na engrenagem de resina com engrenamento acima do diâmetro primitivo



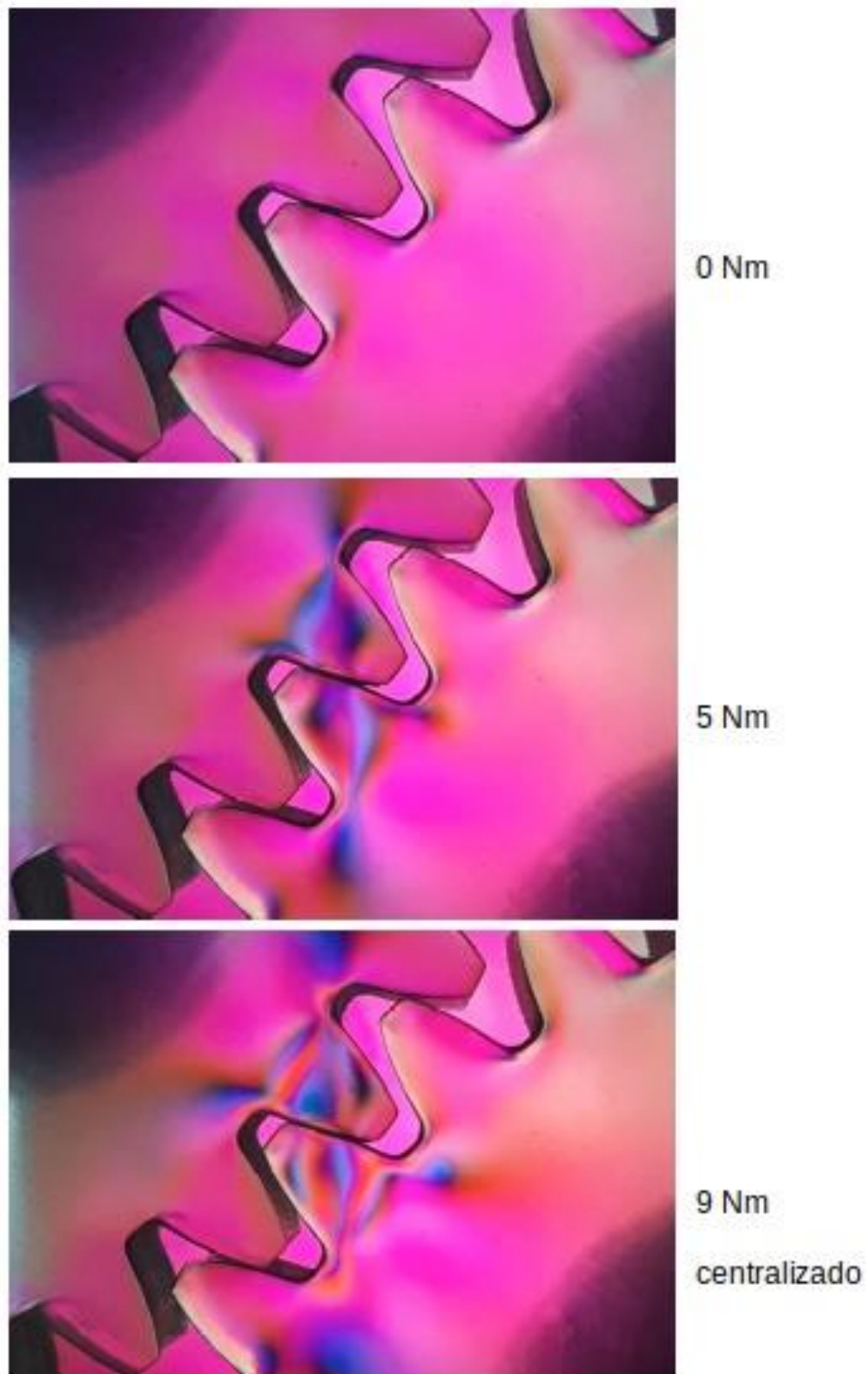
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 106 - Tensões na engrenagem de resina com engrenamento travado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 107 - Tensões na engrenagem de resina com engrenamento próximo do diâmetro primitivo

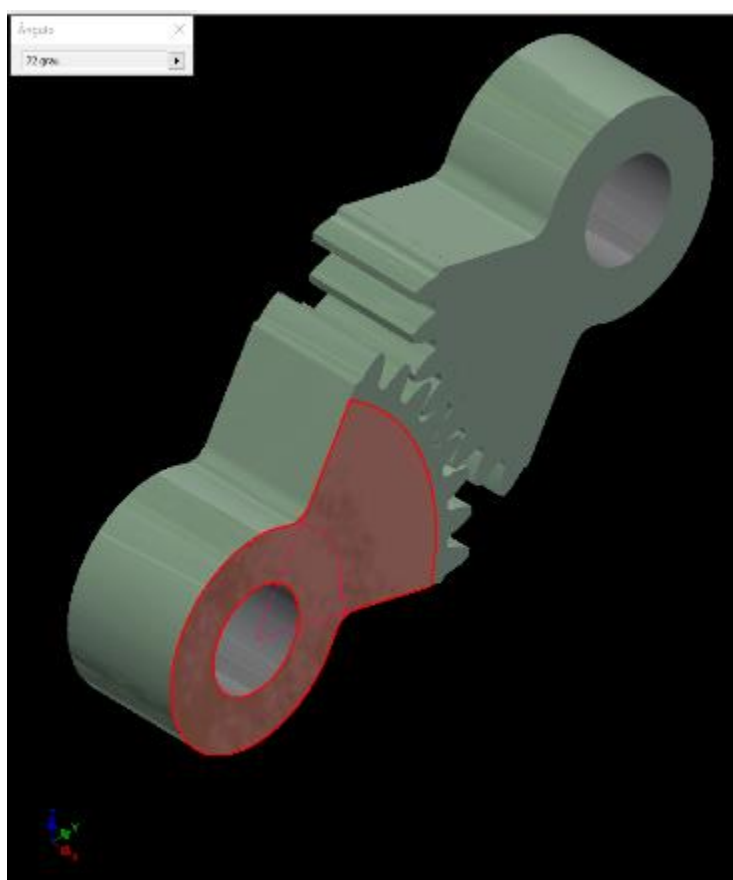


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.7 ESTUDO NUMÉRICO DOS CAMPOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO DA ENGRENAGEM DE RESINA

As engrenagens de resina foram modeladas no estudo numérico para comparação dos campos de tensão e deformação com os métodos experimentais. O modelo foi desenvolvido no software Autodesk Inventor conforme Figura 108 e exportado para o Ansys. Este modelo foi adaptado do real substituindo o furo sextavado para um furo circular para a facilitação do uso de restrição de apoio cilíndrico no Ansys.

Figura 108 - Modelo tridimensional da engrenagem modificada

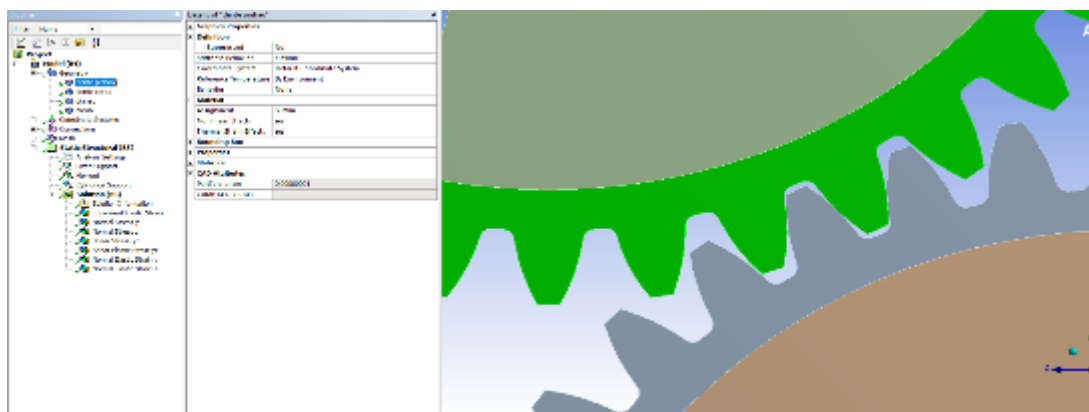


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os modelos foram divididos em duas partes conforme a Figura 109. As regiões foram denominadas como: coroa, pinhão, dente da coroa e dente do pinhão. O material utilizado aqui foi o mesmo dos ensaios dos discos com a implementação da curva *MISO* apenas com modificação do nome para “60mim” que está relacionado com o tempo de cura. Experimentalmente foi verificado que com o torque acima de 12 Nm ocorre deformação

plástica no raio da base do dente, assim o torque foi definido com o valor máximo de 9 Nm para a simulação ocorrer no regime elástico.

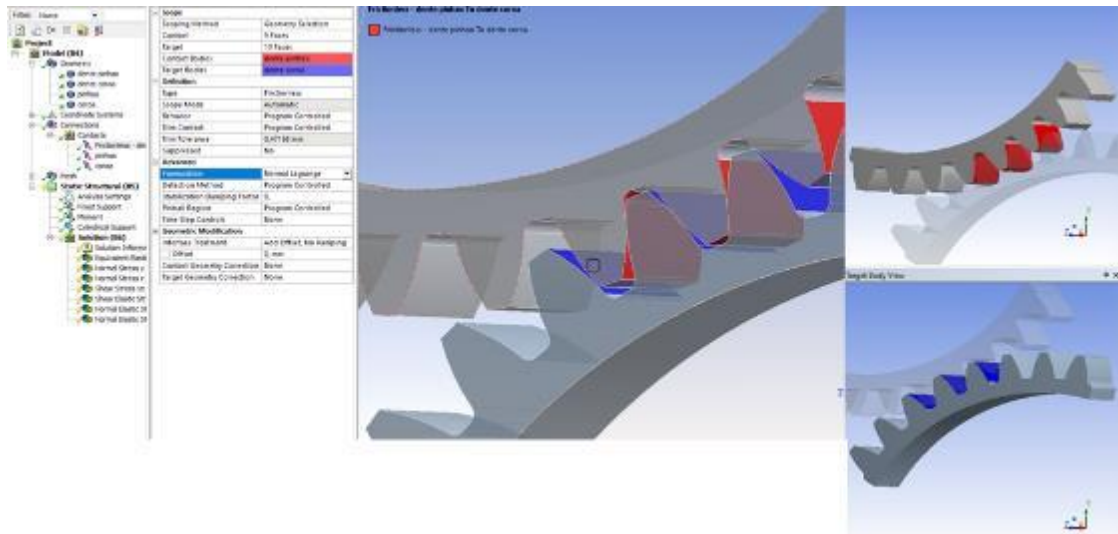
Figura 109 - Divisão das regiões das engrenagens



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As regiões de contato ocorrem entre os dentes no engrenamento e entre as duas regiões de cada engrenagem. Foi utilizado o contato *bonded* entre as regiões da mesma engrenagem, devido a sua característica de fixação e restrição de movimento entre as regiões unidas. No engrenamento foi utilizado o contato *frictionless* com o método normal Lagrange considerando a hipótese de contato sem atrito seria válida para análises estáticas focadas em forças normais e na distribuição de tensão em materiais isotrópicos e homogêneos, onde o atrito pode ser negligenciado segundo Wang e Zhu (2013). O método Normal Lagrange, por sua vez, foi utilizado no contexto do contato de Hertz para garantir alta precisão na determinação das forças normais e na imposição rigorosa da condição de não penetração entre as superfícies conforme Wang e Zhu (2013).

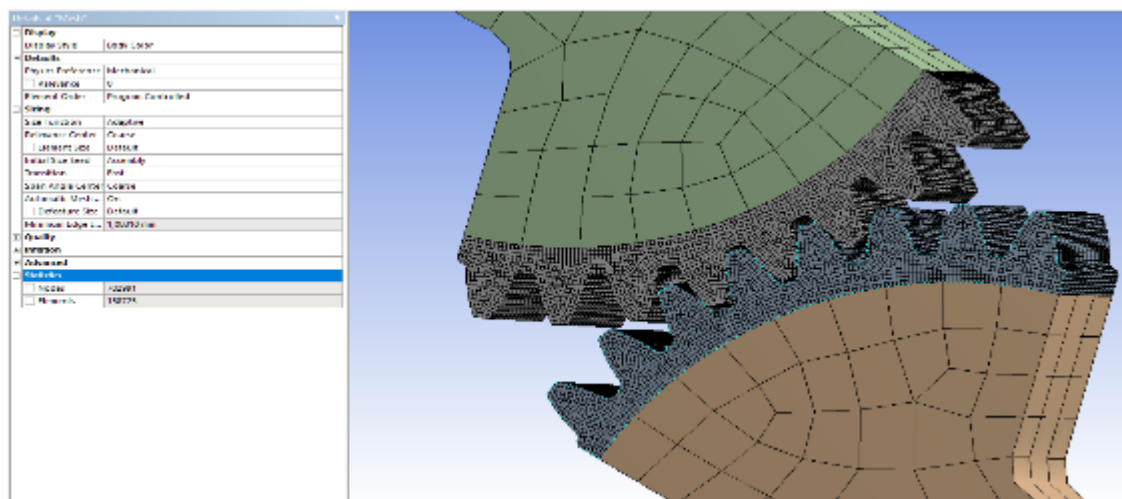
Figura 110 - Região de contato



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Cada engrenagem foi dividida em duas regiões para facilitar o desenvolvimento das malhas, conforme ilustrado na Figura 111. Na região do engrenamento, foco principal do estudo, foi utilizada uma malha mais refinada com elementos de 1 mm, criada por meio da ferramenta *sizing*. Já a região do corpo ou cubo recebeu uma malha menos densa. No total, o modelo resultou em 702.991 nós e 158.725 elementos.

Figura 111 - Desenvolvimento das malhas

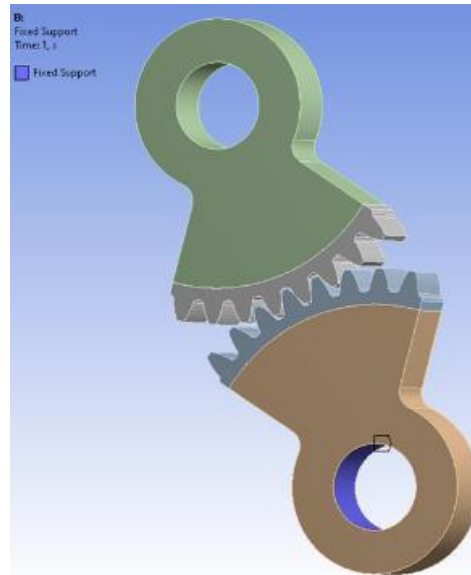


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As restrições utilizadas neste modelo foram ilustradas nas figuras 112-114. A região interna do furo do eixo da coroa foi restringida com o suporte fixo. No pinhão foram

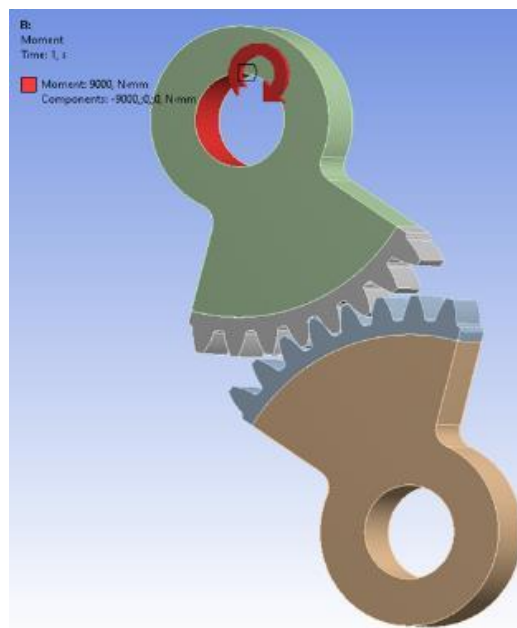
adicionados o torque e o suporte cilíndrico. O torque utilizado foi o mesmo que no experimento de fotoelasticidade com 9 Nm. O suporte cilíndrico não restringiu apenas o movimento de rotação do pinhão em torno do próprio furo do eixo.

Figura 112 – Posicionamento do suporte fixo da coroa



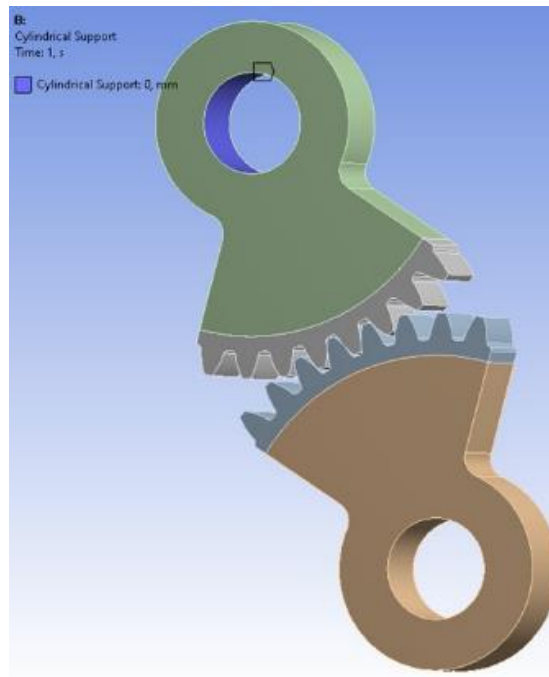
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 113 - Torque no pinhão



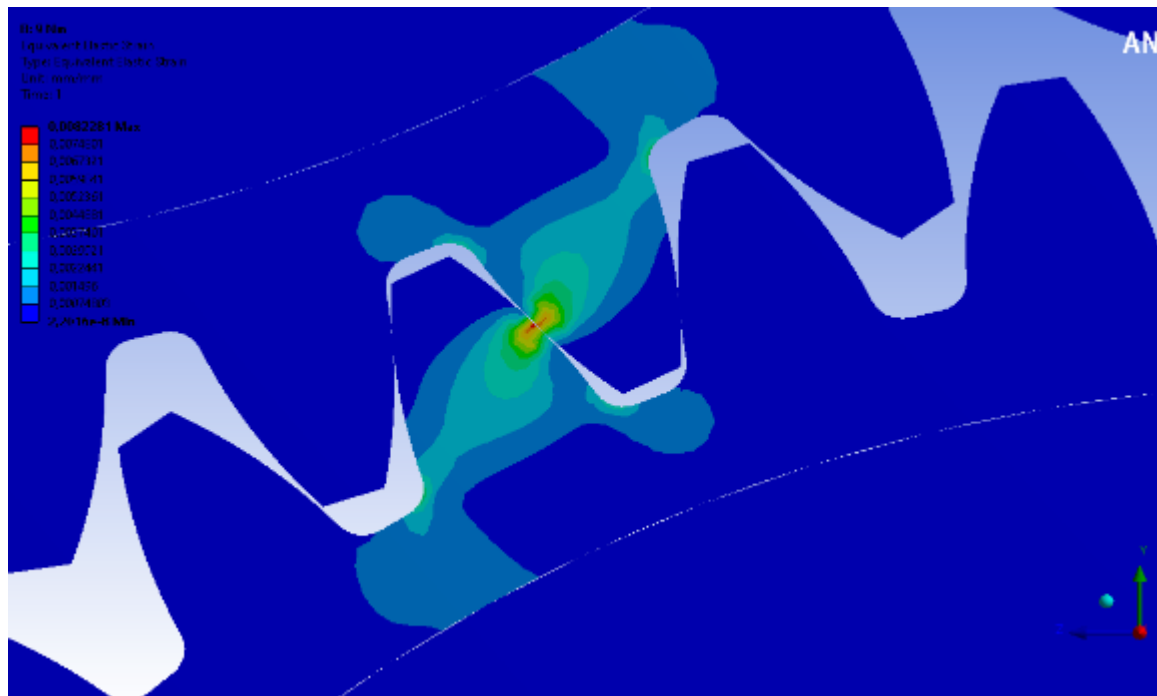
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 114 - Suporte cilíndrico no pinhão



