



JONATHAN GAZZOLA

**ANÁLISE DA TÉCNICA ÓPTICA DE *MOIRÉ*
COMO MÉTODO FOTOMECÂNICO PARA
QUALIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE
TENSÕES**

CAMPINAS

2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

JONATHAN GAZZOLA

**ANÁLISE DA TÉCNICA ÓPTICA DE *MOIRÉ* COMO
MÉTODO FOTOMECÂNICO PARA QUALIFICAÇÃO E
QUANTIFICAÇÃO DE TENSÕES**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na Área de Concentração de Máquinas Agrícolas.

Supervisor/Orientador: Prof. Dr. Inacio Maria Dal Fabbro

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO JONATHAN GAZZOLA E
ORIENTADO PELO PROF. DR. INÁCIO MARIA DAL FABBRO

Assinatura do Orientador

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

G259a Gazzola, Jonathan, 1981-
Análise da técnica óptica de *Moiré* como método fotomecânico para qualificação e quantificação de tensões / Jonathan Gazzola. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Inacio Maria Dal Fabbro.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Processos fotomecânica. 2. Método de *Moiré*. 3. Deformações e tensões.
I. Dal Fabbro, Inacio Maria, 1944-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Analyzes of Moiré optical technique as photomechanical method to stress qualification and quantification

Palavras-chave em inglês:

Photomechanical processes

Moiré method

Strain and stresses

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Inacio Maria Dal Fabbro [Orientador]

Renato Laurenti

Antonio Carlos Loureiro Lino

Mauro Augusto Demarzo

Julio Soriano

Data de defesa: 07-10-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

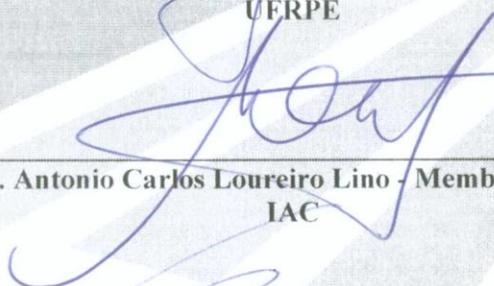
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Jonathan Gazzola**, aprovada pela Comissão Julgadora em 07 de outubro de 2013, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



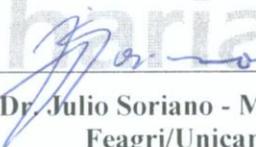
Prof. Dr. Renato Laurenti – Membro Titular
UERPE



Dr. Antonio Carlos Loureiro Lino - Membro Titular
IAC



Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo - Membro Titular
FEC/Unicamp



Prof. Dr. Julio Soriano - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Resumo

A distribuição de tensões em corpos dá suporte à engenharia de projetos visando a melhoria da qualidade e segurança de produtos e atualmente são determinados por métodos analíticos e experimentais. A vantagem dos métodos experimentais em relação aos métodos analíticos está em analisar a distribuição de tensões e deformações independentemente das condições do material e de sua geometria. Entre os métodos experimentais, as técnicas ópticas que tem se demonstrado propícias são holografia, *speckle* interferométrico e as técnicas de *moiré*. As técnicas ópticas interferométricas permitem determinar campos de deslocamento, porém, quando combinados com métodos híbridos se tornam passíveis de determinação do componente de tensões e deformações específicas e são comumente conhecidas como técnicas fotomecânicas. As técnicas de *moiré* são conhecidas por sua habilidade em determinar topografia de objetos, porém, pesquisas recentes têm mostrado muito útil em determinar campo de deslocamento. A técnica de *moiré* é baseada na fenomenologia *moiré*, na qual, duas grades superpostas produzem franjas padrões e, por meio de tratamento de imagem adequado permite deduzir qualitativamente o mapa de distribuição de tensões e deformações. Os principais tipos de técnicas de *moiré* são de sombra e por *phase-shifting* e seu arranjo experimental consiste no uso de equipamentos de baixo custo, o que o torna altamente viável, frente às outras técnicas ópticas. A proposta deste trabalho de pesquisa se identifica em analisar o uso da técnica de *moiré* por *phase-shifting* para determinação de tensões e deformações de forma qualitativa e quantitativa a partir do campo de deslocamento determinado experimentalmente. Para validação, os resultados gerados pela técnica de *moiré* foram comparados com os resultados obtidos por ensaio experimental de extensometria elétrica e simulação computacional. Os resultados mostraram que qualitativamente, a técnica de *moiré* foi hábil em determinar campo de deslocamento, enquanto que, quantitativamente a técnica foi hábil em determinar campo de deslocamento, deformações e tensões.

Palavras-Chave: Métodos fotomecânicos; Técnica de *moiré*; Quantificação de Tensões e Deformações.

Abstract

Stress distribution in specimens supports the design engineering objectiving quality and insurance products improvement and actually are determined through analytical and experimental analyses. Analyzes of stress and strain distribution independently of material conditions and its geometry becomes advantage of experimental methods, in relation to analytical methods. Among experimental methods, optical techniques have demonstrated to be favorable are holography, interferometrical speckle and *moiré* techniques. Interferometrical optical techniques allow to determine displacement fields, but, when associated to hybrid methods, they become able to stress and strain components determination and they are usually named as photomechanical technique. *Moiré* technique is known for its hability to determine shape surface, but, researches have demonstrated to be usefull to determine displacement field. *Moiré* technique is based about moiré phenomenology, which, two superposed grids produces pattern fringes and, applying an adequated image treatment is possible to deduce qualitatively the stress and strain distribution mapping. The main kind of *moiré* technique are shadow and phase-shifting and its setup is based in use of low cost equipments, which becomes highly feasible, when compared to other optical techniques. This research work objectives to analyze the use of phase-shifting *moiré* technique to stress and strain determination qualitative and quantitatively using datas of displacement field determined experimentally. Results obtained through *moiré* technique were validated comparing results obtained through etectrical extensometry experimental tests and computational simulation. Results showed that qualitatively, moiré technique was able to determine displacement field, while quantitatively moiré was able to determine displacement, strain and stress.

Key-Words: Photomechanical methods; *Moiré* techniques; Stress and strain quantification.

Sumário

Lista de Ilustrações.....	xv
Lista de Tabelas.....	xix
Lista de abreviaturas e siglas.....	xxi
Lista de símbolos.....	xxiii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo geral.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Introdução.....	5
3.2 Fundamentos da mecânica dos meios contínuos.....	5
3.2.1 Campo de deslocamento mecânico.....	5
3.2.2 Relação campo de deslocamento-tensão.....	7
3.3 Métodos experimentais para determinação de tensão.....	10
3.4 A Fenomenologia <i>Moiré</i>	13
3.5 Técnicas de <i>Moiré</i> (TM).....	16
3.6 Uso das TM para análise de tensões.....	20
3.7 Cálculo de deslocamento e deformação pela técnica de <i>moiré</i>	23
3.7.1 Determinação de Deslocamento e Deformação.....	23
3.8 Metodologia Híbrida.....	24
3.9 Quantificação de Tensão.....	26
3.9.1 Quantificação de Tensões Fora do Plano (Estado Plano de Deformação).....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Ensaio de Carregamento.....	29
4.2 Ensaio Fotomecânico pela Técnica Óptica de <i>Moiré</i> por <i>phase-shifting</i>	32
4.2.1 Processamento de Imagens.....	33
4.2.2 Quantificação de tensões (metodologia híbrida).....	35
4.3 Validação Experimental.....	36
4.3.1 Simulação Computacional.....	36
4.3.2 Extensometria Elétrica.....	38

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1 Resultado Qualitativo.....	40
5.2 Resultado Quantitativo.....	55
6. CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS.....	76
APÊNDICE.....	81

Ao Deus de amor

Aos meus pais Valentim e Isaldina

À minha esposa Luciana

Aos amigos e companheiros que confiaram em meu trabalho

Dedico

Agradecimentos

Ao Deus de amor que esteve presente em minha vida me orientando e guiando com sua sabedoria.