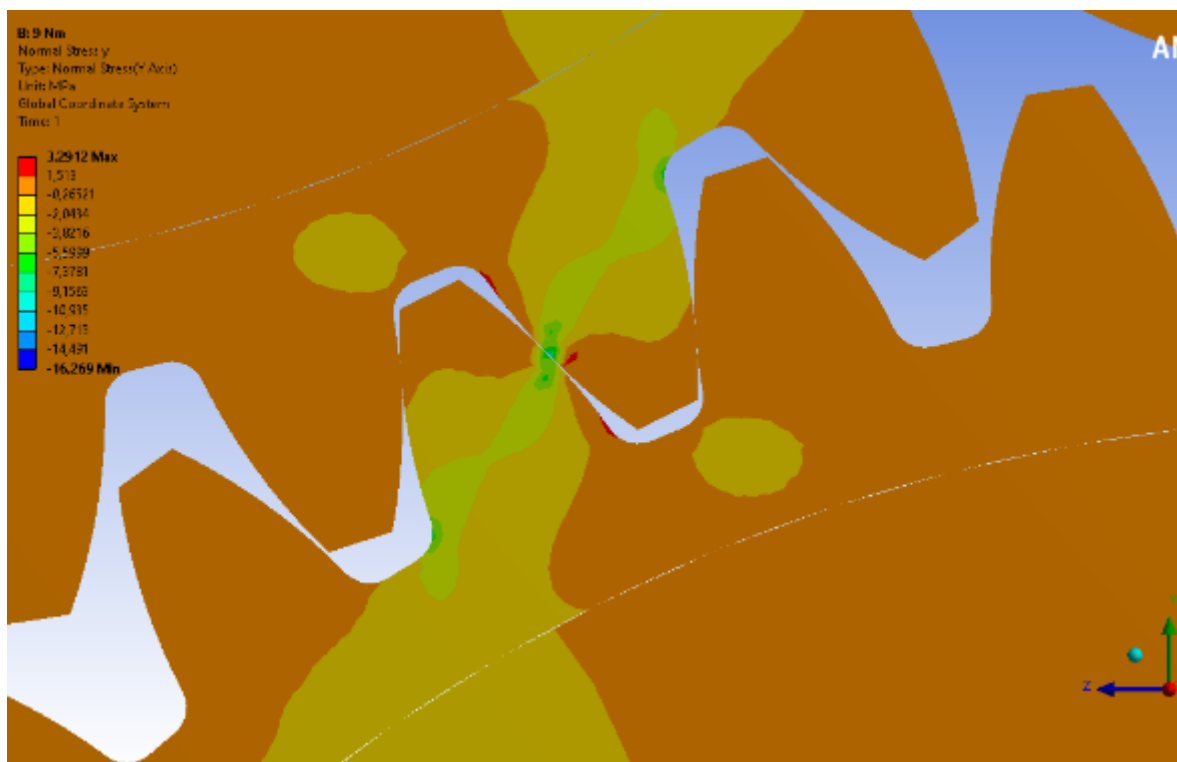
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 115 - Deformação específica equivalente no engrenamento



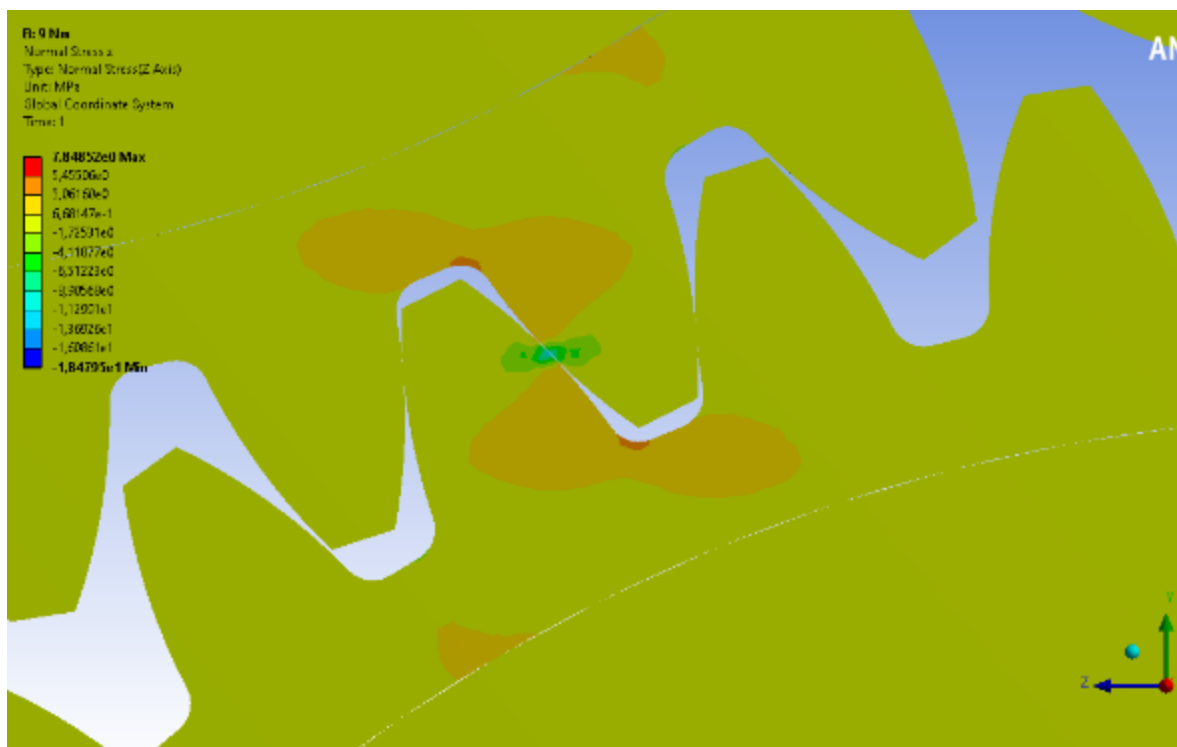
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 116 - Tensão normal direção y no engrenamento



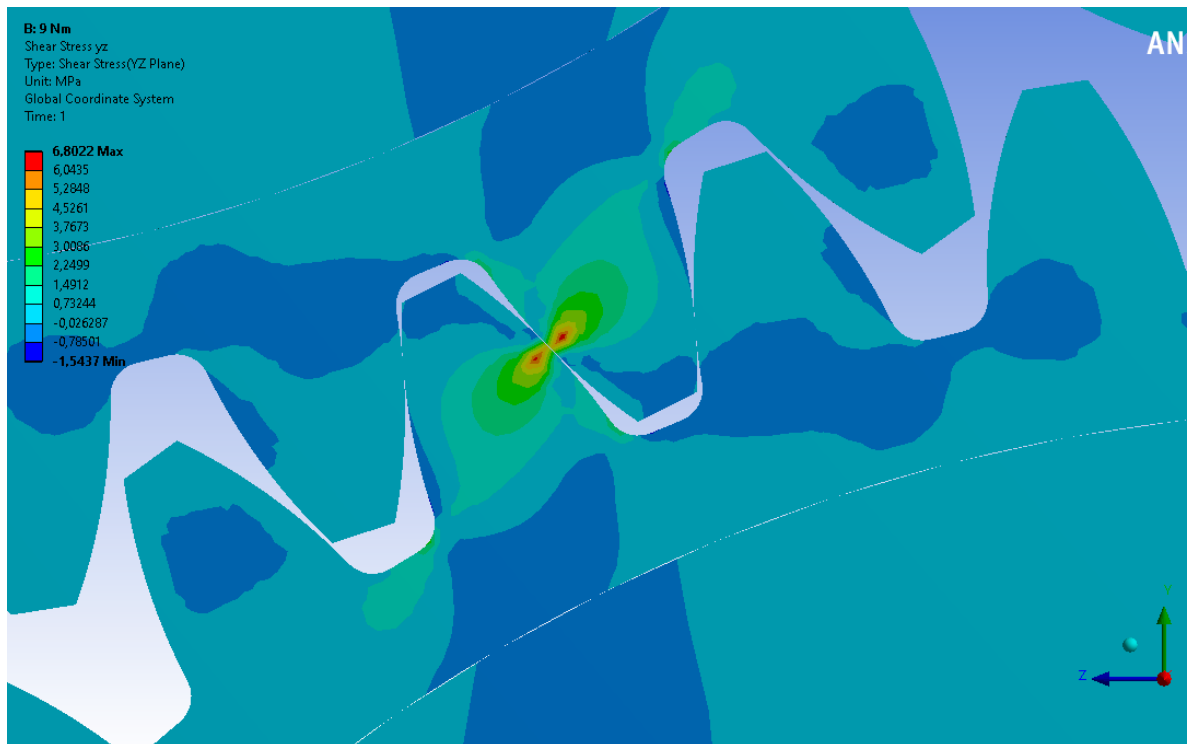
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 117 - Tensão normal direção z (x no DIC) no engrenamento



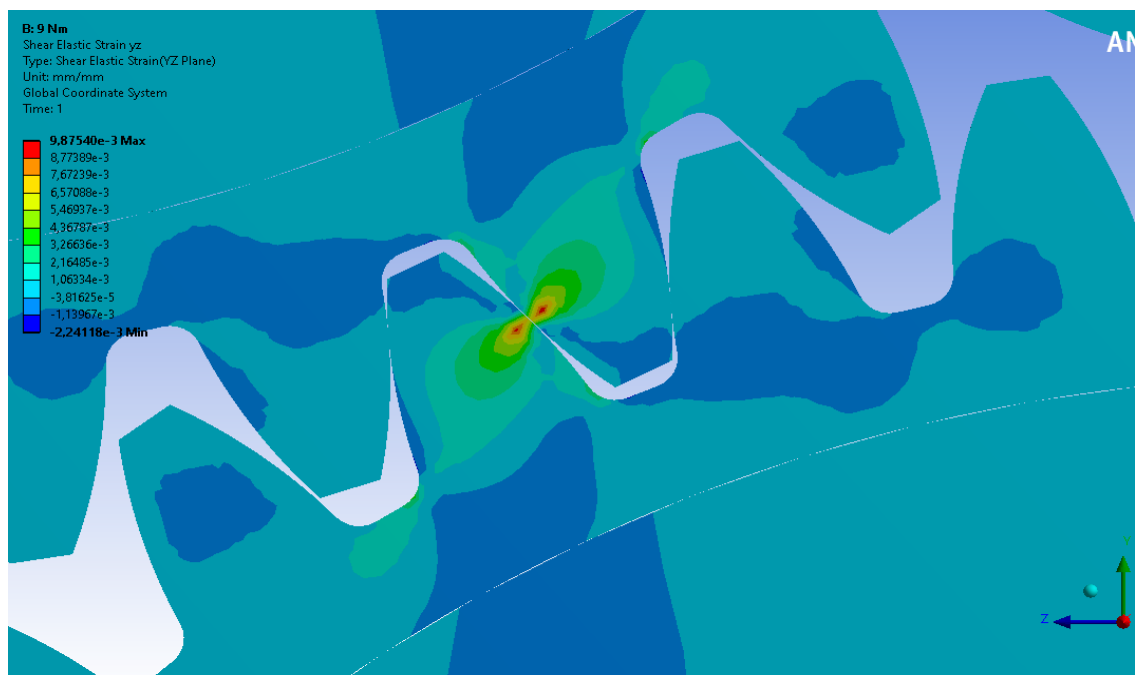
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 118 - Tensão de cisalhamento no plano yz (xy no DIC) no engrenamento



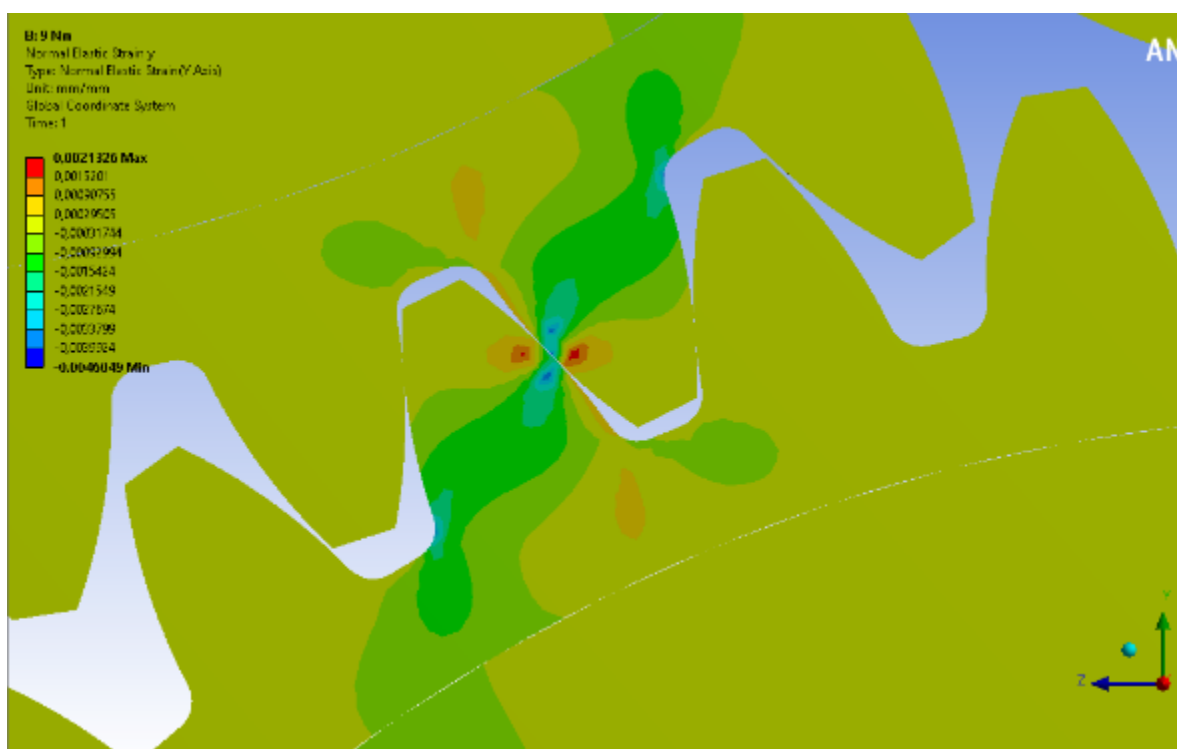
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 119 - Deformação específica no plano yz (xy no DIC) no engrenamento



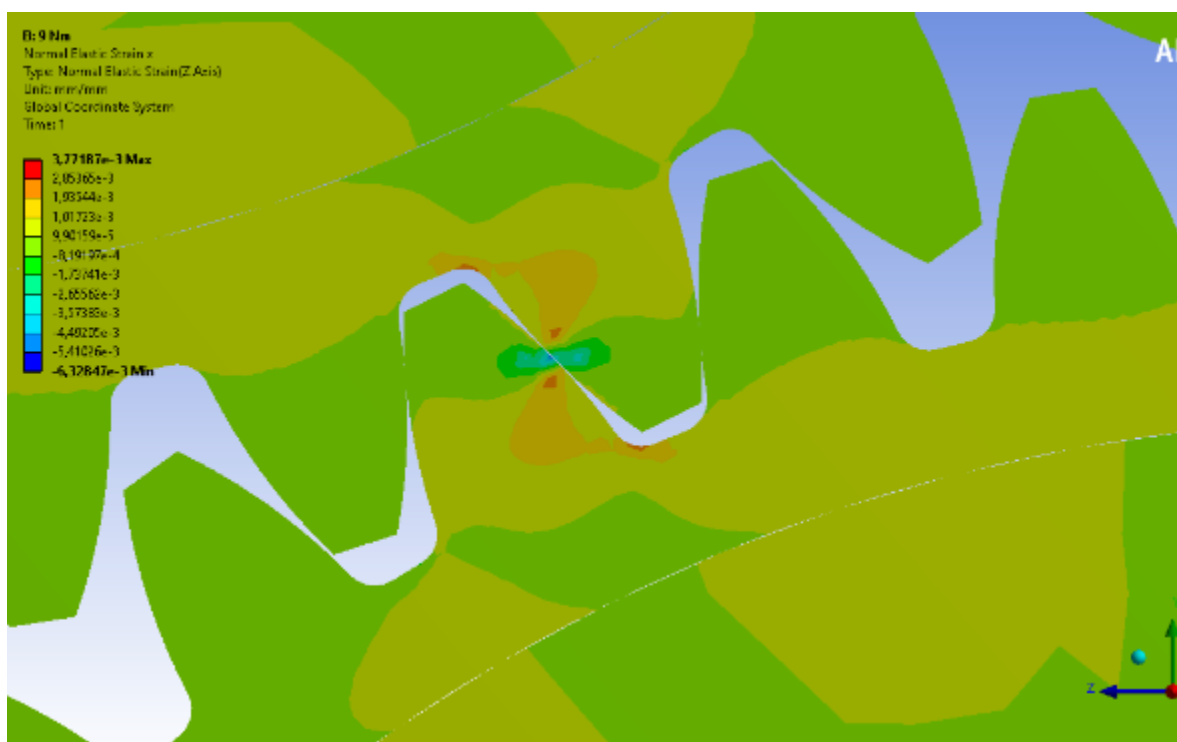
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 120 - Deformação específica na direção y no engrenamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 121 - Deformação específica na direção z (x no DIC) no engrenamento

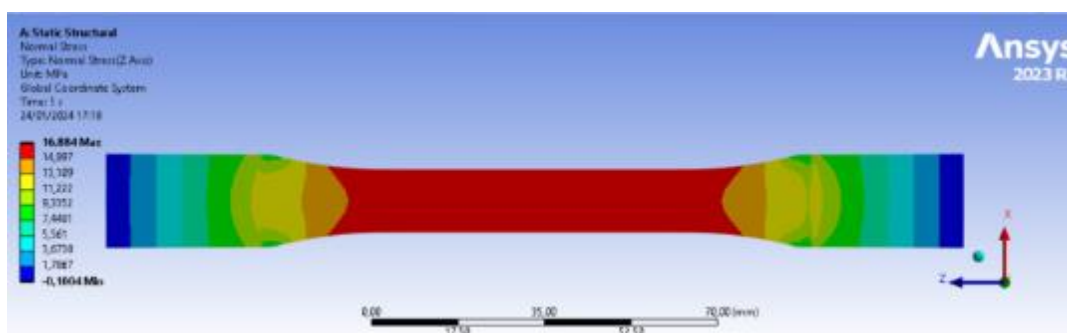


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de tração e flexão no regime elástico proporcionaram informações sobre o comportamento mecânico das resinas. Na Figura 122 é apresentado a tensão normal (eixo z) atuante no CDP de tração após a aplicação do carregamento, sendo 16,88 MPa a máxima tensão encontrada.

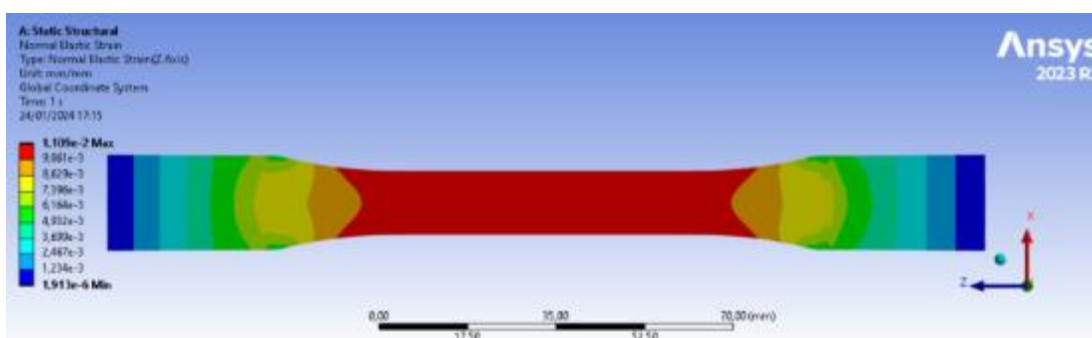
Figura 122 - Tensão normal para CDP de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 123 é ilustrado o resultado referente a deformação específica (ϵ) na direção longitudinal (eixo z) atuante no CDP de tração após a aplicação do carregamento, sendo 0,01109 mm/mm a maior deformação encontrada.

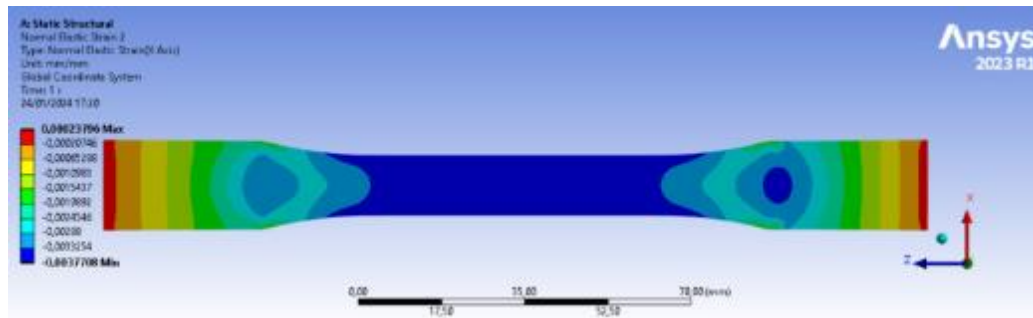
Figura 123 - Deformação específica na direção longitudinal (z).



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 124 é exibido o resultado referente a deformação específica (ϵ) na direção transversal (eixo x) atuante no CDP de tração após a aplicação do carregamento, sendo -0,0037708 mm/mm a maior deformação encontrada.

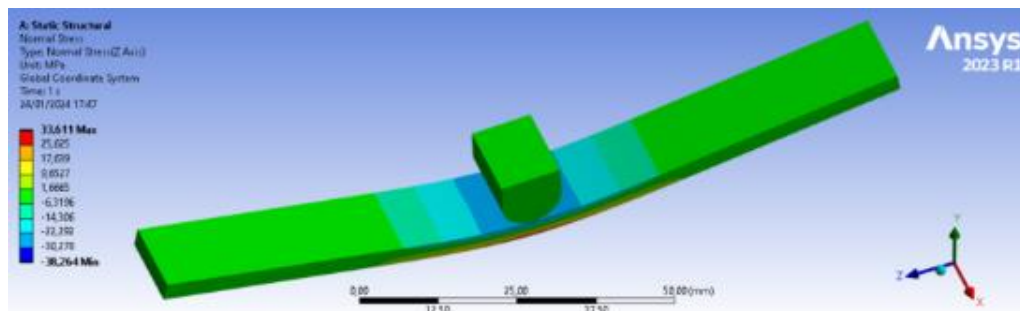
Figura 124 - Deformação específica na direção transversal (x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 125 é apresentada a tensão normal (eixo z) atuante no CDP de flexão após a aplicação do carregamento. A diferença observada entre os valores das componentes de tração e compressão ocorre devido a compressão adicional pontual exercida pela punção na aplicação do carregamento.

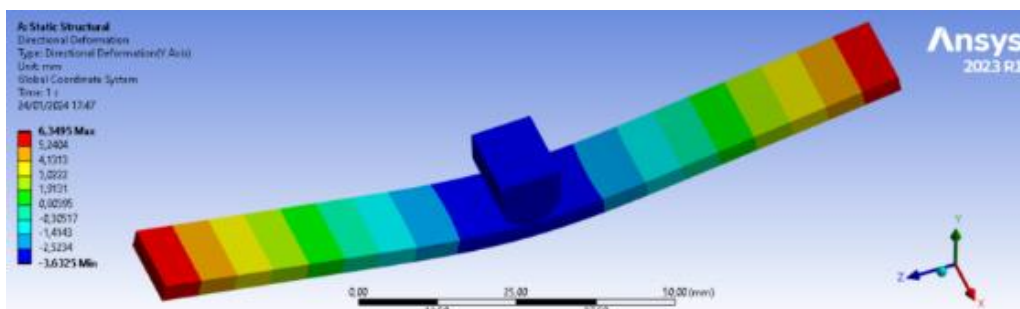
Figura 125 - Tensão normal para CDP de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 126 foi apresentado o deslocamento da punção (eixo y) durante a aplicação do carregamento no ensaio de flexão, sendo 3,63 mm o maior valor.

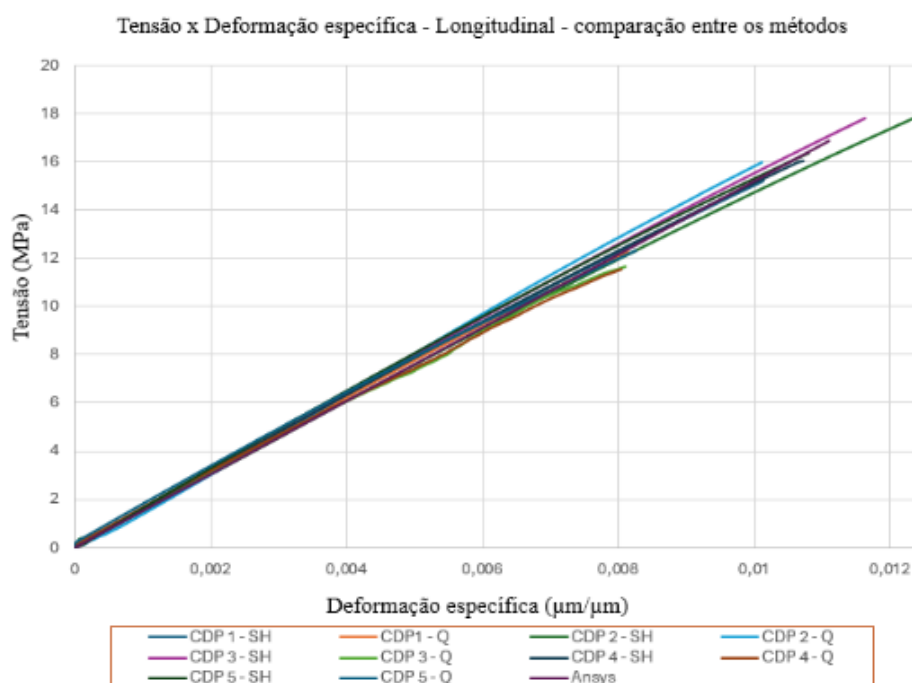
Figura 126 - Deslocamento da punção durante o ensaio de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Conforme observado na Figura 127, a resina demonstrou uma resistência à tração que varia entre 15,2 e 18,42 MPa e deformação específica longitudinal variando entre 0,0101 mm/mm à 0,0128 mm/mm. Os valores observados para as curvas obtidas através de extensimetria são inferiores devido ao desprendimento dos extensômetros antes do final do ensaio, no entanto, a tendência das curvas demonstra comportamento semelhante aos demais métodos utilizados. Foram utilizadas as siglas para determinar cada método: Os dados definidos por “Ansys” são do método numérico, “SH” são os dados dos relatórios de ensaio gerados pela máquina de ensaios Shimadzu e “Q” são os dados obtidos dos extensômetros pelo sistema HBM Quantum.

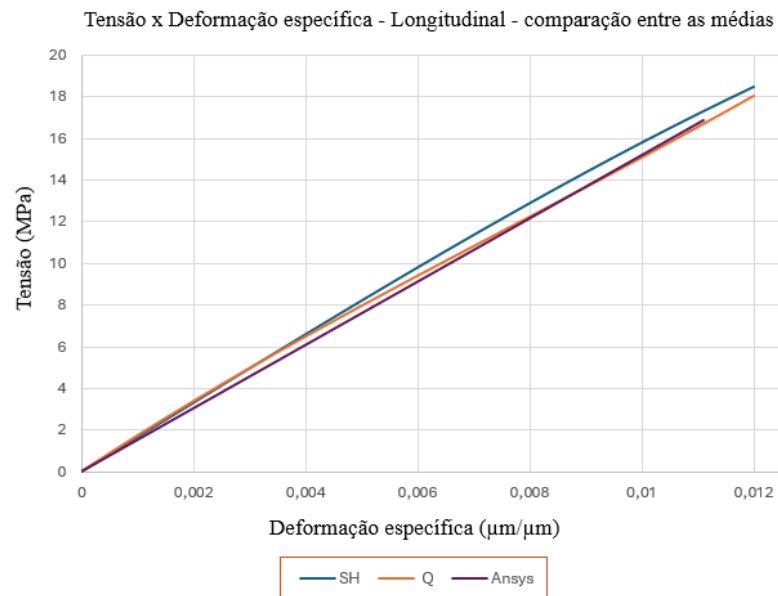
Figura 127 - Diagrama tensão x deformação longitudinal obtido no ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 128 são apresentadas as médias das curvas de tendência do diagrama tensão x deformação longitudinal obtidas pelos métodos utilizados.

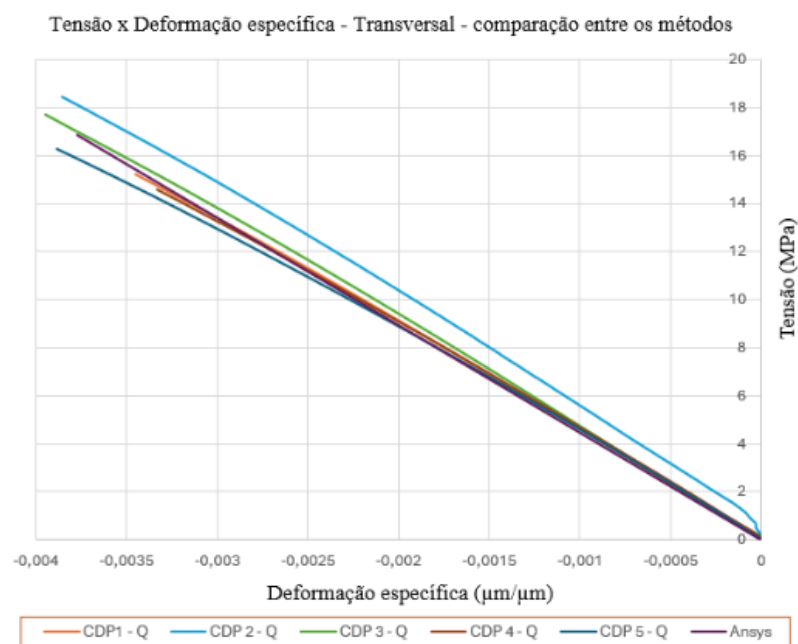
Figura 128 - Média das curvas de tendência do diagrama tensão x deformação longitudinal relacionadas ao ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Conforme observado na Figura 129, a resina demonstrou deformação específica transversal variando entre -0,003323 à -0,003947.

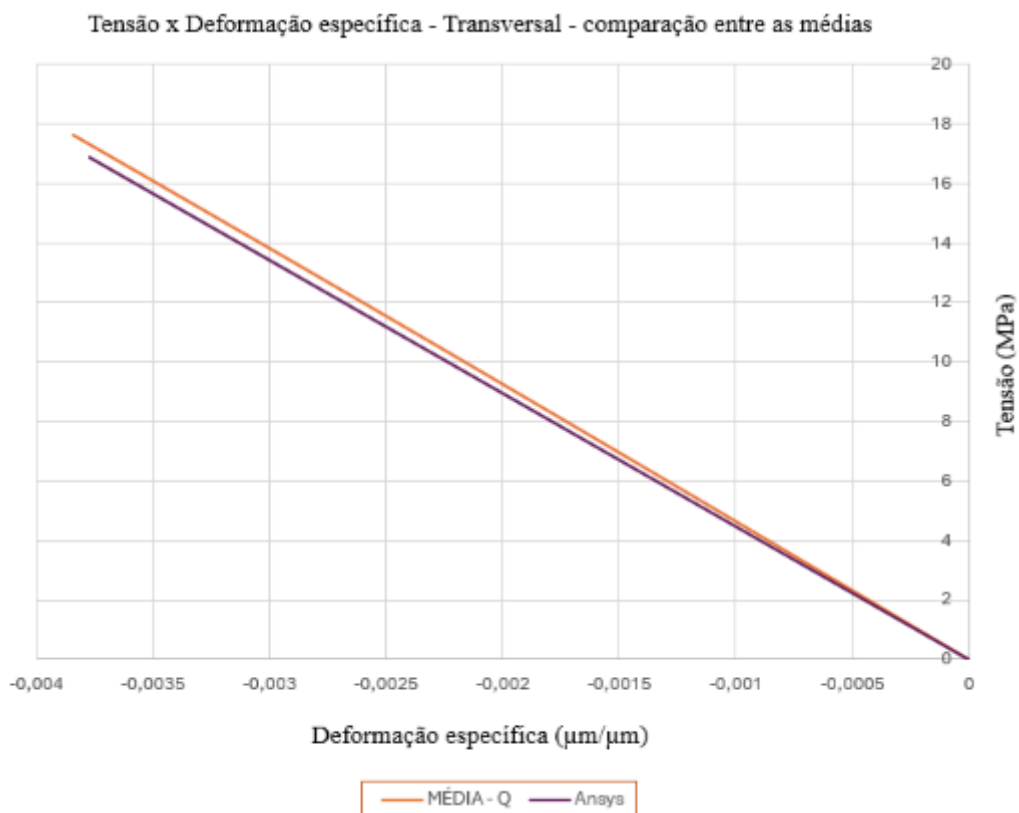
Figura 129 - Diagrama tensão x deformação transversal obtido no ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 130 são apresentadas as médias das curvas de tendência do diagrama tensão x deformação transversal obtidas pelos métodos utilizados.

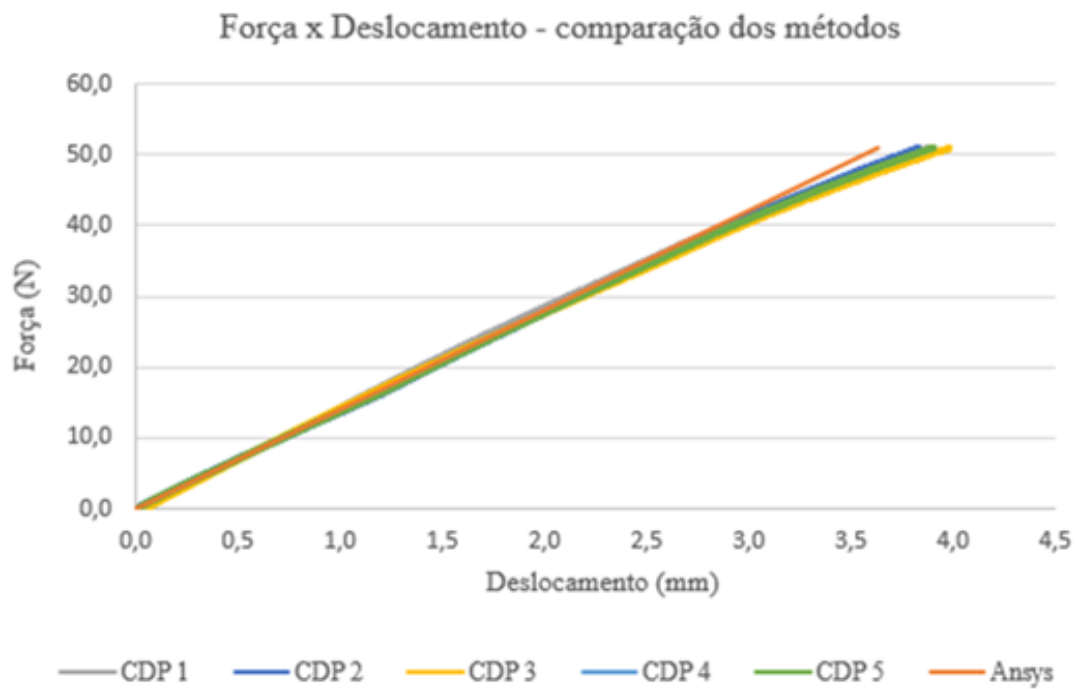
Figura 130 - Média das curvas de tendência do diagrama tensão x deformação transversal relacionadas ao ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

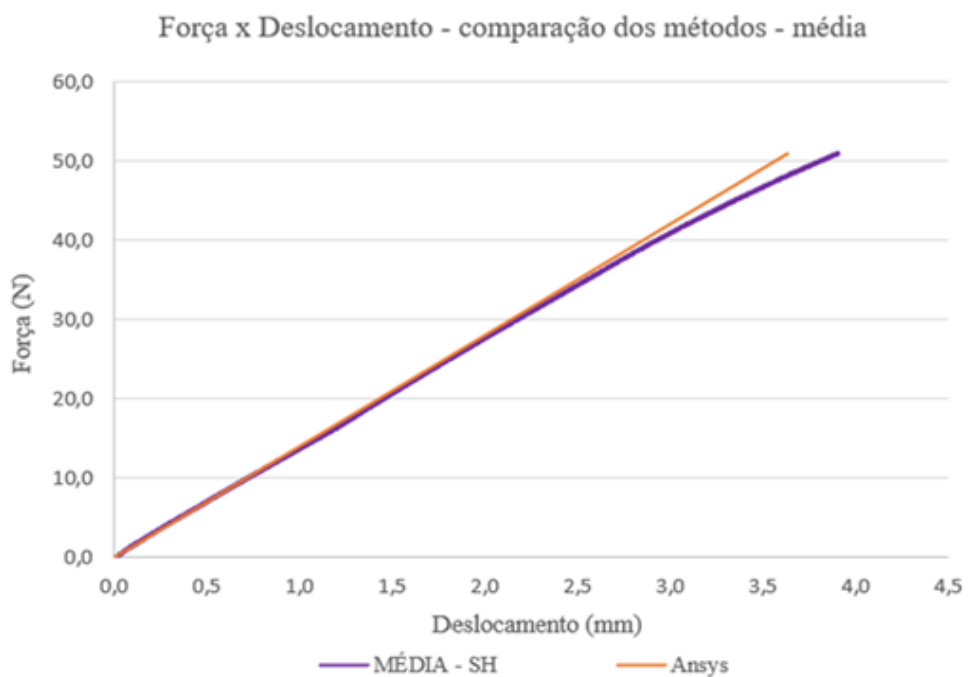
A curva do ensaio de flexão foi utilizada até a região elástica do material, foi interrompido o ensaio a partir do ponto que teve início a falha do corpo de prova (mudança de inclinação da curva). Na Figura 131 estão os resultados obtidos nos ensaios de flexão em 3 pontos em comparação com a curva obtida pelo Ansys Workbench. Na Figura 132 são apresentadas as médias das curvas de tendência do diagrama força x deslocamento obtidas pelos métodos utilizados

Figura 131 - Diagrama de força x deslocamento obtidas para os CDPs de flexão para os métodos utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 132 - Média das curvas de tendência do diagrama força x deslocamento relacionadas ao ensaio de flexão



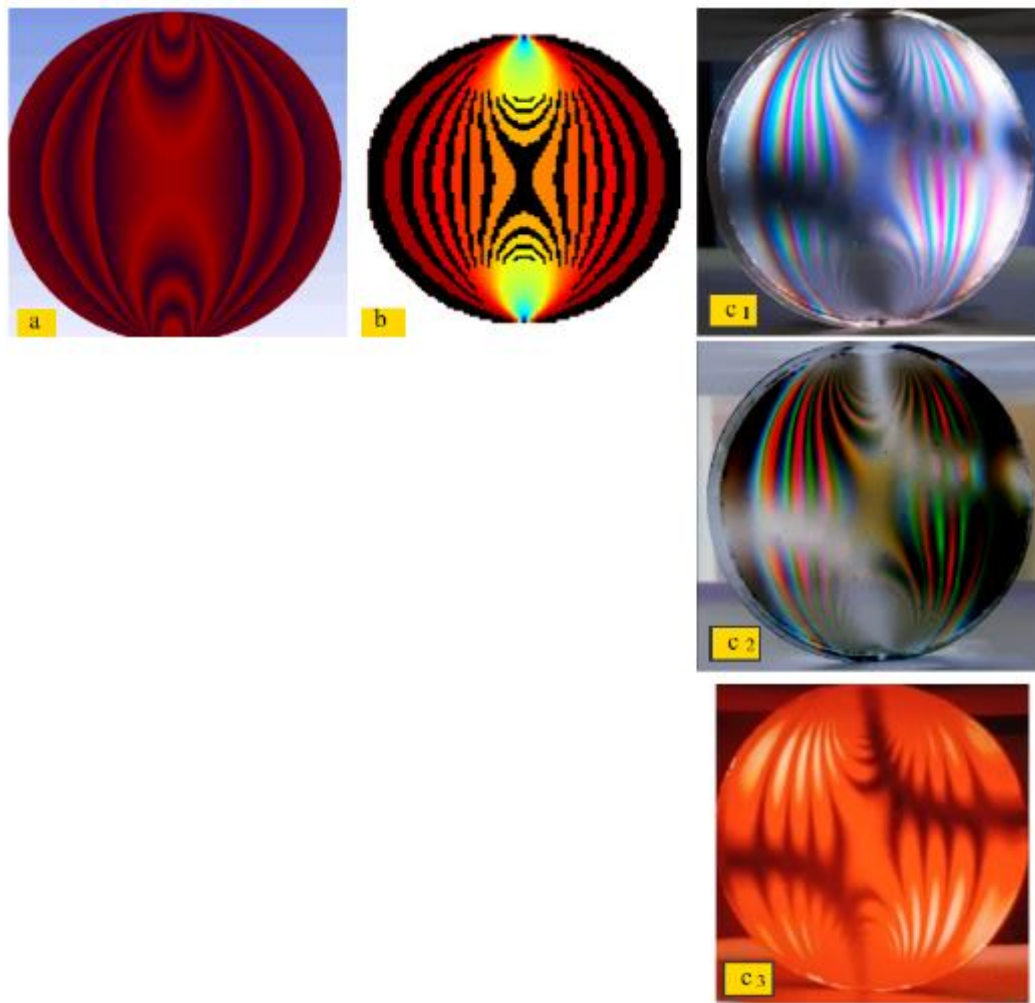
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados dos ensaios de tração e flexão destacaram a aplicabilidade do material sob diferentes condições. A compreensão dessas propriedades é crucial para otimizar o processo de impressão 3D e garantir a aplicação bem-sucedida desses materiais em diversas áreas. Pesquisas futuras devem explorar ainda mais a influência de parâmetros de impressão na resposta mecânica do material.