Ao amigo e orientador, Prof. Inácio Maria Dal Fabbro, por seus conselhos, apoio, orientação e acima de tudo a amizade que esteve presente durante minha formação acadêmica. Sua confiança e dedicação permitiram transpor os desafios deste trabalho de pesquisa e promover pessoal meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Aos meus pais, Isaldina e Valentim, pelo apoio e carinho, fundamentais para facilitar os desafios que a vida me impôs.

À minha amada esposa Luciana de Moraes Gazzola que sempre nas dificuldades me deu apoio e coragem para passar todos os desafios impostos. Seu incentivo e confiança foram de fundamental importância para a conclusão de mais esta etapa em minha vida.

À Coordenação de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Em especial, gostaria de agradecer explicitamente aos funcionários Leandro (FEAGRI), Geraldo (FEM) e Fábio (FEC).

Aos amigos que me acompanharam indiretamente, entre eles, Roberto Guedes, Fabiane Fagundes, Carlos Caetano, Antônio J. Júnior, Edson D'Ávila, Danielle Gonçalves, Gabriela Kurokawa, Juliana Fracarolli, Agmon Rocha, aos meus sogros (Marcos e Isabel) e ao meu irmão Fabiano Gazola e sua esposa Elizângela Ferreira da Silva.

Em especial, gostaria de agradecer aos amigos de grupo de pesquisa Kelen Cristiane Cardoso e Marcos Valério Gebra Silva que, pela grande contribuição feita de forma direta, foi possível a realização deste trabalho de pesquisa.

Por fim gostaria de agradecer ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Lista de Ilustrações

Figura 01. Vetor deslocamento de um ponto P_0 à P	5
Figura 02. Representação do vetor deslocamento tri-dimensional.....	6
Figura 03. Campo de deslocamento tri-dimensional.....	7
Figura 04. Efeito de borda na análise de tensões pela técnica por fotoelasticidade clássica.....	12
Figura 05. Franjas padrões em uma placa circular obtidas através do modelo da técnica de holografia de dupla-exposição.....	12
Figura 06. Franjas por moiré com: a) corpo carregado. b) corpo descarregado.....	13
Figura 07. Definição dos termos de grade com relação a: a) Linha de grade e b) Passo de grade.....	13
Figura 08. Grades ópticas para ensaio de <i>moiré</i> . a) linhas paralelas; b) pontos equidistantes; c) círculos equidistantes; d) linhas radiais.....	14
Figura 09. Sobreposição de grades e a formação de franjas claras e escuras.....	15
Figura 10. Sobreposição de grades e formação de franjas de <i>moiré</i>	15
Figura 11. Grades de linhas paralelas para <i>moiré</i> por <i>phase-shifting</i> por retículos, deslocadas de 90° entre si.....	19
Figura 12. Grade sinusoidal para <i>moiré</i> por <i>phase-shifting</i> deslocadas de 90° entre si.....	19
Figura 13. Mapa de isodeformações em Bambu (<i>Guadua angustifolia</i>).....	21
Figura 14.a. Campo de deslocamento: a) vertical. b) horizontal.....	23
Figura 15. Gráfico de sistema com condição viciada.....	26
Figura 16. Exemplo de corpo de prova em estado plano de deformação.....	27
Figura 17. Matriz Característica para o estado plano de deformações.....	27
Figura 18. a) Vista frontal e lateral do corpo de prova com suas respectivas dimensões. b) Vista isométrica do corpo de prova.....	30
Figura 19.a. Dispositivo mecânico para carregamento fletor.....	31

Figura 19.b. Relógio Comparador Digital.....	31
Figura 20. Arranjo Experimental para ensaio fotomecânico de <i>moiré</i> por <i>phase-shifting</i> ..	32
Figura 21. Corpo de prova virtual e condição de contorno reproduzido no <i>software</i> Abaqus 6.10.....	38
Figura 22. Dispositivo utilizado para simulação computacional.....	38
Figura 23. Posicionamento dos <i>strain-gages</i> ao longo do comprimento útil do corpo de prova. Medida em milímetros.....	39
Figura 24. Campo de deslocamento em vista bi-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.....	40
Figura 25. Campo de deslocamento em vista tri-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.....	41
Figura 26. Campo de deformação específica em vista bi-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.....	41
Figura 27. Campo de deformação específica em vista tri-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.....	42
Figura 28. Campo de tensão em vista bi-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.....	42
Figura 29. Campo de tensão em vista tri-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.....	43
Figura 30.a) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 0,5 mm.....	44
Figura 30.b) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 1,0 mm.....	44
Figura 30.c) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 1,5 mm.....	45
Figura 30.d) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 2,0 mm.....	45
Figura 30.e) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 2,5 mm.....	46
Figura 31. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 01 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.....	47

Figura 32. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 02 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.....	48
Figura 33. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 03 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.....	49
Figura 34. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 04 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.....	50
Figura 35. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 05 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.....	51
Figura 36. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de <i>moiré</i>	52
Figura 37. Mapa qualitativo de: a) deslocamento obtido por simulação computacional. b) deformação específica obtida por simulação computacional. c) tensão obtida por simulação computacional. d) <i>moiré</i> por <i>phase-shifting</i>	55
Figura 38. Curva de deslocamento do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.....	56
Figura 39. Curva de deformação específica do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.....	56
Figura 40. Curva de tensão do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.....	57
Figura 41. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 0,5 mm.....	57
Figura 42. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 1,0 mm.....	57
Figura 43. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 1,5 mm.....	58
Figura 44. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 2,0 mm.....	58
Figura 45. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 2,5 mm.....	59
Figura 46. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 0,5 mm.....	62

Figura 47. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 1,0 mm.....	62
Figura 48. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 1,5 mm.....	63
Figura 49. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 2,0 mm.....	63
Figura 50. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 2,5 mm.....	64
Figura 51. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 0,5 mm.....	66
Figura 52. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 1,0 mm.....	67
Figura 53. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 1,5 mm.....	67
Figura 54. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 2,0 mm.....	67
Figura 55. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 2,5 mm.....	68

Lista de Tabelas

Tabela 01. Relações dimensionais de corpos de prova para ensaios de flexão.....	30
Tabela 02. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 0,5 mm.....	60
Tabela 03. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,0 mm.....	60
Tabela 04. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,5 mm.....	61
Tabela 05. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,0 mm.....	61
Tabela 06. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,5 mm.....	61
Tabela 07. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 0,5 mm.....	64
Tabela 08. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,0 mm.....	64
Tabela 09. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,5 mm.....	65
Tabela 10. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova taxa de deslocamento de 2,0 mm.....	65
Tabela 11. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,5 mm.....	65
Tabela 12. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 0,5 mm.....	68
Tabela 13. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,0 mm.....	68
Tabela 14. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,5 mm.....	69
Tabela 15. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,0 mm.....	69

Tabela 16. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,5 mm..... 69

Lista de abreviaturas e siglas

adim	Adimensional
ASTM	American Society for Testing Materials (Associação Americana para Ensaio de Materiais)
CP	Corpo de Prova
FEAGRI	Faculdade de Engenharia Agrícola
FEC	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
TM	Técnicas de <i>Moiré</i>
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

Lista de Símbolos

\vec{u}	Vetor-deslocamento
P_x	Posição de um ponto específico
ϵ	Tensor deformação linear [mm]
$\epsilon_{i,j}$	Deformação específica [adim]
$\sigma_{i,j}$	Tensão principal [MPa]
$C_{i,j,k,m}$	Tensor das constantes elásticas
I	Momento de Inércia [mm ⁴]
b	Largura do corpo de prova [mm]
h	Altura do corpo de prova [mm]
P	Carregamento [N]
E	Módulo de Elasticidade do corpo [MPa]
Z	Deslocamento do corpo de prova [mm]
L	Comprimento do corpo de prova [mm]
M	Momento Fletor [N.mm]
y	Altura da linha neutra [mm]
K	Rigidez do material [N/mm]
D	Matriz Característica das propriedades mecânicas do corpo de prova [MPa]
ν	Coefficiente de Poisson [adim]

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A necessidade de se determinar o estado de distribuição de tensões e deformações em elementos de estrutura, submetidos à ações diversas, é de comum ocorrência na engenharia. A otimização de equipamentos, máquinas e outras estruturas encontra suporte na análise da distribuição de tensões e deformações. O mapeamento de tensões permite analisar, otimizar e corrigir problemas de projetos de produtos. Há vários métodos de determinação da distribuição de tensões. Métodos matemáticos clássicos e computacionais, métodos fotoelásticos e fotomecânicos estão incluídos nesse contexto.