Os valores obtidos das propriedades mecânicas da resina utilizada estão no intervalo fornecido pelo fabricante conforme a tabela 5, com exceção da resistência à tração, que apresentou valores abaixo dos fornecido pelo fabricante, o principal motivo para esta diferença é o tempo de cura do material (60 minutos) segundo Guttridge, 2024 e Kim, 2020. As curvas de tendência obtidas pela utilização de extensômetros possuem o mesmo comportamento das outras obtidas pelos demais métodos utilizados, no entanto houve uma interrupção prematura na aquisição dos dados durante a construção dessas curvas. Este incidente pode ser explicado devido ao desprendimento dos extensômetros antes do final da aplicação do carregamento total durante os ensaios. O imprevisto ocorrido durante a realização dos ensaios, ou seja, o desprendimento dos extensômetros de maneira prematura serve como ferramenta didática para observação de adversidades que podem ocorrer durante a obtenção de dados experimentais.

Na Figura 133, foi observada a correlação entre os métodos numérico (a), analítico (b) e a imagem adquirida durante o teste de fotoelasticidade (c_1 imagem em função da luz branca no ensaio, c_2 imagem anterior com efeito negativo, c_3 imagem em função da luz vermelha no ensaio) no campo de distribuição de tensão normal na direção y. Após ajustar as cores das franjas (na figura gerada pelo Matlab e da simulação do Ansys) para melhorar a visualização, foi verificado que os modelos reproduziram com precisão o comportamento das franjas observadas experimentalmente. Ocorre a criação dos dois arcos na fotoelasticidade (c_1, c_2, c_3) devido ao ângulo utilizado entre filme polarizador e a fonte luminosa segundo Ramesh, 2021; Magalhaes et al., 2015; Doca e Pires, 2014. Nesta posição a nitidez da imagem era melhor para a fotografia adquirida. Com a convergência dos resultados de tensão normal, foi possível realizar comparações de deformações específicas entre os métodos.

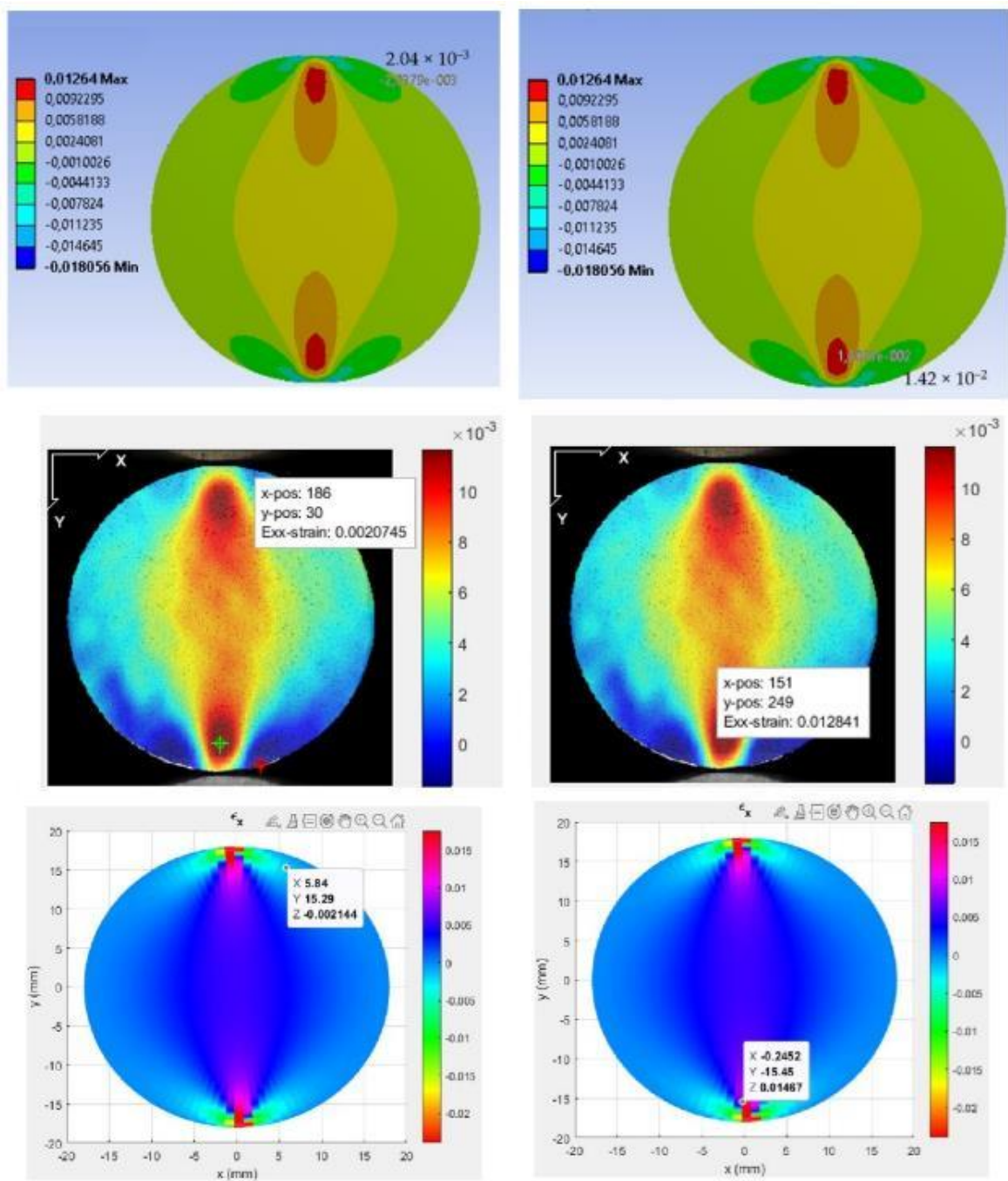
Figura 133 - Padrões de franjas conforme os métodos: (a) numérico, (b) analítico e (c_{1,2,3}) fotoelasticidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

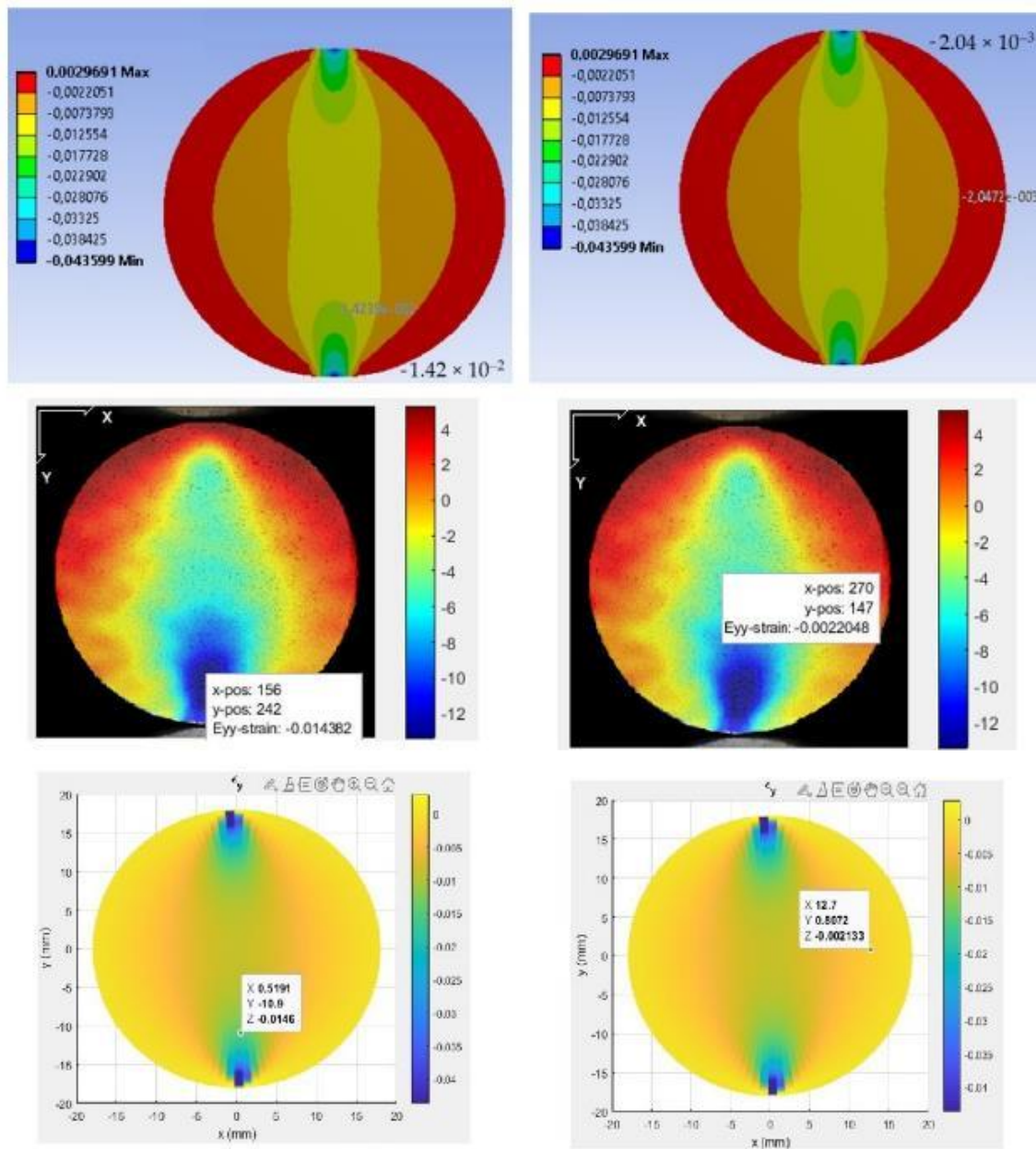
A comparação das deformações específicas nas direções x , y e no plano xy entre os métodos são ilustradas nas Figuras 134-136. O “*probe*” (caixa de texto onde aparece o valor do ponto) foi utilizado para identificar os valores de deformação em regiões semelhantes em cada método. O campo de deformação específica, ilustrado nas Figuras 134-136, apresenta comportamento similar ao campo de tensões, manifestando-se como padrões circulares concêntricos próximos à área de contato.

Figura 134 - Comparação das deformações específicas na direção x



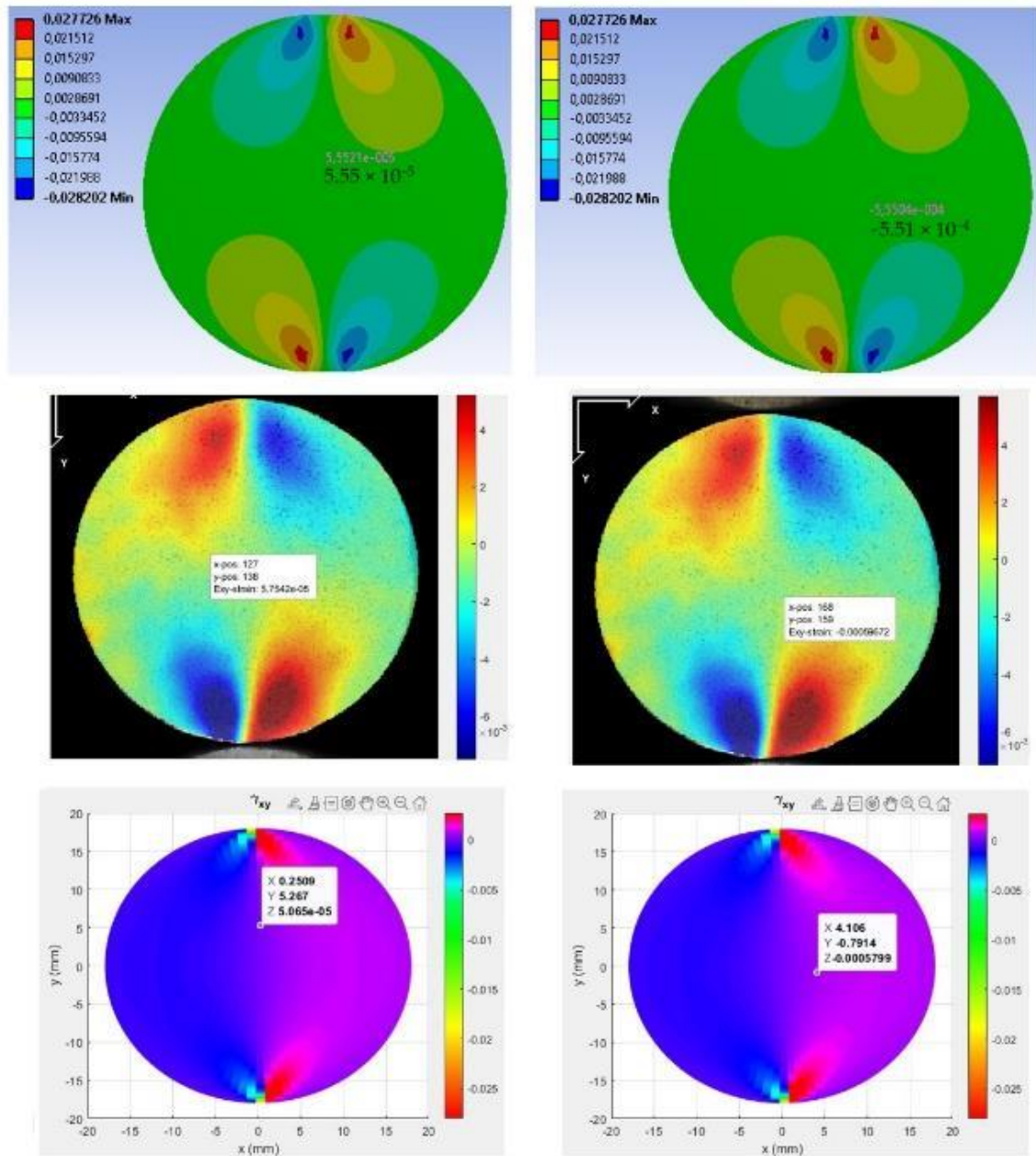
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 135 - Comparação das deformações específicas na direção y



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 136 - Comparação das deformações específicas no plano xy



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Nas Tabelas 10 e 11 são detalhados os valores de deformação obtidos e o erro percentual comparativo entre os módulos dos valores para cada método, considerando a carga de 3000 N.

Tabela 10 - Valores de Deformação Específica (mm/mm) dos experimentos

Numérico	DIC	Analítico
	Direção x	
$1,42 \times 10^{-2}$	$1,43 \times 10^{-2}$	$1,46 \times 10^{-2}$
$-2,04 \times 10^{-3}$	$2,20 \times 10^{-3}$	$-2,14 \times 10^{-3}$
	Direção y	
$-2,04 \times 10^{-3}$	$-2,20 \times 10^{-3}$	$-2,22 \times 10^{-3}$
$-1,42 \times 10^{-2}$	$-1,43 \times 10^{-2}$	$-1,40 \times 10^{-2}$
	Plano xy	
$5,55 \times 10^{-5}$	$5,75 \times 10^{-5}$	$5,60 \times 10^{-5}$
$-5,51 \times 10^{-4}$	$-5,96 \times 10^{-4}$	$-5,79 \times 10^{-4}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 11 - Erro Percentual Comparativo entre os Métodos

Numérico/DIC	Numérico/Analítico	DIC/Analítico
	Direção x	
1,00%	3,02%	2,00%
7,69%	4,72%	2,75%
	Direção y	
7,69%	8,83%	1,05%
0,62%	1,46%	2,07%
	Plano xy	
3,57%	0,82%	2,65%
8,25%	5,19%	2,81%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise dos resultados indica que o método DIC apresenta boa compatibilidade com os métodos Numérico e Analítico na direção x, porém apresentou resultados mais distantes nas direções y e no plano xy neste estudo: Comparado ao método numérico, o DIC apresenta um erro percentual de 1,00% na direção x, indicando uma significativa correspondência; entretanto, na direção y e no plano xy os erros aumentam significativamente alcançando respectivamente 7,69% e 8,25%. Isto pode ser devido à dispersão dos pontos de tinta, conforme citado por Chen et al. (2015), Brlić et al. (2024) e Han et al. (2023). De forma semelhante, comparado ao método Analítico, o DIC mantém um erro relativamente baixo na direção x (2,00%), mas apresenta maior variação na direção y e plano xy, com erros de 1,05% e 2,65%. Essa diferença pode ser explicada devido o método analítico não considerar a plasticidade, ou seja, a variação do módulo elástico visto anteriormente com as curvas dos ensaios.

Esses resultados estão alinhados com estudos como Amirpour, (2019) que demonstram a eficácia do DIC na caracterização de propriedades de materiais, apesar de algumas

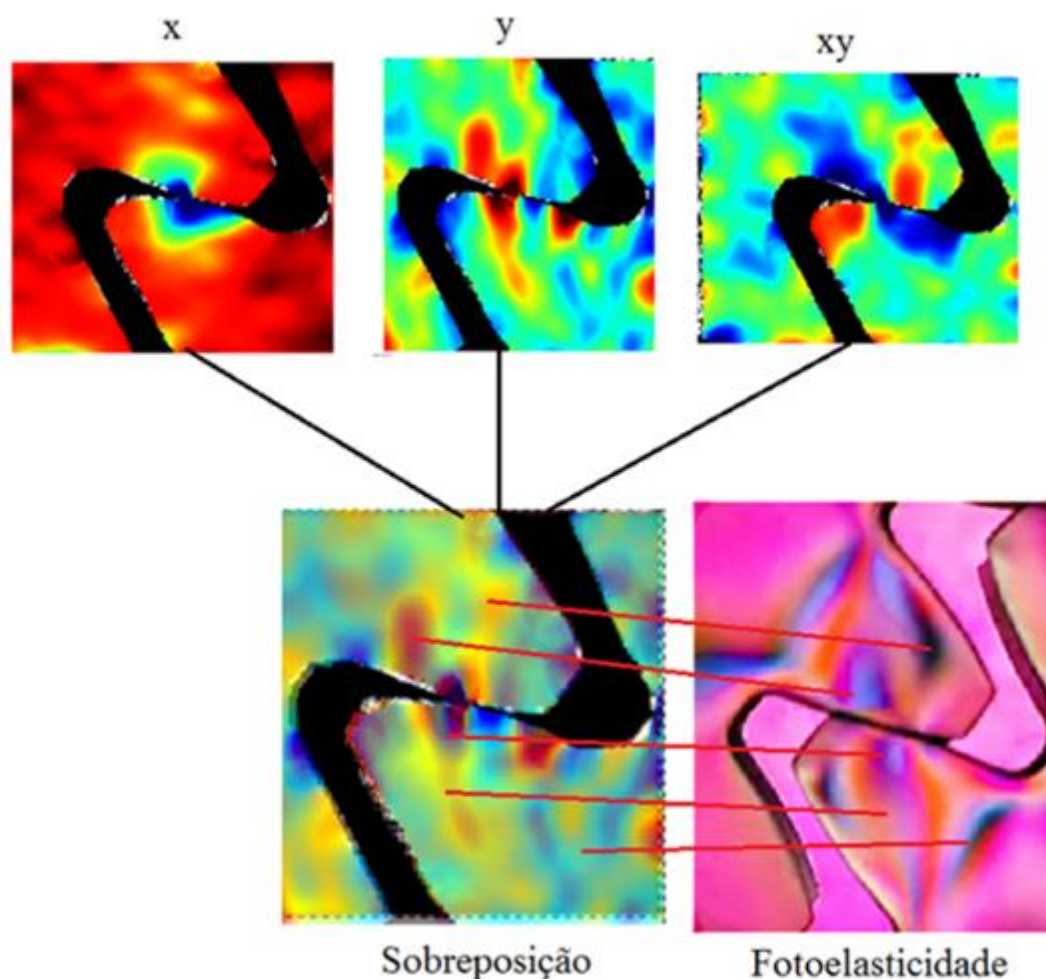
discrepâncias em cenários específicos. As limitações observadas nas direções y e xy destacam a necessidade de uma consideração cuidadosa ao aplicar o DIC em estudos que exijam alta precisão em padrões de deformação complexos. No entanto, avanços na integração de ferramentas de baixo custo, como observado por Arabul e Lunt (2022) o uso de software de código aberto, como o Ncorr, oferecem caminhos para aumentar a acessibilidade e a viabilidade econômica do DIC, tornando-o uma opção viável, apesar de suas limitações.

Além disso, o uso da fotoelasticidade, conforme descrito por Curtis et al. (2003) e Ren e Ju (2023), oferece uma abordagem complementar para visualizar campos de tensão em tempo real. Enquanto o DIC se destaca na captura de dados detalhados de deformação, a fotoelasticidade aproveita as propriedades ópticas para fornecer insights qualitativos sobre distribuições de tensão. A combinação dessas técnicas pode ajudar a superar as limitações observadas no DIC, especialmente nas direções y e xy , oferecendo uma perspectiva mais ampla sobre o comportamento do material.