Os métodos de mapeamento de tensão podem ser analíticos ou experimentais e, cada um desses exibe especificidades, vantagens e desvantagens. Os métodos clássicos e as equações preconizadas pela mecânica dos materiais são úteis e permitem quantificar a distribuição de esforços e deformações em corpos de geometria simples. A aplicação de métodos clássicos de análise de esforços envolvendo corpos de geometria mais complexa pode inviabilizar a solução do problema com o risco de gerar resultados equivocados. Deve-se considerar que a determinação da distribuição de esforços e deformações em corpos de geometria complexa pode ser viabilizada por técnicas numéricas, notadamente pelo método dos elementos finitos, porém problemas relativos às características do material, tais como, singularidades, não podem ser embutidos neste tipo de ferramenta e afasta os resultados de uma análise mais próxima da realidade.

A aplicação de métodos fotoelásticos ganhou um importante espaço na comunidade científica por permitir a visualização da distribuição de tensões e deformações nos corpos em estudo de maneira rápida, confiável e sem distinção de suas características individuais. Compreende-se como métodos fotoelásticos uma série de técnicas experimentais que empregam conceitos de óptica para determinar o comportamento mecânico de um corpo quando solicitado por carregamentos. Essas técnicas se dividem entre **técnica fotoelástica** propriamente dita, e as **técnicas fotomecânicas**. A técnica fotoelástica, comumente conhecida como fotoelasticidade clássica, gera dados de tensão de forma direta. As técnicas fotomecânicas permitem determinar tensões de forma indireta, através do estudo dos campos de deslocamento e a aplicação de conceitos de metodologia híbrida, onde é possível obter, por

cálculos, a distribuição de deformação e conseqüentemente a distribuição de tensão ao longo do corpo analisado. Historicamente as técnicas fotomecânicas de campo completo foram desenvolvidas posteriormente à técnica de fotoelasticidade clássica e, como exemplo, podem ser citadas as técnicas de holografia interferométrica, *speckle* interferométrico, *shearography* e de *moiré*.

A literatura pertinente revela uma série de técnicas sob o nome comum de *métodos de moiré* considerados de fácil aplicação. A técnica de *moiré* é conhecida como hábil em determinar o mapa topográfico de objetos com precisão que pode alcançar até 0,5 μm . Estudos recentes têm empregado tais técnicas no campo da mecânica estrutural, pois permitem gerar mapas qualitativos de distribuição de deformações e tensões, gerando excelentes resultados se comparados com os demais métodos fotomecânicos. As vantagens das técnicas de *moiré* estão associadas à rapidez, necessidade de aparato experimental convencional e de baixo custo, simplicidade no processamento de imagens e aplicação recomendada a qualquer tipo de corpo, independente da forma geométrica do corpo de prova em estudo.

O fenômeno *moiré* ocorre quando duas grades ópticas com certa densidade são superpostas, ocorrendo um movimento relativo entre essas, gerando um conjunto de faixas semelhantes a ondas, com ângulo e período diferenciados das duas grades ópticas iniciais. Esse terceiro grupo de faixas é denominado “franjas de *moiré*” e variam da cor escura, gerada por ondas de interferência destrutiva, até a cor clara total, gerada por ondas de interferência construtiva. O processamento e análise das franjas permite determinar deslocamentos no plano, rotação em relação a eixos de referência, deslocamentos de pontos de uma superfície observada em relação a uma superfície de referência, ou ainda, a inclinação de um corpo em relação ao seu estado de referência.

A literatura concernente a este tema revela a existência de uma série de técnicas de *moiré*, cujas variações estão associadas aos modelos de retículos, à aplicação de grades virtuais, etc. As técnicas de *moiré* mais empregadas são conhecidas como ***moiré de sombra*** ou ***moiré por projeção***. Para o caso da técnica de *moiré* de sombra, aplica-se apenas um retículo, o qual fica fixado em frente ao corpo de prova sendo denominado como **grade de referência**. A passagem da luz projeta sua sombra, o qual é denominado **grade objeto sobre o corpo**. A interação entre essas duas grades gera o padrão de franjas *moiré*. Para o caso do ***moiré por projeção***, quatro grades defasadas de $\frac{1}{4}$ de seu período, é projetada sobre o corpo

de prova. Para o caso de ***moiré por projeção***, a interação entre as grades ocorre através do processamento das imagens por *softwares* específicos. Os programas computacionais aplicados ao processamento dos dados, a saber, Idrisi Kilimanjaro, ImageJ, RisingSun *Moiré* e outros, podem gerar os resultados finais expressos em isolinhas representadas em “curvas de nível” semelhantes à plantas topográficas, em escala de cinza, em escala de cores, em malhas, em matriz, etc.

A associação de técnicas de *moiré* a métodos numéricos e aos conceitos da fotoelasticidade clássica para análise de franjas isoclínicas e isocromáticas expande o horizonte das aplicações dessas técnicas. O arranjo experimental aplicado aos métodos de *moiré* é bastante simples, incluindo uma tela de fundo de cor negra, uma fonte de luz convencional, um conjunto de retículos comercialmente disponíveis, um sistema de aquisição de imagens e uma câmera fotográfica digital. As imagens do corpo de prova sob carregamento, após serem processadas por programas computacionais específicos, irão gerar mapas de deformações na superfície do corpo, bem como a distribuição de tensões, sob solicitações mecânicas usuais, isto é, carregamento uniaxial, flexão, torção, etc. Vários autores comprovam a eficácia do uso das técnicas de *moiré* para qualificação da distribuição de tensões. O próximo passo para consolidação da técnica de *moiré* como técnica fotomecânica para aplicação industrial passa pela quantificação dos resultados de deformação e tensão.

O objetivo deste trabalho de pesquisa é de analisar o uso da técnica de *moiré* para quantificação de tensões em estado plano de deformação. O estudo está associado à validação experimental comparando os resultados experimentais obtidos pela técnica de *moiré* com os resultados obtidos pela técnica de extensometria elétrica e por resultados de simulação computacional, conduzido por um *software* baseado no método dos elementos finitos, para melhor compreensão do fenômeno em estudo.

O presente trabalho se justifica pela oportunidade de se desenvolver a técnica de *moiré* para determinação do campo de distribuição de tensões e deformações. A técnica analisada torna-se atrativa por empregar equipamentos de baixo custo. Para aplicação industrial, necessita de validação quantitativa e qualitativa frente aos métodos mais usuais para mapeamento de tensões. Os resultados poderão gerar novas frentes de pesquisa para uso da técnica de *moiré* como nova ferramenta de ensaio não destrutivo e otimização de projetos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho objetiva analisar o uso da técnica de *moiré de phase-shifting por projeção* para determinar quantitativamente e qualitativamente o mapa de distribuição de deformação total (campo de deslocamento), deformação específica e tensão em elementos sob estado plano de deformação (elementos fletidos).

2.2 Objetivos Específicos

Para obter o mapa de distribuição de tensão pela técnica de *moiré* e analisar sua confiabilidade, há necessidade de se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Determinar os campos de deslocamento (deformação total) de um corpo sob estado de deformação fora do plano pela técnica de *moiré*;
- Calcular a deformação específica e a tensão ao longo do comprimento da viga;
- Validar os resultados obtidos pela técnica de *moiré* comparando-os com os resultados obtidos pela técnica de extensometria elétrica e simulação computacional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

O presente capítulo introduz o estudo da arte das técnicas ópticas interferométricas para ensaios mecânicos não destrutivo de materiais. Esta abordagem explica o fundamento destes fenômenos ópticos. Segue-se um estudo sobre as principais técnicas ópticas de análise de ensaio não destrutivo abordando técnicas baseadas na fotoelasticidade clássica, holografia interferométrica, *speckle* interferométrico e os métodos de *moiré*.

3.2 Fundamentos da mecânica dos meios contínuos

3.2.1 Campo de deslocamento mecânico

O vetor é uma entidade invariante (independente do sistema de coordenadas) caracterizado por três parâmetros escalares em cada sistema: a_i ($i=1,2,3$). Esses componentes podem ser transformados de um sistema de coordenada para outro. Um vetor pode ser considerado como tensor de ordem unitário (PASTOUKHOV e VOORVALD, 1995).

Um objeto que apresenta uma configuração deformada de um material contínuo pode ser usualmente descrito por coordenadas separadas por eixos e representado por um vetor de posição. A Figura 01 mostra o deslocamento de um corpo contínuo, na qual o vetor \vec{u} une os pontos P_0 e P . Este vetor é chamado de vetor deslocamento (MASE, 1970).

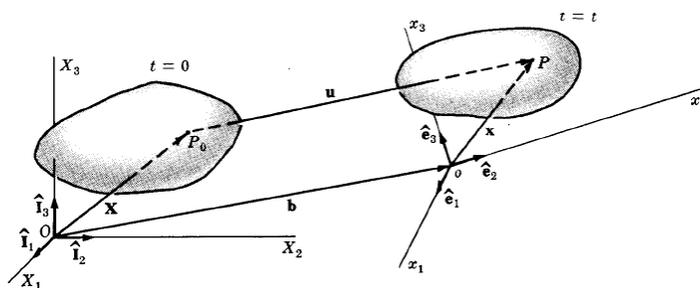


Figura 01. Vetor deslocamento de um ponto P_0 à P . Fonte: (MASE, 1970).

O vetor $\vec{\mathbf{u}}$ denota o deslocamento de um ponto genérico \mathbf{P}_0 de sua posição na configuração inicial para a nova posição \mathbf{P} na configuração deformada. A partir dos deslocamentos, pode-se então calcular as deformações em qualquer ponto da estrutura (FONSECA, 2002).

A transformação do meio contínuo de uma configuração inicial a uma configuração final (deformação) pode ser descrito por um campo de deslocamento e representado por um vetor $\vec{\mathbf{u}}$ (PASTOUKHOV e VOORVALD, 1995). A Figura 02 exemplifica um vetor com deslocamento tri-dimensional.

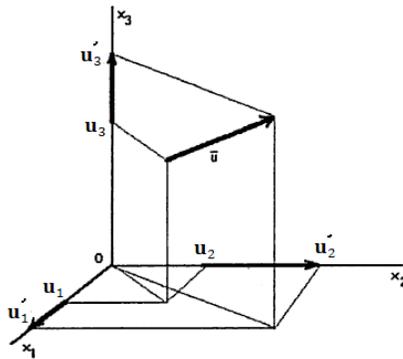


Figura 02. Representação do vetor deslocamento tri-dimensional. Adaptado de: (PASTOUKHOV e VOORVALD, 1995).

O vetor deslocamento tri-dimensional pode ser representado matricialmente por vetores $\vec{\mathbf{u}}_i$ e $\vec{\mathbf{u}}'_i$, compostos pelas coordenadas iniciais e finais do ponto material, respectivamente, como mostra a equação (01).

$$\vec{\mathbf{u}}_i = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{Bmatrix} \quad \vec{\mathbf{u}}'_i = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}'_1 \\ \mathbf{u}'_2 \\ \mathbf{u}'_3 \end{Bmatrix} \quad (01)$$

O campo de deslocamento passa a ser uma atribuição aos vetores de deslocamento para todos os pontos que podem ser deslocados de um ponto a outro. Um vetor de deslocamento especifica a posição de um ponto ou uma partícula na referência a uma origem ou a uma posição precedente. O campo de deslocamento é uma atribuição dos vetores de deslocamento para todos os pontos em um corpo que seja deslocado de um ponto para outro (MASE, 1970). A Figura 03 mostra o campo de deslocamento tri-dimensional de um cubo.

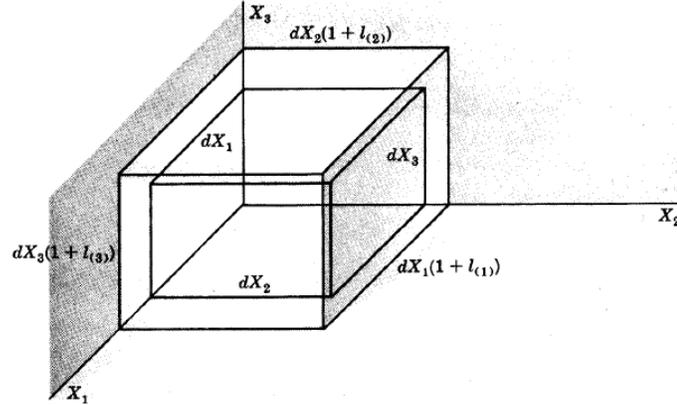


Figura 03. Campo de deslocamento tri-dimensional. Fonte: (MASE, 1970).

3.2.2 Relação campo de deslocamento - tensão.

A determinação do estado de tensão em um corpo submetido à ação de forças é reconhecido como um problema fundamental da teoria de elasticidade. Utiliza-se da equação de compatibilidade para conectar os componentes de deslocamento com os componentes de deformação. Baseado na Lei de Hooke, as condições de deslocamento podem ser transformadas para componentes de tensão (TIMOSHENKO e GOODIER, 1970).

Na teoria da elasticidade linear clássica, assume-se que se o deslocamento e o gradiente de deslocamento forem suficientemente pequenos, não há necessidade de se distinguir entre as descrições Lagrangianas e Eulerianas. Baseado nisso, o vetor de deslocamento \vec{u} é relacionado com o tensor de deformação linear $\epsilon_{1,2}$ através da equação (02) (MASE, 1970).

$$l_{1,2} = \epsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) = \frac{1}{2} (u_{1,2} + u_{2,1}) \quad (02)$$

Contudo, percebe-se que, a partir dos deslocamentos, é possível calcular as deformações em qualquer ponto da estrutura. Chen & Han (1987) afirmam que os componentes de tensão e deformação para o caso tri-dimensional são definidos por dois vetores $\{\sigma\}$ e $\{\epsilon\}$, respectivamente, os quais são dados pelos vetores (03).

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{Bmatrix} \quad (03)$$

As grandezas ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} , ε_{12} , ε_{23} e ε_{13} são chamadas de componentes de deformação específica e são usados para definir o estado de deformação específica no ponto do corpo deformado. Pode ser estabelecida uma relação deslocamento-deformação. Quando o deslocamento é considerado muito pequeno, as equações de deformação específica e deslocamento para elasticidade infinitesimal linear tri-dimensional são relacionados pelas equações (04) a (09) (ODEN, 1967).

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \quad (04)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \quad (05)$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \quad (06)$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \quad (07)$$

$$\varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \quad (08)$$

$$\varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \quad (09)$$

Porém, se as deformações ultrapassarem a ordem de décimo-milésimo, recomenda-se utilizar a elasticidade finita definida pelo tensor deformação de Green (FONSECA, 2002). Nesta, a matriz constitutiva e a equação de deformação-deslocamento estão relacionadas por um operador matricial ∂ , como mostra a equação (10).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial u_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial u_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial u_3} \\ \frac{\partial}{\partial u_2} & \frac{\partial}{\partial u_1} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial u_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial u_1} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial u_3} & \frac{\partial}{\partial u_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Oden (1967) afirma que, para prever o comportamento de uma estrutura, é necessário conhecer as tensões como função dos componentes da deformação e vice-versa. Desta forma, a Lei de Hooke estabelece que seis componentes de tensão devem ser expressas como função linear das seis componentes de deformação. Materiais que apresentem essa relação tensão-deformação são denominados como materiais Hookeanos (ODEN, 1967).