Avanços recentes nas propriedades de resinas fotossensíveis e na impressão 3D, conforme discutido por Wang et al. (2017) e Ren e Ju (2023), também sugerem melhorias potenciais para os experimentos. Materiais aprimorados e técnicas de impressão podem mitigar questões como anisotropia e birrefringência residual, melhorando assim a precisão e a confiabilidade tanto do DIC quanto da fotoelasticidade em estudos experimentais.

Os padrões de franjas observados na fotoelasticidade fornecem uma análise qualitativa das diferenças entre as tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$). Franjas mais densas indicam regiões de maior concentração de tensões, onde as diferenças entre as tensões principais são mais acentuadas. Na Figura 137 foi feita a comparação entre as deformações específicas obtidas por correlação digital de imagens (DIC) nas direções x , y e no plano xy , com os padrões experimentais de fotoelasticidade.

Figura 137 – Comparação entre resultados de imagens do Dic com fotoelasticidade da engrenagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

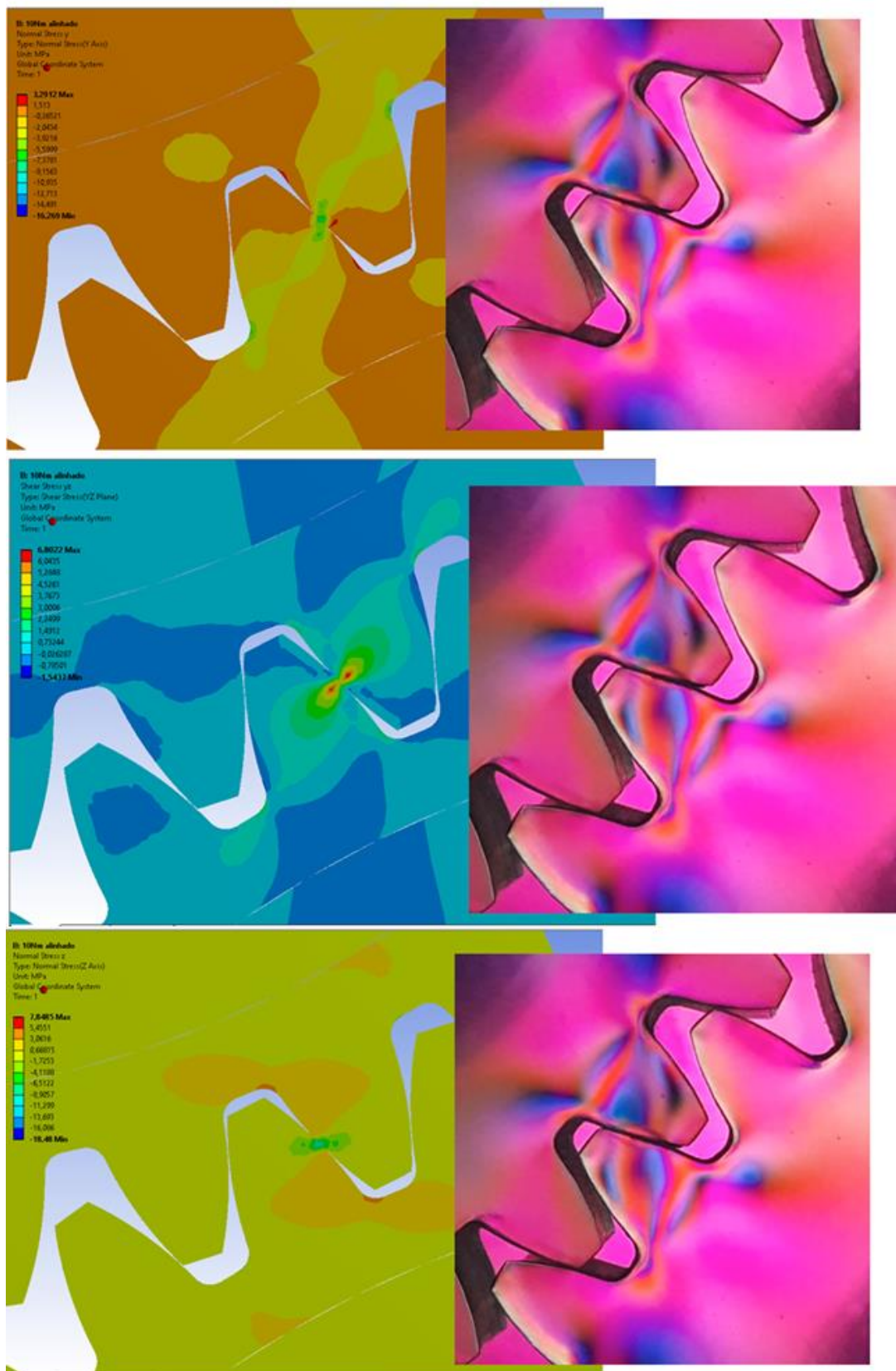
As deformações específicas em x , y e no plano xy são representadas por mapas de cores: tons vermelho/amarelo indicam maior deformação, enquanto tons azuis correspondem a compressão ou menor deformação. Uma exceção ocorre na deformação específica na direção x , onde o vermelho representa valores próximos de zero e o azul corresponde às maiores deformações. Na Figura 137 a sobreposição (das imagens do DIC) integra essas informações de deformação, destacando as interações entre elas em diferentes direções. Além disso, a comparação direta com a fotoelasticidade atesta a correspondência entre os padrões de diferença de tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) e as deformações específicas medidas por DIC. Essa análise combinada oferece uma visão detalhada e integrada da distribuição de tensões e deformações no material, permitindo uma conexão clara e precisa entre diferentes métodos experimentais para caracterizar o comportamento mecânico do material.

Na Figura 138 são ilustrados os resultados das tensões no engrenamento em comparação com o resultado da fotoelasticidade. A partir disso na Figura 139 foi representada a sobreposição agora dos valores da tensão normal nas direções x e y , junto da tensão de cisalhamento no plano xy , obtida na simulação de carregamento estático nas engrenagens estudadas. Novamente agora utilizando as engrenagens de resina, são mostrados os padrões de franjas experimentais obtidos por fotoelasticidade sob as mesmas condições de carregamento (9 Nm) e contorno.

Na simulação, as cores indicam as diferentes magnitudes das tensões, onde áreas de maior intensidade (valores absolutos elevados) estão associadas a regiões críticas de concentração de tensões. As áreas coloridas, como azul e laranja, correspondem às regiões onde as tensões principais diferem mais na sobreposição. Essas regiões podem ser diretamente relacionadas às franjas de interferência observadas na fotoelasticidade.

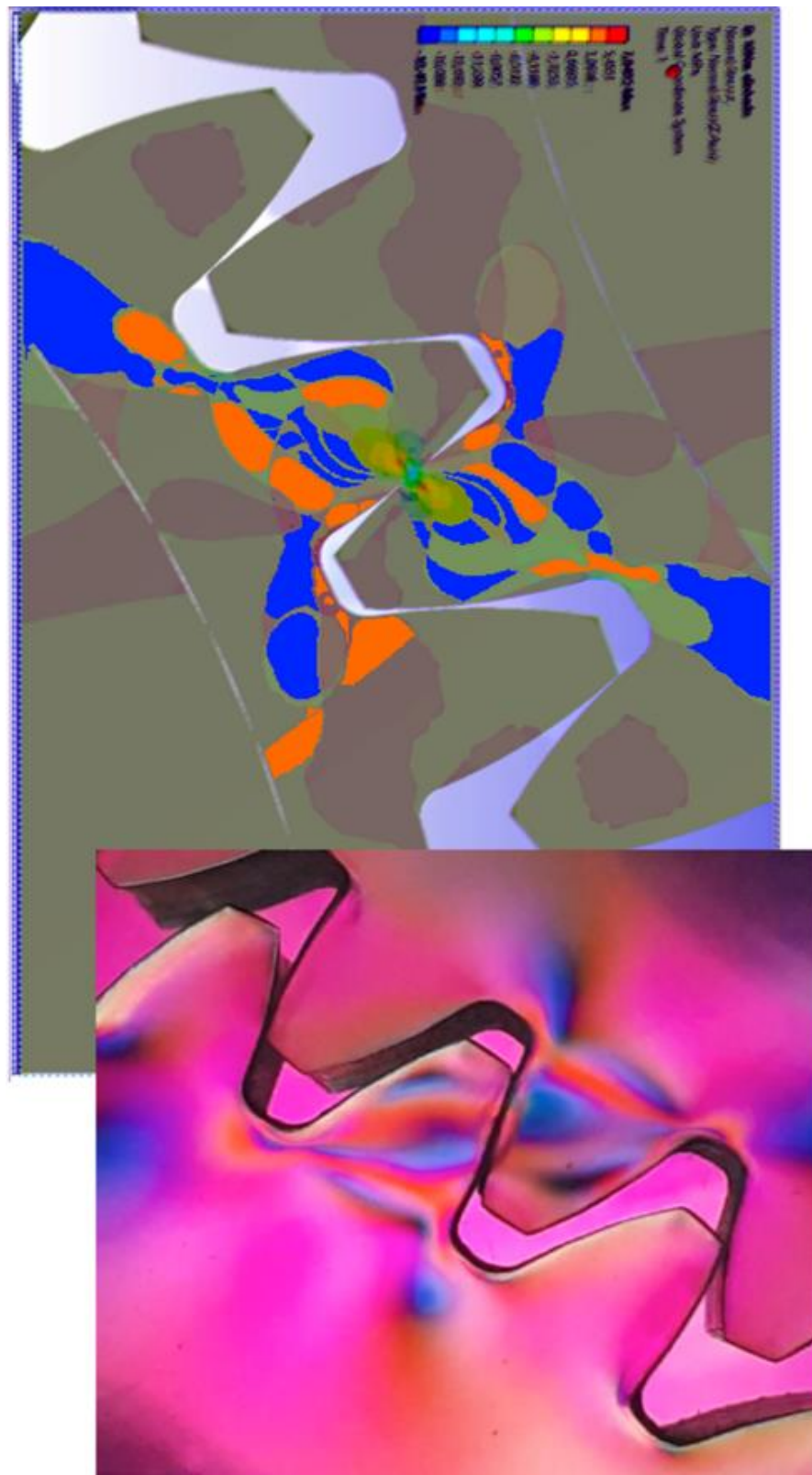
A correspondência entre as regiões críticas identificadas na simulação e os padrões de franjas de interferência experimentais (padrões de diferença das tensões principais) demonstra que os métodos experimentais de fotoelasticidade realizados com equipamento de baixo custo retorna resultados confiáveis.

Figura 138 – Resultado das tensões nas engrenagens com método numérico em comparação com a fotoelasticidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 139 – Sobreposição das figuras dos resultados de tensão no engrenamento em comparação com a fotoelasticidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo principal investigar o campo de tensões e deformações em engrenagens cilíndricas de dentes retos, fabricadas em resina fotossensível por manufatura aditiva, por meio da integração de métodos experimentais e simulações numéricas. A partir dos resultados obtidos dos experimentos com CDPs, compressão dos cilindros (conforme a teoria de hertz) e desalinhamento nas engrenagens foi possível validar a viabilidade do uso de materiais e equipamentos de baixo custo em análises mecânicas no estudo das tensões de contato.

Os dados gerados futuramente podem ser utilizados para o estudo de fadiga e falhas em engrenagens de resina fabricadas por manufatura aditiva. Estes resultados dos experimentos com discos têm relação com a teoria de Hertz tanto no contato cilindro-plano como no contato cilindro-cilindro assim foi possível ver o campo de deformações nas Figuras 134-136 principalmente de cisalhamento no plano xy na qual ocorre a descamação e perda de material em fadiga de contato. Nos experimentos com imagem com as engrenagens foi possível ver o comportamento das tensões no raio da base do dente assim como previsto por Lewis (Juvinall e Marshek, 2008; Timoshenko e Goodier, 1970; Sackfield e Hills, 1983) onde a engrenagem se comporta semelhante a uma viga em balanço principalmente na Figura 105 com o torque de 9 Nm. O uso desta engrenagem feita de polímero e a fotoelasticidade de baixo custo permitiu a percepção em tempo real das tensões neste fenômeno.

Os resultados apresentados ao longo deste trabalho evidenciaram o potencial das resinas fotossensíveis na impressão 3D de engrenagens e outras peças, bem como a viabilidade de métodos experimentais de baixo custo para análise de tensões e deformações. Os ensaios dos CDPs de tração, cujos valores de resistência variaram entre 15,2 e 18,42 MPa e deformação específica longitudinal entre 0,0101 e 0,0128, mostraram que, de modo geral, as propriedades mecânicas da resina se mantiveram na faixa indicada pelo fabricante. No entanto, observou-se que alguns resultados ficaram abaixo do esperado, possivelmente em função de parâmetros como tempo de cura e orientação de impressão 3D diferente ao utilizado pelo fabricante. Nos CDPs de flexão, verificou-se um deslocamento máximo de 3,6325 mm na região de carregamento sem que houvesse comprometimento significativo da fase elástica do material, evidenciando sua resistência até o ponto de início de falha.

Paralelamente, a análise numérica e analítica mostrou boa concordância com os valores experimentais, confirmando que, as condições de contorno e os parâmetros de simulação foram aplicados de forma correta, assim o software de Elementos Finitos

reproduziu, com fidelidade, o comportamento mecânico da resina. Os códigos gerados para ajudar a determinar o fim do comportamento elástico ajudou a definir os pontos da curva de deformação plástica utilizada depois na curva MISO nos ensaios dos discos e das engrenagens.

A integração de técnicas experimentais como a fotoelasticidade e correlação digital de imagens de baixo custo permitiu uma compreensão mais ampla do comportamento das engrenagens em carregamento estático e no caso da fotoelasticidade em tempo real. A fotoelasticidade ofereceu uma visão qualitativa das distribuições de tensões por meio dos padrões de franjas onde cada franja significa uma diferença entre as tensões principais, enquanto o DIC capturou detalhadamente os campos de deformação.

Em geral, os resultados de cada método nos ensaios com discos (cilindros) apresentaram boa concordância, sobretudo na direção x , embora tenham surgido maiores discrepâncias nas direções y e xy conforme a Tabela 11. Esses desvios reforçam a importância de se considerar cuidadosamente os parâmetros experimentais como a iluminação, o polimento de superfície e o alinhamento de filtros no caso da fotoelasticidade, além de parâmetros de software e nitidez na captação das imagens para o DIC.

O método numérico, por sua vez, demonstrou-se uma ferramenta versátil e indispensável na predição do comportamento mecânico em casos de peças com geometrias complexas como engrenagens, desde que as condições de contorno, modelos de contato e propriedades do material sejam definidos de forma adequada. A boa correspondência entre as simulações e os ensaios práticos neste trabalho demonstra a eficácia dos usos dos parâmetros anteriormente citados e assim os resultados numéricos se aproximaram do que foi visto nos outros métodos.

A realização dos ensaios de flexão e tração em regime elástico dos CDPs destacou a importância de conhecer as limitações e potenciais de cada técnica. O desprendimento que ocorreu de forma precoce dos extensômetros no ensaio de tração, ilustra como fatores práticos podem influenciar a aquisição de dados e, consequentemente, levar a variações nos valores registrados. Apesar de tais adversidades, a coerência das curvas de tendência entre os diferentes métodos (Numérico com Ansys, Máquina Shimadzu e extensimetria) reforça a confiabilidade global dos resultados.

Em termos de aplicações práticas, os achados deste estudo indicam que as engrenagens e componentes fabricados em resina translúcida podem ser empregados em protótipos funcionais onde a visualização de tensões e deformações em tempo real auxilia no processo de identificação de possíveis pontos críticos de falha. O uso de métodos alternativos

de baixo custo, como o DIC e a fotoelasticidade, mostrou-se particularmente relevante para a pesquisa, mantendo níveis adequados de precisão e reprodutibilidade.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A resistência à tração ligeiramente inferior à especificada pelo fabricante sugere que fatores como tempo de cura, espessura das camadas de impressão e orientação do modelo podem ser explorados em estudos futuros para otimizar as propriedades mecânicas da resina.

O desprendimento dos extensômetros ressalta a necessidade de procedimentos mais robustos de preparação de superfície e fixação, permitindo uma coleta de dados mais completa até a fratura do corpo de prova.

O método de correlação digital de imagens, apesar de eficaz e acessível, requer calibração refinada e cuidados especiais no preparo da superfície (aplicação homogênea de tinta) para melhorar a exatidão dos resultados em diferentes direções de deformação.

A adoção de ferramentas de código aberto, como o DICpy, Octave ou Scilab, amplia as possibilidades de aplicação em projetos acadêmicos e de desenvolvimento, reduzindo custos e facilitando a replicação de estudos em outros contextos.

Para trabalhos futuros, a análise de comportamento mecânico diante de cargas dinâmicas ou em condições ambientais variadas (temperatura, umidade) pode enriquecer ainda mais o conhecimento sobre a durabilidade e a confiabilidade dessas resinas fotossensíveis.

Em síntese, a convergência das metodologias numérica, experimental e analítica comprovou a robustez do material e a adequação dos métodos de ensaio, reforçando seu valor em aplicações educacionais, industriais e de pesquisa. A continuidade dos estudos, com foco em melhorias no processo de cura, na precisão da medição das deformações e em condições operacionais mais variadas, contribuirá para o avanço do uso de resinas em impressão 3D, bem como para o aperfeiçoamento das técnicas experimentais e de simulação.

REFERÊNCIAS

- AB GHANI, A. F. *et al.* Mechanical properties extraction of composite material using digital image correlation via open source Ncorr. **Defence S and T Technical Bulletin**, Kajang, v. 11, n. 1, p. 13-24, 2018.
- ABBASNEZHAD, N. A joining strategy for the stereolithography-printed parts: thermal and mechanical characterization. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Dallas, p. 1-10, 2024.
- ABU AL-RUB, R. K.; TEHRANI, A. H.; DARABI, M. K. Application of a large deformation nonlinear-viscoelastic viscoplastic viscodamage constitutive model to polymers and their composites. **International Journal of Damage Mechanics**, England, v. 24, n. 2, p. 198-244, 2015.
- AGRAWAAL, H.; THOMPSON, J. E. Additive manufacturing (3D printing) for analytical chemistry. **Talanta Open**, Amsterdam, v. 3, p. 100036, 2021.
- AMIRPOUR, M. *et al.* Numerical and experimental study on deformation of 3D-printed polymeric functionally graded plates: 3D-Digital Image Correlation approach. **Composite Structures**, England, v. 211, p. 481-489, 2019.
- ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical APDL Element Reference Manual**. Release 2021 R2. Canonsburg, PA, USA, 2021.
- ARABUL, E.; LUNT, A. J. G. A novel low-cost DIC-based residual stress measurement device. **Applied Sciences**, Basel, v. 12, n. 14, p. 7233, 2022.
- ATKINSON, D.; BECKER, T. A 117 line 2D digital image correlation code written in MATLAB. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 18, p. 2906, 2020.
- BAILEY, R. T. Using 3D printing and physical testing to make finite-element analysis more real in a computer-aided simulation and design course. *In: ASEE ANNUAL CONFERENCE AND EXPOSITION*, Seattle, 122., 2015. **Proceedings [...]**. Washington: American Society for Engineering Education, 2015.
- BARKANE, A. *et al.* Uv-light curing of 3d printing inks from vegetable oils for stereolithography. **Polymers**, Basel, v. 13, n. 8, p. 1195, 2021.
- BELLONI, V. *et al.* py2DIC: A new free and open source software for displacement and strain measurements in the field of experimental mechanics. **Sensors**, Basel, v. 19, n. 18, p. 3832, 2019.
- BERNARD, C. A. *et al.* Numerical implementation of an elastic-viscoplastic constitutive model to simulate the mechanical behaviour of amorphous polymers. **International Journal of Material Forming**, Paris, v. 10, p. 607-621, 2017.
- BERTHELOT, J.M. **Composite materials: Mechanical behavior and structural analysis**. New York: Springer Science and Business Media, 2012.

BLABER, J.; ADAIR, B.; ANTONIOU, A. Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software. **Experimental Mechanics**, New York, v. 55, n. 6, p. 1105-1122, 2015.

BRLIĆ, T. *et al.* Comparison of 2D and 3D digital image correlation in determining of deformation distribution. **Machines Technologies Materials**, Sofia, v. 18, n. 4, p. 136-139, 2024.

CAMARGO, C. *et al.* Systematic literature review of realistic simulators applied in educational robotics context. **Sensors**, Basel, v. 21, n. 12, p. 4031, 2021.

CHATPINYAKOOP, C.; HALLINGER, P.; SHOWANASAI, P. Developing capacities to lead change for sustainability: A quasi-experimental study of simulation-based learning. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 17, p. 10563, 2022.

CHEN, L. C. *et al.* Full-field measurement of deformation and vibration using digital image correlation. **Smart Science**, Abingdon, v. 3, n. 2, p. 80-86, 2015.

CHONG, S. *et al.* Integration of 3D printing and Industry 4.0 into engineering teaching. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 11, p. 3960, 2018.