A generalização da Lei de Hooke é expressa por uma equação constitutiva aplicada a sólidos com comportamento elástico linear relacionando os tensores deformação com os tensores tensão (MASE 1970). A equação (10) expressa a Lei de Hooke generalizada.

$$\sigma_{i,j} = C_{i,j,k,m} \epsilon_{k,m} \quad (10)$$

Pastoukhov e Voorvald (1995) consideram dois parâmetros para o estudo de tensão em corpos carregados, a saber, os parâmetros internos e os parâmetros externos. Os principais parâmetros internos introduzidos (vetor deslocamento, tensores deformação e tensores tensão) relacionam-se ao ponto material. A dependência desses das coordenadas iniciais descreve completamente a nova configuração e as forças internas no corpo carregado. Os principais parâmetros externos são as forças volumétricas e superficiais, indicadas pelos campos vetoriais e/ou campos de deslocamento na superfície (ou em parte da superfície) que podem ser conhecidos a partir das condições de carregamento.

A adoção do ponto de vista contínuo como base para descrição matemática do comportamento mecânico significa que grandezas de campo, tais como tensão e deslocamento são expressos como uma função subdividida de espaços contínuos em termos de coordenadas de espaço e tempo (MASE, 1970).

3.3 Métodos experimentais para determinação de tensão

A determinação de tensão em corpos dá suporte à engenharia de projetos. Seus resultados permitem avaliar o comportamento do material quando solicitados por carregamentos mecânicos. A distribuição das tensões é dependente das propriedades mecânicas do material e geometria do corpo. Com a devida definição do campo de distribuição de tensão, o engenheiro pode determinar pontos de maior concentração, i.e., pontos onde podem ocorrer rupturas, e pontos de menor concentração de tensão, onde o profissional pode reduzir o uso de material, diminuindo custo de projeto e peso final do produto (SHAKERIN e JENSEN, 2000).

A bibliografia revela que há diversos modos de se determinar tensão em corpos. Os principais métodos aplicados são métodos numéricos (análise numérica, simulação computacional, etc) e métodos experimentais (extensometria, métodos ópticos) (MAZZETI Filho, 2004).

Mazzeti Filho (2004) explica que os métodos numéricos são pouco didáticos e não apresentam uma relação visível com o fenômeno físico em estudo, possibilitando que pequenos erros ou inconsistências nas propriedades dos materiais ou nas condições de contorno, levem a resultados completamente equivocados.

Gazzola (2011) relata em seu estudo de simulação que, embora seja um método bastante eficiente e seguro, a simulação computacional pode esbarrar na complexidade da natureza do material e/ou na geometria apresentando problemas para a correta simulação e obtenção de resultados conclusivos de tensão.

Ribeiro et al. (2004) afirmam que métodos de medição discreta, como é o caso da extensometria elétrica, tornam difícil a caracterização de um corpo de prova de geometria mais complexa, exigindo muitos pontos de medida e ajuste de funções para caracterizar a distribuição de tensões. Para corrigir essa limitação, recorre-se frequentemente a métodos de análise espacial, como é o caso dos métodos ópticos (RIBEIRO et al., 2004).

Cavaco e Silva (2002) afirma que as técnicas ópticas interferométricas determinam campos de deslocamento, porém, quando combinados com métodos numéricos e modelos matemáticos específicos, se tornam passíveis de determinação local de componente de tensão.

Para essa metodologia de determinação de tensão por campos de deslocamento, dá-se o nome de *modelos híbridos* ou *técnicas híbridas*. As técnicas híbridas associam técnicas de determinação de deslocamento do campo e fotoelasticidade com a teoria da elasticidade e métodos numéricos. Essa metodologia demonstra ser de grande utilidade na quantificação de tensões médias e na determinação de gradiente de tensões (CAVACO e SILVA, 2002). Doyle (2008) afirma que a ciência de experimentos mecânicos tem uma grande tradição no uso de métodos híbridos.

As técnicas ópticas de medições perfilométricas são poderosas ferramentas de avaliação de topografia de componentes mecânicos. Essas técnicas têm sido aplicadas também para estudos com corpos estáticos e mais recentemente impostos a condições dinâmicas de carregamento, tais como a holografia interferométrica, a fotoelasticidade clássica, a interferometria *speckle* e as técnicas de *moiré* (GOMES et al., 2009).

Doyle (2008) analisa as principais técnicas interferométricas para análise de tensões, abordando a fotoelasticidade clássica, as técnicas de *moiré* e a holografia interferométrica, sendo que, essa última também inclui a técnica do *speckle* interferométrico. A fotoelasticidade clássica foi o primeiro método óptico utilizado para determinar o comportamento mecânico de um corpo sob carregamento. Oliveira (1988) relata que a técnica de fotoelasticidade clássica consiste em colar na superfície da amostra, a ser analisada, uma camada de material fotoelástico (Espato da Islândia), com uma cola apropriada produzindo uma superfície reflexiva na interface da amostra. Quando o corpo de prova é carregado, a deformação na superfície é transmitida à camada de material fotoelástico e, através das análises dos fenômenos ópticos que ocorrem no material fotoelástico, pode-se então determinar as tensões/deformações ocorridas na superfície em estudo. Porém, devido aos efeitos de borda, efeitos de acabamento de superfície e perdas de contraste, a qualidade dos dados fotoelásticos pode se tornar mais pobre nas extremidades, precisamente onde seria necessária a determinação desses dados para embutir as condições de contorno (DOYLE, 2008). A Figura 04 mostra como o efeito de borda compromete a análise de tensões pela técnica da fotoelasticidade clássica.

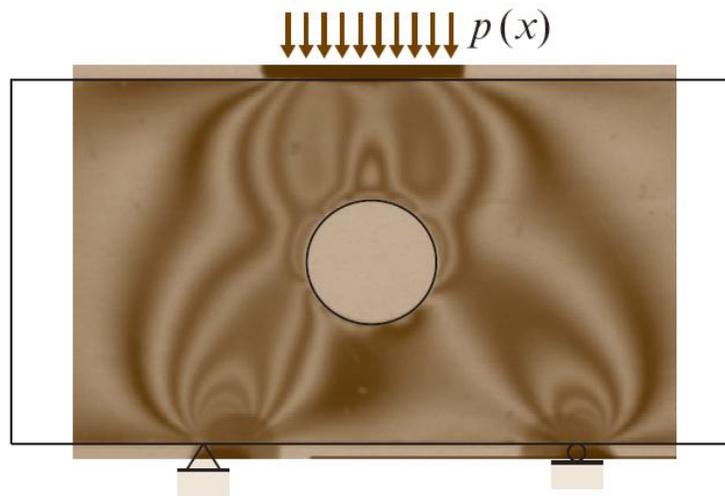


Figura 04. Efeito de borda na análise de tensões pela técnica por fotoelasticidade clássica. Fonte: (DOYLE, 2008).

A holografia de dupla exposição fornece dados diretos do padrão deformado. Porém, essa técnica é altamente sensível ao ponto do contraste das franjas serem facilmente perdidos e, portanto, sua localização acaba se tornando problemática (DOYLE, 2008). A Figura 05 ilustra as franjas padrões em uma placa circular, obtidas através do modelo da técnica de holografia de dupla-exposição.

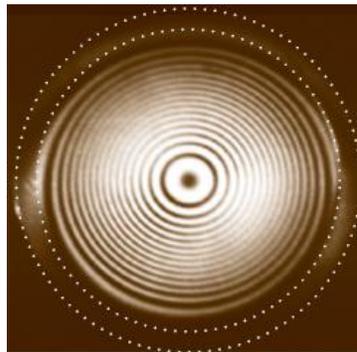


Figura 05. Franjas padrões em uma placa circular obtidas através do modelo da técnica de holografia de dupla-exposição. Fonte: (DOYLE, 2008)..

A metodologia de *moiré* gera de forma objetiva o campo de deslocamentos sobre todo o campo completo, sem sofrer influência dos efeitos de borda, porém, as técnicas de *moiré* apresentam a desvantagem dos dados de franja ter de ser espacialmente diferenciados para fornecer as deformações e conseqüentemente as tensões (DOYLE, 2008). A Figura 06.a ilustra

um ensaio de carregamento pontual de compressão em uma placa gerando franjas de *moiré* deslocadas após o carregamento, enquanto que a Figura 06.b exibe as franjas de *moiré* formadas sobre o corpo, em momento anterior ao carregamento.

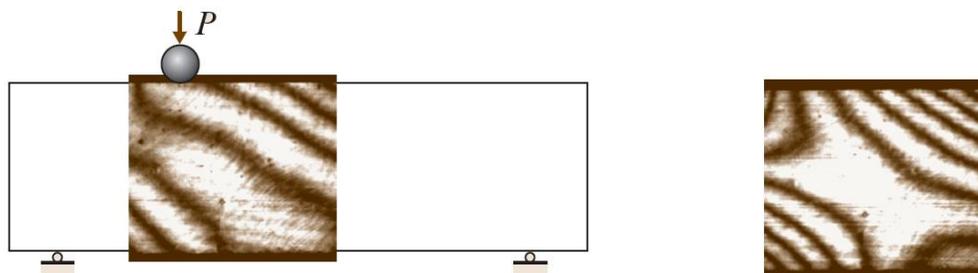


Figura 06. Franjas por *moiré* com: a) corpo carregado. b) corpo descarregado. Fonte: (DOYLE, 2008).

3.4 A Fenomenologia *Moiré*

O fenômeno de *moiré* é a formação de franjas resultante da combinação de grades reticulares (ou retículos, como é comumente chamado) superpostas e tem sua posição relativa deslocada (LINO, 2008).

Os retículos, ou grades, são formados por faixas claras e escuras alternadas entre si, paralelas e equidistantes (GAZZOLA, 2011). Lino (2002) define que o retículo é denominado grade “Ronchi”, e que a distância entre o centro das faixas claras e escuras é chamado de linhas de grade (d), e a distância entre os centros de linha de grade de duas faixas escuras (ou claras) contínuas é denominado como período ou passo (p) de grade do retículo. Lino (2002) também define que o inverso do período é a frequência do retículo (f), geralmente dado em linhas por milímetro. A Figura 07 ilustra a definição dos termos de grade mostrada por Lino (2002).



Figura 07. Definição dos termos de grade com relação a: a) Linha de grade e b) Passo de grade. Fonte: (GAZZOLA, 2011).

Os formatos das linhas de grade podem ser apresentados de diversos modos, Mazzeti Filho (2004) ilustra os principais retículos utilizados para a geração de franjas pela técnica de *moiré*. As grades podem ser formadas por linhas paralelas, pontos equidistantes (ou “em cruz” como também são habitualmente denominados), círculos equidistantes e linhas radiais. A definição do tipo de grade a ser utilizada deverá estar de acordo com o tipo de estudo a ser realizado. A Figura 08 exibe os principais tipos de grades para geração de franjas de *moiré*.

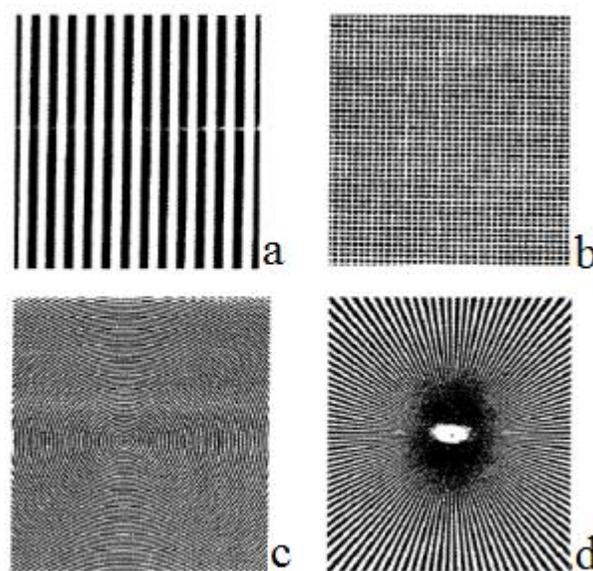


Figura 08. Grades ópticas para a geração das franjas de *moiré*. a) linhas paralelas; b) pontos equidistantes; c) círculos equidistantes; d) linhas radiais. Fonte: (DURELLI e PARKS, 1970, citado por MAZZETI Filho, 2004).

O fenômeno de *moiré* ocorre quando duas grades de linhas com certa densidade são superpostas e tem sua posição relativa deslocada, produzindo ondas padrão, denominadas franjas de *moiré*. De uma forma mais simples, pode-se dizer que o movimento relativo entre as duas grades gera uma terceira faixa semelhante a ondas e com ângulo e período diferenciados das duas telas que geraram o fenômeno. O terceiro grupo de faixas formado é denominado “padrões de *moiré*” ou “franjas padrão” e variam da cor escura (opaca) gerada por ondas de interferência destrutiva até a cor clara total provocada por ondas de interferência construtiva (SCIAMARELLA, 1982; APUD LINO e DAL FABRO, 2004). A Figura 09 ilustra a fenomenologia de *moiré* e a formação de franjas de *moiré* quando as grades são sobrepostas.

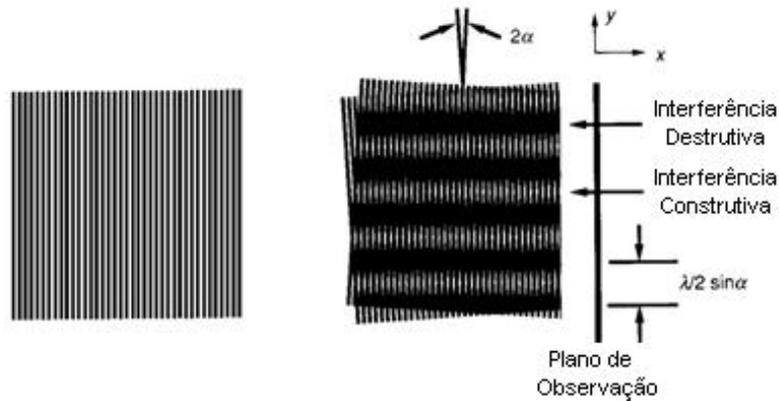


Figura 09. Sobreposição de grades e a formação de franjas claras e escuras. Fonte: (BUYTAERT e DIRCKX, 2008).

Lino (2002) também enfatiza que, quando essa sobreposição ocorre formando um pequeno ângulo de intersecção entre as linhas dos dois retículos, pequenos deslocamentos em um dos dois retículos provocarão grandes deslocamentos nas franjas de *moiré*, ou seja, haverá um movimento magnificador na formação de franjas, isto é, o período das franjas será diferenciado do período da grade. A Figura 10 exhibe o esquema de sobreposição de duas grades e o comportamento da formação das franjas.



Figura 10. Sobreposição de grades e formação de franjas de *moiré*. Fonte: (BUYTAERT e DIRCKX, 2008).

Porém, para que o fenômeno de *moiré* seja gerado, nem sempre há a necessidade da superposição de duas grades em contato direto onde ocorre uma formação de franjas. Chiang (1979) explica que, na fenomenologia *moiré*, a superposição das grades de referência e do corpo de prova é feito de maneira indireta, através da superposição de imagens. Logo, esse

fenômeno pode ser tratado como caso de interferência óptica. Post et al., (1994) completam afirmando que, a interferometria de *moiré* combina os conceitos e técnicas do *moiré* geométrico e de óptica interferométrica, podendo então ser tratado como caso de interferência óptica.