CUAN-URQUIZO, E. *et al.* Characterization of the mechanical properties of FFF structures and materials: A review on the experimental, computational and theoretical approaches. **Materials**, Basel, v. 12, n. 6, p. 895, 2019.

CURTIS, J. D. *et al.* On the use of stereolithography for the manufacture of photoelastic models. **Experimental Mechanics**, New York, v. 43, p. 148-162, 2003.

DOCA, T.; PIRES, F. M. A. Analysis of a cylinder-to-flat contact problem at finite elastoplastic strains. **Tribology International**, Oxford, v. 79, p. 92-98, 2014.

ENCARNAÇÃO, R. R. **Análise do torque de aperto em uniões parafusadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia de Guaratingueta - Unesp, Guaratinguetá, 2019.

GARIBALDI, G. *et al.* Spinning desi curer: A cost-effective and generalizable post-processing method for enhanced optical quality in 3D-printed microfluidics. **MRS Communications**, Heidelberg, v. 14, n. 5, p. 909-918, 2024.

GDOUTOS, E. E. Photoelasticity. **Experimental Mechanics Solid Mechanics and Its Applications**, Cham, v. 269, p. 161-192, 2022.

GONÇALVES, M. H.; ARAUJO, L. E. E; RODRIGUES, V. Lentes de gelatina. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 42, p. e20190095, 2019.

GUTTRIDGE, C. *et al.* Effects of post-curing duration on the mechanical properties of complex 3D printed geometrical parts. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, Amsterdam, v. 156, p. 106585, 2024.

HAN, S. *et al.* A strain mode spectral digital image correlation method for displacement field analysis. **Acta Mechanica Sinica**, Heidelberg, v. 39, n. 5, p. 422-430, 2023.

HEARN, E. J. **Mechanics of Materials 2**: The mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural materials. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

HERNANDEZ-DE-MENENDEZ, M.; MORALES-MENENDEZ, R. Technological innovations and practices in engineering education: a review. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, Paris, v. 13, p. 713-728, 2019.

HERRÁEZ-GALINDO, C. *et al.* A comparison of photoelastic and finite elements analysis in internal connection and bone level dental implants. **Metals**, Basel, v. 10, n. 5, p. 648, 2020.

HUEBNER, K. H. *et al.* **The Finite Element Method for Engineers**. New Jersey: Wiley, 2008.

HUNG, K. M.; MA, C. C. Theoretical analysis and digital photoelastic measurement of circular disks subjected to partially distributed compressions. **Experimental mechanics**, New York, v. 43, p. 216-224, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 178**: Plastics - Determination of flexural properties. Geneva: ISO, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527**: Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. Geneva: ISO, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-2**: Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. Geneva: ISO, 2012.

IRWANSYAH, I. *et al.* Experimental study of strain measurement using 2D digital image correlation on fixation plate and calcaneus bone fracture. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, 2024.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of machine component design**. 5th ed. New Jersey: Wiley, 2008.

KAMENSKIKH, A. A.; NOSOV, Y. O.; BOGDANOVA, A. P. The study influence analysis of the mathematical model choice for describing polymer behavior. **Polymers**, Basel, v. 15, n. 17, p. 3630, 2023.

KANDIL, A. *et al.* Effects of shaft misalignment on the stresses distribution on teeth of spur gears. **Port-Said Engineering Research Journal**, Port Fouad, v. 18, n. 1, p. 90-98, 2014.

KIM, D. *et al.* Effects of post-curing time on the mechanical and color properties of three-dimensional printed crown and bridge materials. **Polymers**, Basel, v. 12, n. 11, p. 2762, 2020.

KIM, H. K. Study on the edge rounding with consulting contact mechanics. **Tribology International**, Oxford, v. 183, p. 108426, 2023.

KIM, S.; NAM, B. H.; JUNG, Y. H. Evaluating variability in reflective photoelasticity: Focus on adhesives, light sources, and camera setup. **Applied Sciences**, Basel, v. 13, n. 19, p. 10628, 2023.

KRONE, S. M. Spatial models: stochastic and deterministic. **Mathematical and computer modelling**, Oxford, v. 40, n. 3-4, p. 393-409, 2004.

KRZYWANSKI, J. *et al.* Advanced computational methods for modeling, prediction and optimization a review. **Materials**, Basel, v. 17, n. 14, p. 3521, 2024.

KUMAR, M. B.; SATHIYA, P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. **Thin-Walled Structures**, Oxford, v. 159, p. 107228, 2021.

KUMAR, P.; HIRANI, H.; AGRAWAL, A. K. Effect of gear misalignment on contact area: Theoretical and experimental studies. **Measurement**, Amsterdam, v. 132, p. 359-368, 2019.

KUMAR, S. L.; ARAVIND, H. B.; HOSSINEY, N. Digital image correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program. **Results in Engineering**, Amsterdam, v. 4, p. 100061, 2019.

LAGUNA, O. H. *et al.* A review on additive manufacturing and materials for catalytic applications: Milestones, key concepts, advances and perspectives. **Materials and Design**, London, v. 208, p. 109927, 2021.

LANGLOIS, P.; AL, B.; HARRIS, O. Hybrid hertzian and FE-based helical gear-loaded tooth contact analysis and comparison with FE. **Gear Technology**, Elk Grove Village, v. 6, p. 54-57, 2016.

LI, W.; NEE, A. Y. C.; ONG, S. K. A state-of-the-art review of augmented reality in engineering analysis and simulation. **Multimodal Technologies and Interaction**, Basel, v. 1, n. 3, p. 17, 2017.

LIANG, X.; ISMAIL-BEIGI, S. Degree of locality of elasto-optic response in solids. **Physical Review B**, College Park, v. 100, n. 24, p. 245204, 2019.

LIGON, S. C. *et al.* Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. **Chemical reviews**, Washington, v. 117, n. 15, p. 10212-10290, 2017.

LIPOVSKII, A. A. *et al.* An integrated photoelasticity-based approach for the reconstruction of stress profiles and optical anisotropy of grin lenses. **Photonics**, Basel, v. 10, n. 11, p. 1221, 2023.

LIU, G. *et al.* Additive manufacturing of structural materials. **Materials Science and Engineering R Reports**, Amsterdam, v. 145, p. 100596, 2021.

LIU, W. *et al.* Research progress of self-healing polymer for ultraviolet-curing three-dimensional printing. **Polymers**, Basel, v. 15, n. 24, p. 4646, 2023.

MAGALHAES, C. A. *et al.* Numerical methods for the photoelastic technique using phase shifting. **Journal of Mechanics**, Oxford, v. 31, n. 4, p. 355-367, 2015.

MARÍN-MIRANDA, M. *et al.* Photoelasticity for stress concentration analysis in dentistry and medicine. **Materials**, Basel, v. 15, n. 19, p. 6819, 2022.

MAYER, J. *et al.* Influence of cleaning methods after 3D printing on two-body wear and fracture load of resin-based temporary crown and bridge material. **Clinical Oral Investigations**, Heidelberg, v. 25, p. 5987-5996, 2021.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. 4th ed. London: Pearson, 2020.

NCORR. **Open-Source Digital Image Correlation Software**, [2023]. Disponível em: <https://www.ncorr.com>. Acesso em: 20 set. 2023.

NORTON, R. L. **Machine design: An integrated approach**. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2013.

OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A. **Analytical and numerical study of the contact stress field between two curved surfaces with an elliptical shape in a crowned gear**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 26., 2021, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: ABCM, 2021

PAZHAMANNIL, R. V. *et al.* Experimental investigations into the effects of process parameters and UV curing on the tensile strength of projection based stereolithography. **Strength of Materials**, New York, v. 54, n. 3, p. 483-492, 2022.

PIKKARAINEN, A.; PIILI, H. Implementing 3d printing education through technical pedagogy and curriculum development. **Int. J. Eng. Pedagog.**, Kassel, v. 10, n. 6, p. 95-119, 2020.

QUANJIN, M. *et al.* Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 27, p. 757-763, 2020.

RAMESH, K. Developments in Photoelasticity - Basics of photoelasticity and photoplasticity. **IOP Publishing**, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/book/mono/978-0-7503-2472-4/chapter/bk978-0-7503-2472-4ch1#back-to-top-target>. Acesso em: 30 set. 2024.

RAMESH, K.; LEWIS, G. Digital photoelasticity: advanced techniques and applications. **Appl. Mech. Rev.**, New York, v. 55, n. 4, p. B69-B71, 2002.

RAMESH, K.; SASIKUMAR, S. Digital photoelasticity: Recent developments and diverse applications. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 135, p. 106186, 2020.

REMESAN, H.; RAMJI, M. **Adaptation of Open Source 2D DIC Software Ncorr for Solid Mechanics Applications**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED SCIENCE AND TECHNOLOGY IN EXPERIMENTAL MECHANICS, 9., New Delhi. **Proceedings [...]** Kanazawa: Japanese Society for Experimental Mechanics, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/2.1.4994.1442>. Acesso em: 20 set. 2023.

REN, Z.; JU, Y. Optical anisotropy of transparent polymer materials fabricated via 3D printing and their application in photoelasticity. **Optical Materials**, Amsterdam, v. 138, p. 113743, 2023.

SACKFIELD, A.; HILLS, D. A. **Mechanics of elastic solids**. Chichester: Ellis Horwood, 1983.

SAIKIRAN, P.; PURUSHOTHAM, A. Numerical and experimental photoelastic stress analysis on an epoxy circular disc. **International Journal of Recent Technology and Engineering** (IJRTE), Bhopal, v. 8, n. 3, 2019.

SALEH-ALGHAMDI, S. *et al.* Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. **Polymers**, Basel, v. 13, n. 5, p. 753, 2021.

SAXENA, A.; PAREY, A.; CHOUKSEY, M. Effect of shaft misalignment and friction force on time varying mesh stiffness of spur gear pair. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 49, p. 79-91, 2015.

SIDHU, G.; SRINIVASAN, S. Integration of ethics, sustainability, and social responsibility components in an undergraduate engineering course on finite element analysis. **International Journal of Engineering Education**, London, v. 38, n. 3, p. 656-662, 2022.

SIRINTERLIKCI, A.; ERTEKIN, Y. **3D Printing Post Processing: A comprehensive approach to digital manufacturing**. Cham: Springer International Publishing, 2023.

STATNIK, E. S. *et al.* Multi-scale digital image correlation analysis of in situ deformation of open-cell porous ultra-high molecular weight polyethylene foam. **Polymers**, Basel, v. 12, n. 11, p. 2607, 2020.

STOEHR, M. *et al.* Analysis of photoelastic properties of monocrystalline silicon. **Journal of Sensors and Sensor Systems**, Goettingen, v. 9, n. 2, p. 209-217, 2020.

SU, W. F.; FU, Y. C.; PAN, W. P. Thermal properties of high refractive index epoxy resin system. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 392, p. 385-389, 2002.

TAMBUSAY, A.; SURYANTO, B.; SUPROBO, P. Digital image correlation for cement-based materials and structural concrete testing. **Civil Engineering Dimension**, Wellington, v. 22, n. 1, 2020.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER J.N. **Theory of Elasticity**. New York: McGraw Hil, 1970.

UMEZAKI, E.; TAMAKI, T.; TAKAHASHI, S. Automatic stress analysis of photoelastic experiment by use of image processing. **Experimental Techniques**, New York, v. 13, p. 22-27, 1989.

VANECK, N. J.; WALTMAN, L. Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. **Scientometrics**, Budapest, v. 111, p. 1053-1070, 2017.

VARGAS-ISAZA, C.; POSADA-CORREA, J.; BRÍÑEZ-DE-LEÓN, J. Analysis of the stress field in photoelasticity used to evaluate the residual stresses of a plastic injection-molded part. **Polymers**, Basel, v. 15, n. 16, p. 3377, 2023.

VARNA, J.; PUPURE, L. Effect of material state and temperature on nonlinear viscoelastic response: 3D constitutive model and incremental formulation for numerical analysis. **Mechanics of Composite Materials**, New York, v. 59, n. 2, p. 193-218, 2023.

VERGARA, D. *et al.* Meaningful learning through virtual reality learning environments: A case study in materials engineering. **Applied Sciences**, Basel, v. 9, n. 21, p. 4625, 2019.

VIEIRA, F. G. *et al.* Analysis of stresses in a tapered roller bearing using three-dimensional photoelasticity and stereolithography. **Materials**, Basel, v. 12, n. 20, p. 3427, 2019.

WANG, L. *et al.* The mechanical and photoelastic properties of 3D printable stress-visualized materials. **Scientific reports**, London, v. 7, n. 1, p. 10918, 2017.

WANG, Q.; ZHU, D. Hertz Theory: Contact of Ellipsoidal Surface. **Encyclopedia of tribology**. New York: Springer, 2013.

XIAO, Y.; WATSON, M. Guidance on conducting a systematic literature review. **Journal of planning education and research**, Thousand Oaks, v. 39, n. 1, p. 93-112, 2019.

YIN, B.; KALISKE, M. Fracture simulation of viscoelastic polymers by the phase-field method. **Computational Mechanics**, Heidelberg, v. 65, p. 293-309, 2020.

ZAMANI, N. G. **The challenges of teaching finite element analysis in the undergraduate curriculum.** In: LACCEI INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE FOR ENGINEERING, EDUCATION AND TECHNOLOGY, 14., 2016, San José. **Proceedings** [...] San José: [s.n.], 2016. p. 1-10.

ZHU, K. *et al.* A general construction method of virtual simulation experiment platform based on bibliometrics and analytic hierarchy process. **Education Sciences**, Basel v. 13, n. 1, p. 80, 2023.

APÊNDICE – CÓDIGOS DESENVOLVIDOS

Quadro 3 - Código do teste de tração

```
% Dados de deslocamento (x) e força (y) já fornecidos como vetores
% Exemplo: x = [valores de deslocamento]; y = [valores de força];

% Parâmetros para análise
initial_window_size = 150; % Número de pontos iniciais para definir a região linear
error_limit = 0.01 * max(y); % Limite de erro para identificar o fim da linearidade

% Ajuste linear nos primeiros pontos para definir o comportamento linear inicial
p = polyfit(x(1:initial_window_size), y(1:initial_window_size), 1);
initial_linear_fit = polyval(p, x);

% Encontrar o ponto onde o desvio do comportamento linear inicial excede o limite
linear_end_index = NaN; % Inicializa o índice para o fim do comportamento linear
for i = initial_window_size + 1 : length(x)
    % Calcula o desvio em relação ao ajuste linear inicial
    deviation = abs(y(i) - initial_linear_fit(i));

    % Verifica se o desvio excede o limite de erro
    if deviation > error_limit
        linear_end_index = i;
        break;
    end
end

% Plotar os dados
figure;
plot(x, y, 'b-', 'DisplayName', 'Dados Originais');
hold on;

if ~isnan(linear_end_index)
    % Mostrar a região linear ajustada até o ponto final da linearidade
    plot(x(1:linear_end_index), initial_linear_fit(1:linear_end_index), 'r--', 'DisplayName',
        'Comportamento Linear');
    plot(x(linear_end_index), y(linear_end_index), 'go', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Fim do
        Comportamento Linear');
    disp(['O comportamento linear termina em: Deslocamento = ', num2str(x(linear_end_index)), ...
        ' mm, Força = ', num2str(y(linear_end_index)), ' N']);
else
    disp('Não foi possível encontrar o ponto final do comportamento linear.');
```

end

```
xlabel('Deslocamento (mm)');
ylabel('Força (N)');
legend;
title('Análise do Comportamento Linear no Teste de Tração');
grid on;

%/
Explicação do Código:
```

Parâmetros de Análise:

`initial_window_size`: Define o número de pontos iniciais para o ajuste linear.

`error_limit`: Define o limite de tolerância para identificar desvios significativos do ajuste linear.

Ajuste Linear:

Usa `polyfit` para ajustar uma linha reta aos primeiros pontos dos dados.

Identificação do Fim da Linearidade:

Calcula o desvio absoluto entre os dados reais e o ajuste linear.

Identifica o primeiro ponto em que o desvio excede o limite de erro.

Gráficos:

Plota os dados originais, a linha de ajuste linear e marca o ponto onde a linearidade termina.

Saída no Console:

Exibe o deslocamento e a força no ponto onde a linearidade termina. Se o ponto não for encontrado, informa.

`/%`

Quadro 4 - Código do teste de flexão

`% Dados de deslocamento (x) e força (y) já fornecidos como vetores`

`% Exemplo: x = [valores de deformação]; y = [valores de força];`

`% Parâmetros para análise`

`initial_window_size = 3200; % Número de pontos iniciais para definir a região linear`

`error_limit = 0.0001 * max(y); % Limite de erro para identificar o fim da linearidade`

`% Dados do teste de flexão em três pontos`

`L = 64.7; % Comprimento entre os apoios da viga (mm)`

`L_0 = 110; % Comprimento total da viga (mm)`

`b = 9.93; % Largura da seção transversal (mm)`

`h = 4.41; % Altura da seção transversal (mm)`

`% Calculando o momento de inércia da seção transversal (I) para uma seção retangular`

`I = (b * h^3) / 12; % Momento de inércia (mm4)`

`% Convertendo dados de força (y) para tensão ( $\sigma = M / S$ ), com  $M = F * L / 4$`

`stress = (1.5 * y * L) / (b * h^2); % Tensão de flexão em MPa`

`% Convertendo dados de deslocamento (x) para deformação ( $\epsilon = (6 * x * h) / (L^2)$ )`

`specific_strain = (6 * x * h) / (L^2); % Deformação específica (adimensional)`

`% Ajuste linear nos pontos iniciais para definir o comportamento linear inicial`

`p = polyfit(specific_strain(1:initial_window_size), stress(1:initial_window_size), 1);`

`initial_linear_fit = polyval(p, specific_strain(1:initial_window_size)); % Ajuste linear para os pontos iniciais`

`% Encontrar o ponto onde o desvio do comportamento linear inicial excede o limite`

`end_linear_index = NaN; % Inicializa o índice para o fim do comportamento linear`

`for i = initial_window_size + 1 : length(specific_strain)`

`% Calcula o desvio em relação ao ajuste linear inicial`

`deviation = abs(stress(i) - polyval(p, specific_strain(i))); % Compara com o valor ajustado em`

```

specific_strain(i)

% Verifica se o desvio excede o limite de erro
if deviation > error_limit
end_linear_index = i;
break;
end
end

% Plotar os dados
figure;
plot(specific_strain, stress, 'b-', 'DisplayName', 'Dados Originais');
hold on;

if ~isnan(end_linear_index)
% Ajuste linear para os pontos até o fim da linearidade
partial_linear_fit = polyval(p, specific_strain(1:end_linear_index)); % Ajuste linear até o fim da
linearidade

% Exibir o ajuste linear na região até o fim da linearidade
plot(specific_strain(1:end_linear_index), partial_linear_fit, 'r--', 'DisplayName', 'Comportamento
Linear');
plot(specific_strain(end_linear_index), stress(end_linear_index), 'go', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName',
'Fim do Comportamento Linear');
disp(['O      comportamento      linear      termina      em:      Deformação      =      ',
num2str(specific_strain(end_linear_index)), ...
', Tensão = ', num2str(stress(end_linear_index)), ' MPa']);

% Calcular e exibir o Módulo de Elasticidade (inclinação do ajuste linear)
elastic_modulus = p(1); % Inclinação do ajuste linear
disp(['O Módulo de Elasticidade é: ', num2str(elastic_modulus), ' MPa']);
else
disp('Não foi possível encontrar o ponto final do comportamento linear.');
```

end

%/

Explicação do Código:

Parâmetros para Análise:

initial_window_size: Define o número de pontos iniciais para o ajuste linear.

error_limit: Define o limite de tolerância para identificar desvios significativos.

Cálculos Fundamentais:

Tensão: Convertida a partir da força utilizando a fórmula para tensão de flexão.

Deformação: Convertida a partir do deslocamento considerando a geometria e o carregamento.

Ajuste Linear:

Usa polyfit para ajustar uma linha reta aos pontos iniciais da curva tensão-deformação.

Identificação do Fim da Linearidade:

Analisa cada ponto após a região linear inicial para identificar desvios da linha ajustada.

Gráficos:

Plota os dados originais, a linha de ajuste linear e marca o ponto onde a linearidade termina.

Resultados no Console:

Exibe a deformação e a tensão no ponto onde a linearidade termina.

Calcula e exibe o módulo de elasticidade, que é a inclinação do ajuste linear.

/%

Quadro 5 - Código para imprimir/plotar o campo de tensões e deformações nos discos, com o método analítico conforme as equações 9-12 e 28-30

% Definir os valores das constantes com as unidades especificadas

P = 3000; % valor de P em Newtons

H = 11; % valor de H em milímetros (já em mm)

D = 36; % valor de D em milímetros (já em mm)

E = 1846; % Módulo de elasticidade em MPa

nu = 0.34; % Coeficiente de Poisson

F = 2e-6; % valor de F em N/mm

% Definir o módulo de cisalhamento

G = E / (2 * (1 + nu)); % Módulo de cisalhamento em MPa

% Definir os limites para x e y em coordenadas polares

theta = linspace(0, 2*pi, 100);

r = linspace(0, D/2, 100); % Raio varia de 0 até D/2 (em milímetros)

[Theta, R] = meshgrid(theta, r);

% Convertendo coordenadas polares para cartesianas

x = R .* cos(Theta); % coordenada x em milímetros

y = R .* sin(Theta); % coordenada y em milímetros

% Definindo as funções de tensão (agora em MPa)

sigma_x_e = (-2*P/(pi*H)) * (((D/2 - y).^2 .* x.^2) ./ ((x.^2 + (D/2 - y).^2).^2) + ((D/2 + y).^2 .* x.^2) ./ ((x.^2 + (D/2 + y).^2).^2) - (1/D));

sigma_y_e = (-2*P/(pi*H)) * (((D/2 - y).^3) ./ ((x.^2 + (D/2 - y).^2).^2) + ((D/2 + y).^3) ./ ((x.^2 + (D/2 + y).^2).^2) - (1/D));

tau_xy_e = (2*P/(pi*H)) * (((D/2 - y).^2 .* x) ./ ((x.^2 + (D/2 - y).^2).^2) + ((D/2 + y).^2 .* x) ./ ((x.^2 + (D/2 + y).^2).^2));

% Convertendo as tensões de Pa para MPa (1 MPa = 1 N/mm²)

sigma_x_e = sigma_x_e / 1e6; % Tensão em MPa

sigma_y_e = sigma_y_e / 1e6; % Tensão em MPa

tau_xy_e = tau_xy_e / 1e6; % Tensão em MPa

% Calculando as tensões principais

sigma_1 = (sigma_x_e + sigma_y_e)/2 + sqrt(((sigma_x_e - sigma_y_e)/2).^2 + tau_xy_e.^2);

sigma_2 = (sigma_x_e + sigma_y_e)/2 - sqrt(((sigma_x_e - sigma_y_e)/2).^2 + tau_xy_e.^2);

% Calculando as deformações

epsilon_x = (sigma_x_e - nu * sigma_y_e) / E; % Deformação em x

epsilon_y = (sigma_y_e - nu * sigma_x_e) / E; % Deformação em y

gamma_xy = tau_xy_e / G; % Deformação de cisalhamento (gamma)

% Calculando as deformações principais

epsilon_1 = (epsilon_x + epsilon_y)/2 + sqrt(((epsilon_x - epsilon_y)/2).^2 + (gamma_xy/2).^2);

epsilon_2 = (epsilon_x + epsilon_y)/2 - sqrt(((epsilon_x - epsilon_y)/2).^2 + (gamma_xy/2).^2);

```

% Calculando  $\delta_e$  usando F diferente de P
delta_e = (2 * pi * H / F) * (sigma_1 - sigma_2); % delta_e adimensional

% Calculando  $\alpha_e$ 
alpha_e = (1/2) * atan2(2 * tau_xy_e, sigma_x_e - sigma_y_e); % alpha_e em radianos

% Plotando delta_e sem linhas de malha
figure;
surf(x, y, delta_e, 'EdgeColor', 'none'); % Remover as linhas de malha
xlabel('x (mm)');
ylabel('y (mm)');
zlabel('\delta_e');
title('Distribuição de \delta_e');
colorbar;
view(2); % Mostrar em 2D com cores

% Plotando alpha_e sem linhas de malha
figure;
surf(x, y, alpha_e, 'EdgeColor', 'none'); % Remover as linhas de malha
xlabel('x (mm)');
ylabel('y (mm)');
zlabel('\alpha_e (radianos)');
title('Distribuição de \alpha_e');
colorbar;
view(2); % Mostrar em 2D com cores

% Plotando as deformações epsilon_x, epsilon_y, e gamma_xy
figure;
surf(x, y, epsilon_x, 'EdgeColor', 'none');
xlabel('x (mm)');
ylabel('y (mm)');
zlabel('\epsilon_x');
title('Deformação \epsilon_x');
colorbar;
view(2);

figure;
surf(x, y, epsilon_y, 'EdgeColor', 'none');
xlabel('x (mm)');
ylabel('y (mm)');
zlabel('\epsilon_y');
title('Deformação \epsilon_y');
colorbar;
view(2);

figure;
surf(x, y, gamma_xy, 'EdgeColor', 'none');
xlabel('x (mm)');
ylabel('y (mm)');
zlabel('\gamma_{xy}');
title('Deformação \gamma_{xy}');
colorbar;
view(2);

% Plotando as deformações principais epsilon_1 e epsilon_2

```

```
figure;  
surf(x, y, epsilon_1, 'EdgeColor', 'none');  
xlabel('x (mm)');  
ylabel('y (mm)');  
zlabel('\epsilon_1');  
title('Deformação Principal \epsilon_1');  
colorbar;  
view(2);
```

```
figure;  
surf(x, y, epsilon_2, 'EdgeColor', 'none');  
xlabel('x (mm)');  
ylabel('y (mm)');  
zlabel('\epsilon_2');  
title('Deformação Principal \epsilon_2');  
colorbar;  
view(2);
```

ANEXO – TRABALHOS PUBLICADOS RELACIONADOS A TESE



Sociedad Chilena de
Mecánica Computacional

Jornada de Mecánica Computacional
7 y 8 de Octubre de 2021
Chile

ESTUDIO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DE LAS INTERACCIONES DE FUERZAS DE CONTACTO GENERALIZADAS EN CILINDROS ABULTADOS

Geraldo Cesar Rosario de Oliveira, Carlos Alexis Alvarado Silva, Víctor Orlando
Gamarra Rosado, Fernando de Azevedo Silva

UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Avenida Ariberto Pereira da Cunha 333,
Guaratinguetá, 12500-000, Brazil.
e-mail : geraldo.cesar@unesp.br; carlos.alvarado@unesp.br; victor.rosado@unesp.br;
fernando.azevedo@unesp.br

RESUMEN

En la optimización y desarrollo de piezas y componentes mecánicos es fundamental comprender el campo de tensiones que actúan cuando dos cuerpos están en contacto debido a una carga externa, y para ello se realizan comparaciones entre los métodos analítico y numérico, respectivamente. En este artículo se estudia el campo de tensiones de contacto entre dos superficies elipsoidales curvas, las cuales fueron estudiadas según la teoría del contacto generalizada, que ocurre cuando una superficie curva puede ser representada por dos radios de curvatura principales en una pequeña región de interacción. El método analítico se basa en ecuaciones del estudio de Hertz de superficies de contacto. Las interacciones de contacto ocurren en dos configuraciones distintas bajo la acción de una carga externa y estática: la primera es entre dos cilindros cóncavos (rodillos esféricos) y la segunda entre un cilindro cóncavo (rodillo esférico) y una cavidad. Los métodos numéricos utilizados en el estudio del contacto son Pure Penalty y Normal Lagrange disponibles en el software ANSYS®. Considerando la tensión de contacto normal, el método Pure Penalty en la configuración de dos rodillos esféricos se obtiene el resultado más cercano al método analítico, mientras que el método Normal



COBEM
2021 26th International Congress
of Mechanical Engineering



Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas
November 22-26, 2021, Virtual Congress, Brazil

COB-2021-0317

ANALYTICAL AND NUMERICAL STUDY OF THE CONTACT STRESS FIELD BETWEEN TWO CURVED SURFACES WITH AN ELLIPTICAL SHAPE IN A CROWNED GEAR

Geraldo Cesar Rosario de Oliveira

Fernando de Azevedo Silva

UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Avenida Ariberto Pereira da Cunha 333, Guaratinguetá, 12500-000, Brazil.
e-mail: geraldo.cesar@unesp.br
e-mail: fazevedosilva@unesp.br

Abstract. In this article, contact stress field between two gears was approximated as ellipsoidal curved surfaces according to generalized contact theory. Crowned teeth have surfaces modified lengthwise to produce localized contact. A static load was used to compare the results obtained in the numerical and analytical methods using general equation proposed by Hertz. Numerical methods applied in ANSYS® were Pure Penalty, Normal Lagrange and Multi-Point Constraint. Considering normal contact stress, Pure Penalty method in convex-convex configuration obtained result closest to analytical method while Normal Lagrange method obtained least difference in case convex-concave. It was proven that shear stress as expected, has a lot of influence on result, mainly on equivalent stress and normal Lagrange method obtained results closer to analytical method in this regard.

Keywords: Contact stress field, Finite elements, Hertz stress, Gear teeth modifications.

1. INTRODUCTION

Crowning or barreling is the bulging of the tooth face from the center to the reaching edge and is usually described as a circular arc profile, making the tooth surface slightly convex. This method allows the gear to maintain contact in central region of tooth and avoids the contact of edge. Use of crowning (Kubota and Nyumon, 2010; Bergseth and Björklund, 2010) shifts peak load from tooth flank edges and therefore reduces the risk for high contact pressures at edges.

Gear teeth modifications such as lead crowning are often recommended to compensate for misalignment. Defect can occur even if gears themselves are correct. Assembly process may present errors of parallelism of two axes or eccentricity when assembling gears in axes. This is due to other elements that generate interference caused by

<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2024-36-0117/>

SAE
INTERNATIONAL

Standards Publications News Attend Learn

Browse » Publications » Technical Papers » 2024-36-0117

2024-12-20

Multi Criteria Analysis Selection of Cylindrical Spur Gears

2024-36-0117

Organizations need to maintain their processes at high levels of efficiency to be competitive, asset management and industrial maintenance are extremely important to obtain positive results in optimizing operating costs, saving energy resources, reduction of environmental impacts among other characteristics that are considered differential for organizations. In this scenario, methods are increasingly being sought to assist managers in decision-making processes that contain several alternatives and selection criteria involved. The AHP and TOPSIS methods have been widely associated with prioritization studies, cost evaluation, resource selection, suppliers, among others. Thus, the selection of equipment and industrial elements can be evaluated by means of multicriteria decision methods where the criteria considered important by specialists in the area are inserted into the model. The objective of this article was to present a selection process for spur gears based on stress analysis and application of selection methods considering material, size and acquisition price.

DOI: <https://doi.org/10.4271/2024-36-0117>

Author(s): Geraldo Cesar Rosario de Oliveira, Vanis Aparecida Rosario de Oliveira, Carlos Alexis Alvarado Silva, Erick Siqueira Guidi, Valéria Antonio Pamplona Salomon, Victor Orlando Gama Rosa, Fernando de Azevedo Silva

Affiliated: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Univ

Pages: 8

Event: SAE Brasil 2024 Congress

ISSN: 0148-7191

e-ISSN: 2688-3627

Evaluation and Feasibility of Different Models and Methods for Composite Simulation Using Ansys

Eduardo Pires Bonhin, Sarah David Müzel, Geraldo Cesar Rosario de Oliveira, Walter Luiz Medeiros Tupinambá, Erick Siqueira Guidi, Carlos Alexis Alvarado Silva, Fernando de Azevedo Silva

Abstract— The utilization of composite materials in various engineering sectors has gained significant prominence due to their unique characteristics. However, owing to their inherent heterogeneity, these materials often exhibit nonlinear and unpredictable behaviors. Consequently, the finite element method has seen a growing application as an invaluable tool for analyzing composites subjected to diverse scenarios. This study aims to assess the advantages and disadvantages of ANSYS APDL and Workbench modules (specifically, ACP and Static Structural) while also examining the impact of the choice of elements in simulating composite materials. The results obtained reveal that, irrespective of the chosen method and element type, the strain patterns exhibited remarkable similarity. Nonetheless, models employing shell elements demonstrated a notable advantage, requiring fewer elements and nodes. Furthermore, the recommended model is the integrated ACP model. This preference is based on its capacity to simplify layer modeling and enable the detailed analysis of strains within each layer.

Index Terms — Carbon Fibers, Finite Element, Materials, Polyphenylene Sulfide Composite.

I. INTRODUCTION

Advancements in technology have spurred a growing demand for materials with extraordinary properties, surpassing the capabilities of traditional materials like metal alloys, ceramics, and polymers [1]-[3]. Composites offer a unique combination of performance attributes that are unattainable by their individual constituents [4]-[5]. These combinations enable the creation of lightweight components with remarkable strength and stiffness, along with added advantages such as resistance to high temperatures, corrosion, and impact [2], [6], [7]. This versatility makes composites more appealing than single-material alternatives

array of industries, including automotive, aerospace, petrochemical, naval, electro-electronics, civil construction, energy, biomedical, and sports, among others [2], [3], [5]-[9]. Despite their extensive possibility use, composite materials pose challenges due to their cost, inherent heterogeneity, and the influence of lamination configurations on their properties. Analytical models seek to represent the various failure phenomena that impact composite performance [10] [11]-[14]. In response to these challenges and with the aim of optimizing structural designs and gaining a deeper understanding of composite behavior, numerous researchers turn to computer simulations [15], [16]. Utilizing the Finite Element Method (FEM), it becomes feasible to analyze the damage inflicted upon the matrix, fibers, and the matrix/fiber interface when composites are subjected to a diverse range of conditions, including static and dynamic loading, exposure to varying temperatures, and different pressures [17], [18].

II. COMPOSITE MODELING

In the simulation of the composite materials, the effectiveness of modeling relies on the choice of elements, with four primary types at the forefront: beam, solid, plate, and shell elements. This selection is inherently tied to the nature of composite layers, as outlined in [19]. Among these options, the beam element sees relatively limited use. According to [20], plate and shell elements are the predominant choices for modeling composite structures. The rationale behind this preference, as explained by the author, stems from their capacity to reduce the number of nodes and elements when compared to solid elements, along with their ease in modeling thick laminates. Both plate and shell elements fall under the category of two-dimensional or surface elements, given that two of their dimensions (length



Article

Modeling the Stress Field in MSLA-Fabricated Photosensitive Resin Components: A Combined Experimental and Numerical Approach

Geraldo Cesar Rosario de Oliveira ^{1,2,*}, Vania Aparecida Rosario de Oliveira ^{1,*}, Carlos Alexis Alvares Silva ², Erick Siqueira Guidi ¹ and Fernando de Azevedo Silva ¹

¹ Faculdade de Engenharia e Ciências, Câmpus de Guaratinguetá, Av. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Arlindo Pereira da Cunha, 333—Portal das Colinas—Guaratinguetá, São Paulo 12516-430, Brazil; erick.sguidi@unesp.br (E.S.G.); fernando.azevedo@unesp.br (F.d.A.S.)

² Research Group Digital Manufacturing and Educational Innovation, Universidad Cesar Vallejo, Trujillo 13001, Peru; calvaredo@ucv.edu.pe

* Correspondence: geraldo.azquiro@unesp.br (G.C.R.d.O.); vania.rosario@unesp.br (V.A.R.d.O.)

Abstract: This study presents an experimental and numerical investigation into the stress field in cylinders manufactured from photosensitive resin using the Masked Stereolithography (MSLA) technique. For material characterization, tensile and bending test data from resin specimens were utilized. The stress field in resin disks was experimentally analyzed using photoelasticity and Digital Image Correlation (DIC) methods, subjected to compressive loads, according to the cylinder-plane contact model. Images were captured during the experiments using polarizing film and a low-cost CPL lens, coupled to a smartphone. The experimental results were compared with numerical and analytical simulations, where the formation of fringes and regions indicating the direction and magnitude of normal and shear stresses were observed, with variations ranging from 0.6% to 8.2%. The convergence of the results demonstrates the feasibility of using parts produced with commercially available photosensitive resin on non-professional printers for studying contact theory and stress fields. In the future, this methodology is intended to be applied to studies on stress in gears.

Keywords: finite element; strain; DIC; photoelasticity; MSLA; low-cost mechanical tests



check for updates

Academic Editor: Wei Gao

Received: 26 November 2024

Revised: 24 December 2024

Accepted: 6 January 2025

Published: 13 January 2025

Citation: Oliveira, G.C.R.d.; Rosario

1. Introduction

Understanding the stress and strain fields that arise due to contact under an external load is essential for the improvement and development of parts and components. Exper-

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): INSTRUMENTO DIDÁTICO PORTÁTIL PARA ESTUDO DE ENSAIOS DE TORÇÃO E FLEXÃO EM BARRAS DE MATERIAL METÁLICO E/OU COMPOSITO

Resumo: O presente pedido de patente de invenção, pertencendo ao campo da engenharia, mais especificamente à mecânica dos materiais, descreve um instrumento que consiste em uma máquina didática portátil que pode ser transportada para uso em laboratórios, salas de aula de ensino técnico, para estudo de ensaios de torção e flexão, capaz de realizar a medição da deflexão, torção e/ou tensões atuantes em barras chatas de materiais metálicos, compósitos ou plásticos utilizando sensores para aquisição de dados.

Figura a publicar: 1

Dados do Procurador

Procurador:

Nome ou Razão Social: Nayara de Cassia Gaban

Numero OAB:

Numero API:

CPF/CNPJ: 41911716824

Endereço: Rua Quirino de Andrade, 215

Cidade: São Paulo

Estado: SP

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	Geraldo Cesar Rosario de Oliveira 17/09/1985
Nacionalidade	brasileiro
Nome em citações bibliográficas:	CESAR ROSARIO DE OLIVEIRA, GERALDO ROSÁRIO, DE OLIVEIRA, GERALDO CESAR ROSARIO DE
Currículo Lattes	https://lattes.cnpq.br/1063278360036465
ORCID	0000-0001-6357-7454
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2018/2020	Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
2010/2017	Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, São Paulo, Brasil
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
Artigos completos publicados em periódicos	
OLIVEIRA, GERALDO CESAR ROSARIO DE; ROSARIO DE OLIVEIRA, VANIA APARECIDA; ALVARADO SILVA, CARLOS ALEXIS; GUIDI, ERICK SIQUEIRA; SILVA, FERNANDO DE AZEVEDO. Modeling the Stress Field in MSLA-Fabricated Photosensitive Resin Components: A Combined Experimental and Numerical Approach. Modelling. Fator de Impacto(2023 JCR): 1,3000, v.6, p.3, 2025.	

2. Eduardo Pires Bonhin; Sarah David Müzel; OLIVEIRA, G. C. R.; Walter Luiz Medeiros Tupinambá; Erick Siqueira Guidi; Carlos Alexis Alvarado Silva,; Fernando de Azevedo Silva. Evaluation and Feasibility of Different Models and Methods for Composite Simulation Using Ansys. IAENG International Journal of Computer Science. v.51, p.918, 2024.
3. ANGELES-ROCCA, JUNIOR; ALVARADO-SILVA, CARLOS; ROSÁRIO, DE; DE, SOUZA; DE, AZEVEDO. Numerical analysis of an automotive cage used in the Peruvian mining sector. Journal of Applied Engineering Science. v.22, p.547 - 553, 2024.
4. RAMIREZ DEL CASTILLO, MIGUEL DANIEL; CHAVEZ-ROMERO, ZAIDA BRENIDA; ALVARADO-SILVA, CARLOS ALEXIS; ROSARIO DE OLIVEIRA, GERALDO CESAR; GAYTAN-REYNA, SASSY EMPERATRIZ. Customer Satisfaction Based on User Perceptions in a Delivery Company in Peru. ACADEMIC JOURNAL OF INTERDISCIPLINARY STUDIES. v.12, p.201, 2023.
5. ALVARADO-SILVA, CARLOS ALEXIS; ROSARIO DE OLIVEIRA, GERALDO CESAR; GAMARRA-ROSADO, VICTOR ORLANDO; DE AZEVEDO SILVA, FERNANDO. A Polynomial Equation Model for Fatigue Crack Propagation in an Aeronautical Steel Material. MATERIALS SCIENCE FORUM (ONLINE). Fator de Impacto(2004 JCR): 0,4980, v.1053, p.212 - 217, 2022.
6. SILVA, C. A. A.; SOUZA, A. C.; OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; RUBIO, B. U.. Experimental Analysis of the Failure of the Bearing Support of a Cardan Shaft. dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.784. v.20, p.784, 2022.
7. ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; GAMARRA ROSADO, VÍCTOR ORLANDO; ALVARADO SILVA, CARLOS ALÉXIS; DE AZE-

VEDO SILVA, FERNANDO. DISEÑO DE UN ASCENSOR ASISTIDO PARA USUARIOS DE SILLA DE RUEDAS. INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación. v.8, p.160 - 170, 2021.

8. OLIVEIRA, G. C. R.; OLIVEIRA, V. A. R.; SILVA, F. A.; ROSADO, V. O. G.; SALOMON, V. A. P.. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y DECISIÓN MULTICRITERIO EN LA INDUSTRIA. RIIYM - Revista Científica de Ingeniería Industrial y Mecánica. v.6, p.12, 2021.
9. ROSADO, V. O. G.; OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, C. A. A.. EQUIPOS DE ASISTENCIA PARA MOVILIDAD Y REHABILITACIÓN MOTORA: CONCEPCIÓN Y PROYECTOS. <https://doi.org/10.26495/icti.v7i2.1500>. v.Vol.7, p.165 - 175, 2020.