A metodologia de formação das franjas abre um leque de opções de técnicas de *moiré*, entre as quais, podem ser citados o ***moiré de sombra***, ***moiré por projeção de grades***, ***moiré por phase-shifting*** e ***de reflexão***. Mazzeti Filho (2004) explica que as franjas podem ser obtidas por projeção de grades, onde o retículo do modelo é obtido através da projeção oblíqua do retículo de referência sobre a superfície do objeto. Nos métodos de *moiré* de reflexão, o retículo do modelo se identifica com a imagem de um retículo visto através da imagem reflexiva do objeto. Em ambos os casos, a formação das franjas é gerada através da dupla exposição fotográfica ou sobreposição de imagens digitalizadas. Na técnica de *moiré* por *phase-shifting*, a grade é deslocada em 90°, sendo as franjas geradas por processamento das imagens. A técnica de ***moiré de sombra*** é outro método bastante difundido, onde o retículo do modelo é a própria sombra do retículo de referência ao qual é projetada sobre a superfície do objeto em estudo, porém, neste caso, a visualização das franjas é direta, sem a necessidade de sobreposição de imagens. Para todos os casos acima relatados, as franjas formadas correspondem a levantamentos topográficos. Vale ressaltar que as franjas para análise do campo de deslocamento são geradas através da subtração das imagens antes e após a deformação do objeto.

3.5 Técnicas de Moiré (TM)

Chiang (1979) afirma que os métodos de *moiré* compreendem um grupo de técnicas os quais utilizam a fenomenologia *moiré* como o elemento medidor. A TM consiste em gerar padrões de interferência através da projeção de uma grade sob a superfície do corpo. Segundo Gazzola et al. (2008a), as formas de formação e/ou projeção das grades derivam as diversas técnicas de *moiré* atualmente conhecidas. Lino (2002) relata que várias tentativas de classificação das TM foram realizadas por vários autores, levando em consideração o período do retículo, a formação de franjas e o tipo de deformação estudada. Uma das formas de

classificação das TM apresentada por Ajovalasit (1998) adota como parâmetro o estudo da deformação. A classificação das TM pelo parâmetro do estudo de deformação está dividido em cinco grupos, tal como se seguem:

Moiré geométrico plano – Fornece deslocamento bi-dimensional do objeto. Esse método é considerado de baixa sensibilidade.

Moiré interferométrico – Fornece o deslocamento bi-dimensional do objeto. Post et al. (1994) afirma que o *moiré* interferométrico combina os conceitos de *moiré* geométrico com óptica interferométrica; por isso que, com essa TM, pode-se obter medidas de deslocamento no plano com alta sensibilidade. Logo, a técnica de *moiré* interferométrico é considerado uma TM de alta sensibilidade.

Moiré holográfico – Willemann (2002) explica que a holografia está baseada na incidência de uma luz laser sobre uma superfície. As ondas refletidas se espalham no espaço e, ao incidirem em um determinado anteparo, formam um padrão de interferência granular, mostrando vários pontos claros e escuros aleatoriamente distribuídos. Os grânulos recebem o nome de *speckle*. A interferência das ondas forma a terceira grade de cores claras e escuras. Por empregar laser, a sensibilidade do processo é muito grande, da ordem de 0,6 μm . Outro fator que deve ser destacado é a iluminação do objeto, ao qual pode ser feita com uma fonte de luz (iluminação simples) ou duas fontes (iluminação dupla).

Moiré por reflexão – Aplicado para testes de torção, onde as grades fornecem os ângulos de rotação bi-dimensional no eixo X e no eixo Y (LINO, 2002).

Moiré de sombra ou de projeção – É o método que fornece a linha de nível do componente analisado com respeito ao retículo de referência (LINO, 2002).

Costa (2006) afirma que, há várias maneiras de se reproduzir a fenomenologia *moiré* podendo se destacar a técnica de *moiré* de sombra e a técnica *moiré* por *phase-shifting*. Affonso et al. (2005) também afirmam que, para esses dois tipos de técnica de *moiré* aplicada,

o arranjo experimental para a realização dos ensaios requer o uso de câmera digital, fonte de luz e retículo.

Para o caso da técnica de *moiré* de sombra, o retículo se identifica como uma grade Ronchi composta de faixas claras e escuras. Hertz et al. (2005) explicam que a franja de *moiré* seria o resultante óptico da interferência de um retículo de referência e das sombras por ele criadas sobre o corpo em observação. A física óptica explica que um feixe de luz ao atravessar uma tela de interferência produz um efeito de sombras em função da profundidade do alvo, isto é, a própria sombra da grade projetada no objeto, interagindo com a grade de projeção, gera o fenômeno. O método de *moiré* de sombra utiliza apenas uma grade com retículo de referência, perpendicular à direção de captura da câmera fotográfica e oblíqua à fonte de luz. Hertz et al. (2005) atenta para o fato de que, para se produzir uma imagem definida, necessita-se que o ambiente seja escuro, com o objetivo de minimizar qualquer reflexo do meio. Coelho e Tavares (2003) completam afirmando que o retículo deve estar tão próximo quanto seja possível do corpo, além de estar cobrindo toda sua extensão. Segundo Moore e Truax (1979, citado por MAZZETI Filho, 2004), a precisão da técnica de *moiré* de sombra é de no máximo 1/10 do período da franja de *moiré* gerada, porém, esses mesmo autores desenvolveram um método chamado “*phase-locked*” o qual eleva a precisão para 1/20 do período da franja gerada.

Outro método de geração de franjas desloca as grades de 90°, projetando-as separadamente sobre o objeto, diretamente, através de um projetor de multimídia. Essa técnica é conhecida como *moiré* de *Phase-Shifting*. Lino (2002) cita que esse ensaio necessita da projeção de 3 ou 4 imagens, com pequenos deslocamentos das franjas entre si, para obter os mapas de fase e a superfície de contorno dos objetos estudados. Essa mudança de fase da grade pode ser feita com retículos de linhas paralelas ou também por grades sinusoidais, ambas deslocadas de 90° entre si. As Figuras 11 e 12 exibem as grades empregadas em testes *moiré* de *phase-shifting* por retículo e por grades sinusoidais.

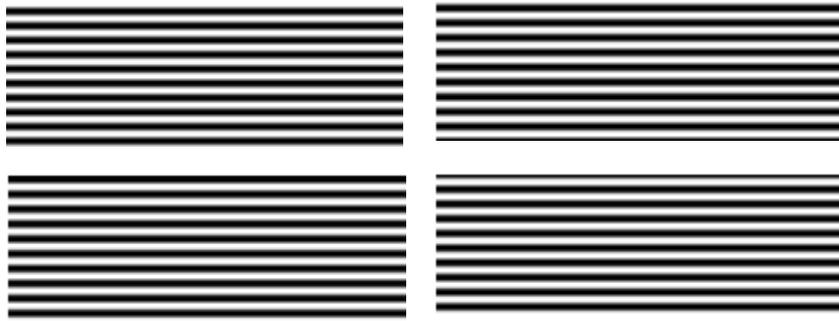


Figura 11. Grades de linhas paralelas para *moiré* por *phase-shifting* por retículos, deslocadas de 90° entre si.

Fonte: (LINO, 2008).