Capítulos de livros publicados

1. YOVERA-LEON, F. R.; Chavez-Romero, Z.B.; SILVA, C. A. A.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. A Feasibility Study to Obtain Biodiesel from Avocado Waste in the Lambayeque Region, Peru In: A Feasibility Study to Obtain Biodiesel from Avocado Waste in the Lambayeque Region, Peru., ed.1. Singapore: Springer, 2023, p. 457 - 467.
2. V. A. R. de Oliveira; OLIVEIRA, G. C. R.; SALOMON, V. A. P.. Multi-criteria Analysis of Maintenance Management Performance Indicators In: Proceedings of the 11th International Conference on Production Research – Americas. ICPR 2022. Springer, Cham., ed.1. Cham SWITZERLAND: Springer Nature, 2023, v.11, p. 47 - 58.
3. OLIVEIRA, G. C. R.; ROSADO, V. O. G.; SILVA, F. A.. Estudo experimental e numérico de carga na base de uma plataforma de elevação de veículo para usuários de cadeiras de rodas In: Políticas Inclusivas de Educación Superior Contribuciones del CAAyD–AUGM, ed.1. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral,, 2022, v.1, p. 137 - 156.

4. ALVARADO SILVA, CARLOS ALÉXIS; OLIVEIRA, G. C. R.; ROSADO, V. O. G.; SILVA, F. A.. Improved IMC for Pressure Control of Oil Wells During Drilling Modeled with an Integrative Term Under Time-Delay In: Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium (BTSym'21). BTSym 2021. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 295. Springer, Cham., ed.7. : Springer Nature Switzerland AG, 2022, v.295, p. 705 - 712.
5. V. A. R. de Oliveira; SALOMON, V. A. P.; OLIVEIRA, G. C. R.; PETRILLO, A.; NEVES, S. M.. Systematic Literature Review of Multi-Criteria Decision-Making Applied to Energy Management In: Handbook of Smart Energy Systems, ed.1. : Springer Nature Switzerland AG, 2022, v.1, p. 1

Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)

1. OLIVEIRA, V. A. R.; SALOMON, V. A. P.; OLIVEIRA, G. C. R.; Erick Siqueira Guidi; ALVARADO-SILVA, CARLOS ALEXIS. ESTUDO BIBLIOMÉTRICO SOBRE DECISÃO MULTICRITÉRIO E GESTÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2024, Porto Alegre - RS, 2024, Porto Alegre - RS. Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2024, Porto Alegre - RS. 2024,
2. OLIVEIRA, G. C. R.; ALVARADO SILVA, CARLOS ALÉXIS; GUIDI, E. S.; V. A. R. de Oliveira; Victor Orlando Gamarra Rosado; SALOMON, V. A. P.; SILVA, F. A.. Multi Criteria Analysis Selection of Cylindrical Spur Gears In: 31º CONGRESSO E MOSTRA INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA DA MOBILIDADE SAE BRASIL, 2024, SÃO PAULO, 2024, SÃO PAULO. Sae technical papers. 2024,
3. ALMEIDA, F. C. S.; OLIVEIRA, G. C. R.; Erick Siqueira Guidi. Study of the Stress Concentration Factor in PPS/C Type Composite Using FEA and Analytical Method In: 31º CONGRESSO E MOSTRA INTERNACIONAL DE TEC-

NOLOGIA DA MOBILIDADE SAE BRASIL, 2024, SÃO PAULO, 2024, SÃO PAULO. Sae technical papers. 2024,

4. ALVARADO SILVA, CARLOS ALÉXIS; MONTES, C. A. M.; ROSADO, V. O. G.; OLIVEIRA, G. C. R.. Design of a Test Bench by Transfer of Pipe Heat for Engineering Education Electrical Mechanics In: 21° LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, 2023, Buenos Aires - ARGENTINA. 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development. 2023,
5. V. A. R. de Oliveira; SALOMON, V. A. P.; OLIVEIRA, G. C. R.. Energy management in industry: Multi -criteria decision-making applications In: International Conference on Technology Management and Operations, 2023, 2023, Vila Nova de Famalicão. International Conference on Technology Management and Operations, 2023. 2023,
6. APARECIDA ROSARIO DE OLIVEIRA, VANIA; CESAR ROSARIO DE OLIVEIRA, GERALDO; SALOMON, VALERIO; GUIDI, ERICK; DE AZEVEDO SILVA, FERNANDO. MULTICRITERIA ANALYSIS IN PRODUCTION OF GEARS THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING USING THE FITRADEOFF METHOD In: ANAIS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2023, 2023,
7. OLIVEIRA, G. C. R.; OLIVEIRA, V. A. R.; CONDORI, V. R. H.; GAMARRA ROSADO, VÍCTOR ORLANDO; Erick Siqueira Guidi; SILVA, F. A.. REVISÃO SOBRE ENGRENAGENS METÁLICAS E POLIMÉRICAS In: VII Workshop da Pós-Graduação em Engenharia (VII-WPG), 2023, Guaratinguetá/SP. VII Workshop da Pós-Graduação em Engenharia (VII-WPG). 2023,
8. YOVERA-LEON, F. R.; Chavez-Romero, Z.B.; ALVARADO-SILVA, CARLOS; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. A Feasibility Study to

- Obtain Biodiesel from Avocado Waste in the Lambayeque Region, Peru In: ICRAMERD 2022, 2022, Bhubaneswar, Odisha, India. ICRAMERD 2022, 2022,
9. ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; GAMARRA-ROSADO, VICTOR ORLANDO; SILVA, F. A.. COMPARAÇÃO DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES EM ENGRENAGENS CONSIDERANDO O MODELO DE LEWIS E O MODELO REAL In: VI Workshop da Pós-Graduação em Engenharia (VI-WPG), 2022, Guaratinguetá/SP. VI Workshop da Pós-Graduação em Engenharia (VI-WPG). 2022,
 10. ALVARADO SILVA, CARLOS ALÉXIS; SOUZA, A. C.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; SILVA, F. A.; RUBIO, B. U.. Experimental Analysis of the Failure of the Bearing Support of a Cardan Shaft In: 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology:, 2023, Boca Raton, Florida- USA. 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology:. 2022,
 11. SILVA, C. A. A.; OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; Victor Orlando Gamarra Rosado. A Polynomial Equation Model for fatigue crack propagation in an Aeronautical Steel Material In: 2021 The 6th International Conference on Materials Technology and Applications (ICMTA 2021)., 2021, Fukuoka, Japan. ICMTA 2020: MSF-Materials Science Forum (ISBN: 978-3-0357-3784-4). 2021,
 12. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.. Analytical and Numerical Study of the Contact Stress Field Between Two Curved Surfaces with an Elliptical Shape in a Crowned Gear In: 26th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, 2021, Florianópolis. 26th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM. 2021,
 13. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, C. A. A.; SILVA, F. A.; Victor Orlando Gamarra Rosado. ESTUDIO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DE LAS INTERACCIONES DE FUERZAS DE CONTACTO GENERALIZADAS EN CILINDROS

ABULTADOS In: XIX Jornadas de Mecánica Computacional 2021, 2021, Santiago. CUADERNOS DE MECÁNICA COMPUTACIONAL Vol. 18, no1 - ISSN 0718-171X. Santiago: SOCIEDAD CHILENA DE MECÁNICA COMPUTACIONAL, 2021, v.18, p.101 – 111

14. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.. SELEÇÃO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS BASEADO EM TENSÃO DE CONTATO, MATERIAL E RESISTÊNCIA À FADIGA EM FLEXÃO In: V Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção, 2021, Guaratinguetá. V Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção. 2021,
15. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; ROSADO, V. O. G.. ESTUDO ANALÍTICO DAS TENSÕES DE CONTATO EM MECANISMOS DE CAME E SEGUIDOR In: IV Workshop da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção, 2020, Guaratinguetá. IV Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção. 2020,
16. OLIVEIRA, G. C. R.; ROSADO, V. O. G.; SILVA, F. A.. Modelagem e simulação de um elevador assistivo residencial In: III Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção Energia-Materiais Projeto, Gestão e Otimização, 2019, Guaratinguetá. III Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção Energia-Materiais-Projeto, Gestão e Otimização. 2019,
17. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; ROSADO, V. O. G.. Estudo de um novo sistema motor para plataformas assistivas de ônibus circulares In: II Congresso Brasileiro em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologia Assistiva, 2018, Bauru. Tecnologia Assistiva: Pesquisa e Conhecimento I. Bauru: canal 6 editora, 2018, v.1, p.35 - 46

Apresentação de trabalho e palestra

1. YOVERA-LEON, F. R.; CHAVEZ-ROMERO, Z. B.; ALVARADO SILVA,

- CARLOS ALÉXIS; ROSARIO DE OLIVEIRA, GERALDO CESAR. A Feasibility Study to Obtain Biodiesel from Avocado Wastes in the Lambayeque Region, Peru, 2022. (Congresso, Apresentação de Trabalho)
2. ALVARADO SILVA, CARLOS ALÉXIS; SOUZA, A. C.; OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; RUBIO, B. U.. Análise Experimental da Falha do Suporte de Mancal de um Eixo Cardan, 2022. (Congresso, Apresentação de Trabalho)
 3. ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; SILVA, F. A.; GAMARRA ROSADO, VÍCTOR ORLANDO. Comparação de deformações e tensões em engrenagens considerando o modelo de Lewis e o modelo real, 2022. (Congresso, Apresentação de Trabalho)
 4. ALVARADO SILVA, CARLOS ALÉXIS; OLIVEIRA, G. C. R.; GAMARRA ROSADO, VÍCTOR ORLANDO; SILVA, F. A.. ID 196 – “IMPROVED IMC FOR PRESSURE CONTROL OF OIL WELLS DURING DRILLING MODELED WITH AN INTEGRATIVE TERM UNDER TIME-DELAY, 2022. (Congresso, Apresentação de Trabalho)
 6. SILVA, C. A. A.; OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; Victor Orlando Gamarra Rosado. A Polynomial Equation Model for fatigue crack propagation in an Aeronautical Steel Material, 2021. (Congresso, Apresentação de Trabalho)
 5. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.. Analytical and Numerical Study of the Contact Stress Field Between Two Curved Surfaces with an Elliptical Shape in a Crowned Gear, 2021. (Congresso, Apresentação de Trabalho)
 7. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, C. A. A.; SILVA, F. A.; Victor Orlando Gamarra Rosado. ESTUDIO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DE LAS INTERACCIONES DE FUERZAS DE CONTACTO GENERALIZADAS EN CILINDROS ABULTADOS, 2021. (Congresso, Apresentação de Trabalho)

6. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.. SELEÇÃO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS BASEADO EM TENSÃO DE CONTATO, MATERIAL E RESISTÊNCIA À FADIGA EM FLEXÃO, 2021. (Congresso, Apresentação de Trabalho)
7. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; ROSADO, V. O. G.. ESTUDO ANALÍTICO DAS TENSÕES DE CONTATO EM MECANISMOS DE CAME E SEGUIDOR, 2020. (Congresso, Apresentação de Trabalho)

Patentes

1. ROSARIO DE OLIVEIRA, GERALDO CESAR; DE AZEVEDO SILVA, FERNANDO; Victor Orlando Gamarra Rosado; GUIDI, E. S.; TUPINAMBA, W. L. M. INSTRUMENTO DIDÁTICO PORTÁTIL PARA ESTUDO DE ENSAIOS DE TORÇÃO E FLEXÃO EM BARRAS DE MATERIAL METÁLICO E/OU COMPÓSITO, 2023. Categoria: Produto. Instituição onde foi depositada: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. País: Brasil. Natureza: Patente de Invenção. Número do registro: BR10202302686. Data de depósito: 19/12/2023. Depositante/Titular: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO. Depositante/Titular: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
2. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; ROSADO, V. O. G. NOVA DISPOSIÇÃO CONSTRUTIVA DE UM TRANSDUTOR PARA MEDIÇÃO DE DEFLEXÃO EM PLATAFORMAS ASSISTIVAS, 2021. Categoria: Outra. Instituição onde foi depositada: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. País: Brasil. Natureza: Patente de Modelo de Utilidade. Número do registro: BR2020210020550. Data de depósito: 03/02/2021. Depositante/Titular: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
3. OLIVEIRA, G. C. R.; SILVA, F. A.; ROSADO, V. O. G. NOVAS DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS DE PLATAFORMA ELEVATÓRIA INCLINADA E ELEVATÓRIA VERTICAL ASSISTIVAS COMANDADA POR VOZ OU

CONTROLE REMOTO E SEU USO, 2021. Categoria: Outra. Instituição onde foi depositada: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. País: Brasil. Natureza: Patente de Modelo de Utilidade. Número do registro: BR2020210020518. Data de depósito: 03/02/2021. Depositante/Titular: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES

Bancas de trabalhos de conclusão

1. GUIDI, E. S.; ROSADO, V. O. G.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Lucas Ruzzon de Jesus Ortega. Análise de estruturas utilizando simulação numérica computacional através do método dos elementos finitos, 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
2. Marcelo Sampaio Martins; Sofia Glyniadakis; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. Participação em banca de Leonardo de Andrade Barbarini. Análise de projeto de vaso de pressão esférico de aço e compósito, 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
3. GUIDI, E. S.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; Mônica Laiolti dos Santos. Participação em banca de Othon Sabino Dias Pereira. Análise do comportamento mecânico de peças impressas pelo método FDM, 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
4. GUIDI, E. S.; TUPINAMBA, W. L. M.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Nicolas Stéfano Oliveira. Análise estrutural e funcional de um subsistema robótico lançador de bolas., 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
5. Marcelo Sampaio Martins; Sofia Glyniadakis; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. Participação em banca de Bárbara Peres Pereira. Correlação entre o método de medição DIC e o método de extensômetro elétrico de resistên-

- cia, 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
6. Marcelo Sampaio Martins; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; Sofia Glyniadakis. Participação em banca de Isadora Almeida Rezende. Estudo da viabilidade de substituição de materiais de desgaste utilizados no preparo de solo., 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 7. GUIDI, E. S.; SILVA, F. A.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Fernando Cristian Soares de Almeida. Influência de concentrador de tensão em materiais compósitos, 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 8. Marcelo Sampaio Martins; Sofia Glyniadakis; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. Participação em banca de Nicole Gomes Rodrigues. Projeto de Fabricação de Mapa Táteis para Deficientes Visuais, 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 9. Marcelo Sampaio Martins; Sofia Glyniadakis; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. Participação em banca de Isabella Sismotto do Vale. Projeto de reutilização de estampo de corte para a fabricação de chapas de peças automotivas em uma única prensa de corte, 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 10. GUIDI, E. S.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; ROSADO, V. O. G.. Participação em banca de Thiago Rocha. Proposta de melhoria no chassi de um veículo Fórmula SAE utilizando simulação numérica computacional., 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 11. Marcelo Sampaio Martins; Sofia Glyniadakis; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. Participação em banca de Mateus Penido Pereira. Validação

de vasos de pressão pelas normas ASME VIII, divisão 1 e AD2000: um estudo de caso, 2023. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

12. GUIDI, E. S.; Mônica Laiolti dos Santos; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de : Henrique Matheus Pereira Silva. Análise da Suspensão de um Protótipo Off-Road, 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
13. TUPINAMBA, W. L. M.; OLIVEIRA, G. C. R.; GUIDI, E. S.. Participação em banca de Janaina Ramos dos Santos. Analise do projeto de um subsistema articulado de um robô, 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
14. SILVA, F. A.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; FARIA NETO, A. R.. Participação em banca de Matheus Kenzo Cortez Hosoe. Comparação e aplicabilidade de sistemas de transmissão veicular para diferentes ambientes., 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
15. SILVA, F. A.; OLIVEIRA, G. C. R.; FARIA NETO, A. R.. Participação em banca de André Nesteru Corrêa. DESENVOLVIMENTO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE EMBREAGENS E FREIOS, 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
16. SILVA, F. A.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; FARIA NETO, A. R.. Participação em banca de Gabriel Gonçalves de Barros. Otimização da comunicação dentro de um programa de engenharia global de motores e pós-tratamento, 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
17. DE AZEVEDO SILVA, FERNANDO; GUIDI, E. S.; ROSÁRIO DE OLIVEI-

- RA, GERALDO CÉSAR. Participação em banca de Rúben Emanuel de Abreu Torres. Padronização do uso de um sistema de gerenciamento de modificações de engenharia de caixas de direção automotiva., 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
18. Marcelo Sampaio Martins; Sofia Glyniadakis; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. Participação em banca de Leonardo Moreno Xavier. Programação em Python para dispositivos do laboratório de estruturas., 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 19. SILVA, F. A.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; SILVA, F. S.. Participação em banca de Pedro Cadorin Falleiros. Projeto De Revitalização De Um Grupo Motor Gerador À Diesel E Sua Conversão Para Utilização Como Gerador Portátil, 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 20. SILVA, F. A.; GUIDI, E. S.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR. Participação em banca de Felipe Abrahão Ferreira. Projeto e análise de um conjunto amortecedor por meio do método de elementos finitos em aplicativos comerciais, 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 21. SILVA, F. A.; FARIA NETO, A. R.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Mateus Paula Santos Pires. Projeto Mecânico e fabricação de protótipo de uma peneira rotativa inclinada, 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 22. SILVA, F. A.; ROSÁRIO DE OLIVEIRA, GERALDO CÉSAR; ROSADO, V. O. G.. Participação em banca de Alexandre Garcia de Souza Martins. Sistema de transmissão por engrenagens helicoidais, 2022. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
 23. SILVA, F. A.; GUIDI, E. S.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de

- Allan da Costa Pimentel Rodrigues. Análise do projeto de uma bomba com pistão oscilante utilizando o software Inventor, 2020. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
24. SILVA, F. A.; GUIDI, E. S.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Matheus de Souza Resende. Defeitos frequentes na injeção de autopeça de polipropileno com aditivo de carbonato de cálcio, 2020. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
25. GUIDI, E. S.; SILVA, F. A.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Pedro Nunes da Silva. Projeto estrutural de molas helicoidais de extensão utilizando o Microsoft Excel e programação VBA, 2020. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
26. SILVA, F. A.; Victor Orlando Gamarra Rosado; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Lucas Hideki Siqueira. Análise modal dos rolamentos da bomba de circulação do reator de polimerização, 2019. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
27. SILVA, F. A.; GUIDI, E. S.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Joaquim Borges Rodrigues Neto. Análise da influência de elementos de vedação na rigidez de juntas parafusadas em tração utilizando o software Excel, 2018. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
28. SILVA, F. A.; GUIDI, E. S.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Rodolfo Minoru Asaeda. Análise da influência do coeficiente de atrito e do diâmetro da cabeça do parafuso na aplicação da pré carga de montagem em juntas aparafusadas em tração, 2018. (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
29. GUIDI, E. S.; SILVA, F. A.; OLIVEIRA, G. C. R.. Participação em banca de Danilo Yoshihiro Nizuma. Utilização de simulação numérica computacional na análise das condições de contorno de eixos de transmissão, 2018. (Engenharia

Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

1. Apresentação de Poster / Painel no(a) VII Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção, 2022. (Congresso) Comparação de deformações e tensões em engrenagens considerando o modelo de Lewis e o modelo real.
2. Apresentação de Poster / Painel no(a) V Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção, 2021, 2021. (Congresso) SELEÇÃO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS BASEADO EM TENSÃO DE CONTATO, MATERIAL E RESISTÊNCIA À FADIGA EM FLEXÃO.
3. XIX Jornadas de Mecánica Computacional 2021, 2021. (Congresso) ESTUDIO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DE LAS INTERACCIONES DE FUERZAS DE CONTACTO GENERALIZADAS EN CILINDROS ABULTADOS.
4. Apresentação de Poster / Painel no(a) IV Workshop da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção, 2020. (Congresso) ESTUDO ANALÍTICO DAS TENSÕES DE CONTATO EM MECANISMOS DE CAME E SEGUIDOR
5. Avaliador no(a) XXXII Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2020. (Congresso) Avaliador no XXXII Congresso de Iniciação Científica da Unesp.
6. Apresentação de Poster / Painel no(a) III Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção Energia-Materiais-Projeto, Gestão e Otimização, 2019. (Congresso) Modelagem e simulação de um elevador assistivo residencial.
7. Apresentação de Poster / Painel no(a) XXIX Congresso de Iniciação Científica - CIC/2017, 2017. (Congresso) Dimensionamento preliminar de um elevador assistivo para pessoas com deficiência e/ou idosas, usuários de cadeiras de rodas..