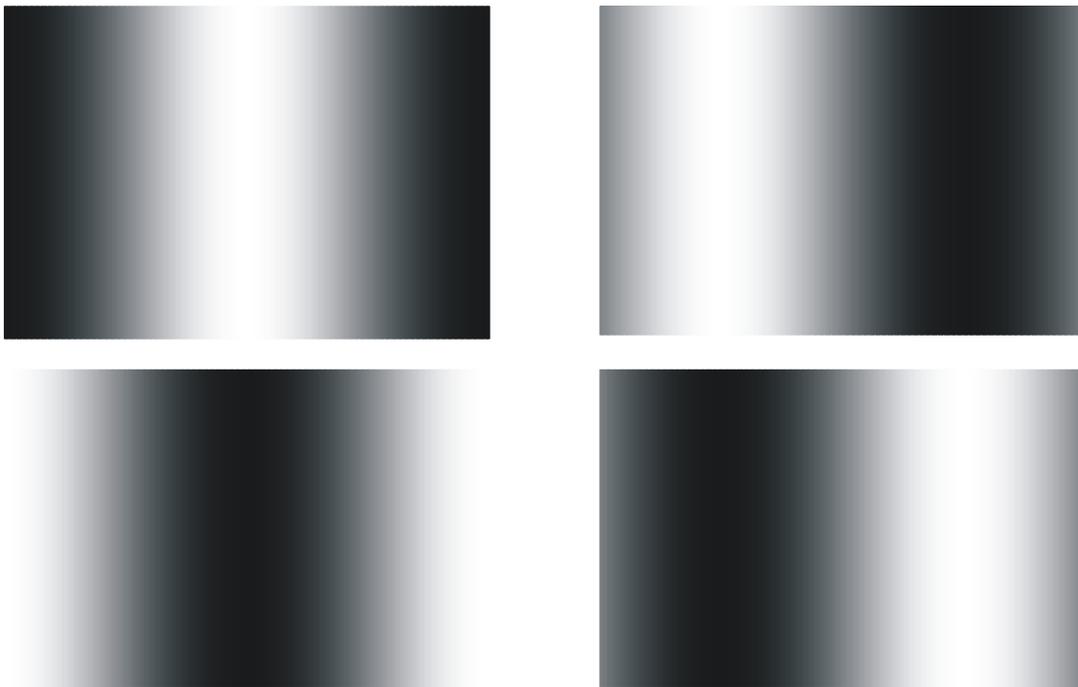


Figura 12. Grade sinusoidal para *moiré* por *phase-shifting* deslocadas de 90° entre si. Fonte: (GAZZOLA et al., 2008-b).

A técnica de *phase-shifting* por projeção de grades reticulares consiste em projetar a grade no corpo através da fonte de luz. Essa técnica é utilizada para corpos de formato contínuo, como cubos, frutos, etc. O retículo projetado tem um comportamento de ondas quadradas variando em cores escuras (preto) e claras (branca). Diferentemente da técnica de

moiré de sombra, a técnica de projeção não permite a visualização das franjas e sua acurácia é menor, devido à resolução do projetor e da câmera digital (LINO, 2008). A técnica de *phase-shifting* com grade sinusoidal também consiste em projetar a grade sobre o corpo através da fonte de luz. Essa técnica é utilizada para corpos descontínuos, como plantas, corpos distintos, etc. O retículo projetado apresenta um comportamento de ondas senoidais variando em cores escuras (preto), cores claras (branca) e cores intermediárias (GAZZOLA et al. 2008-a).

3.6 Uso das TM para análise de tensões

O efeito *moiré*, resultante da interferência geométrica entre duas ou mais grades de amplitudes sobrepostas, geram padrões de linhas mais largas e escuras, as quais são designadas por franjas de *moiré* e estão relacionadas com a deformação do objeto (RIBEIRO et al., 2004).

As técnicas de *moiré* fornecem informações de deslocamento sobre o campo completo, porém, sofre a desvantagem de os dados de franja ser espacialmente diferenciados para fornecer resultados de deformações específicas e subsequencialmente gerarem os dados de tensões (DOYLE, 2008).

As técnicas de *moiré* mostram-se favoráveis no que diz respeito à versatilidade, agilidade e facilidade de coleta de dados. Além disso, oferecem relativa confiabilidade e, principalmente, por não exigirem o contato com o corpo em estudo (GOMES et al., 2009).

A teoria básica de *moiré* é fácil de ser entendida e aplicada. Wolfe et al. (1994) afirmam que a superposição de franjas, explicada anteriormente, quando sofrem qualquer tipo de distorção (ativa/corpo de prova) relativa ao outro analisador resultará em mudanças nas franjas padrões e que podem ser usadas para assessorar tanto a localização como a magnitude da deformação na superfície.

Mazzeti Filho (2004) afirma que “nos últimos anos, com relação às técnicas de *moiré*, muita ênfase foi dada à sobreposição de retículos, aquisição, tratamento e análise das imagens”. Neste passo, um grande caminho de estudo foi aberto para o uso de técnicas ópticas para análise do campo de tensão e deformação.

Diversos trabalhos utilizando técnicas de *moiré* foram desenvolvidos sempre com resultados satisfatórios. Entre esses, alguns são mencionados a seguir.

Albiero et al. (2007) utilizaram a técnica de *moiré* de sombra para determinar o mapa de isodeformações em corpos de prova de bambu sob carregamento de compressão. O tratamento da imagem revela diferenças entre as tonalidades de pixels antes e após o carregamento aplicado, de tal forma que a subtração desses gera um terceiro pixel de valor qualitativo (grande ou pequena deformação) referente à região deformada (Figura 13). Os sinais algébricos (+ ou -) foram interpretados, de acordo com a natureza do carregamento aplicado, como sendo regiões de maior ou menor intensidade de deformação. Portanto, considera-se que as imagens, após um adequado processamento podem gerar mapas de isodeformações, sendo possível fazer uma inferência da distribuição de tensões, apenas de maneira qualitativa, sobre o corpo de prova de bambu da espécie *Guadua angustifolia* (ALBIERO et al., 2007).

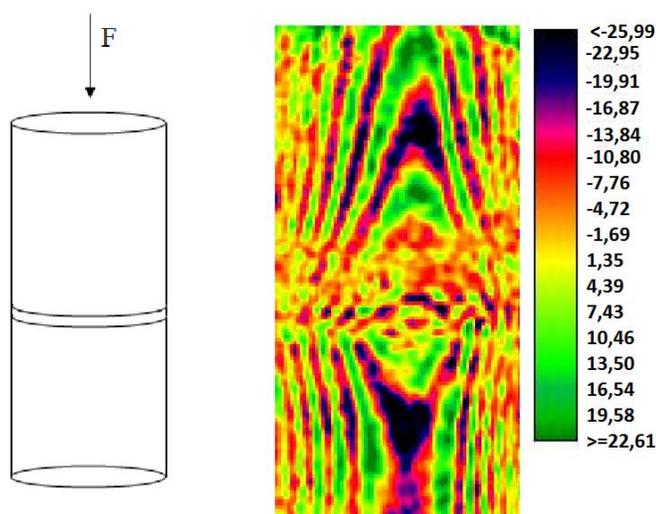


Figura 13. Mapa de isodeformações em Bambu (*Guadua angustifolia*). Fonte: adaptado de Albiero et al. 2007.

Bastos et al. (2004) afirmam que para a caracterização do campo de tensões residuais, geralmente utiliza-se a técnica de *moiré* e, particularmente, à interferometria de *moiré*. Nesta técnica se fez a replicação de uma grade com determinada frequência sobre a superfície do objeto, numa primeira fase, em seguida, a grade óptica é deformada no mesmo passo em que o objeto também é deformado. Com base nessa deformação da grade, pode-se caracterizar o campo de tensões residuais existentes, utilizando-se de técnicas de processamento e análise de imagens (BASTOS et al., 2004).

Gomes et al. (2009) analisaram a deformação de uma lâmina de aço através da técnica de *phase-shifting*. Nesse trabalho, foi realizada primariamente uma calibração da TM mantendo uma relação de mm/pixel. Em uma segunda etapa, a lâmina de aço foi comprimida provocando uma flambagem no elemento. O tratamento de imagem foi levado a cabo através do *software Idea*, sendo que a precisão da deformação se encontra na casa de centésimos de milímetros.

Gazzola (2011) utilizando *softwares* específicos para tratamento de imagens, logrou, por meio de tratamento de imagens obter a análise da distribuição de tensões, de forma qualitativa, em corpos de prova de geometria simples tanto quanto complexas. Esse tratamento computacional de imagens permitiu que as franjas de *moiré* pudessem ser utilizadas na análise de campo de tensões em vigas com carregamento fletor através de um modelo híbrido. O processamento gerou franjas padrões derivadas da combinação das franjas de *moiré* e, sequencialmente o processamento gerou as franjas isocromáticas e isoclínicas. A aplicação dos fundamentos da fotoelasticidade clássica relacionada à análise das franjas isoclínicas e isocromáticas permitiram a determinação de distribuição de tensão no corpo de prova de forma qualitativa. O resultado deste estudo mostrou que a técnica utilizada obteve alta fidelidade na descrição dos resultados qualitativos quando comparados com resultados obtidos por simulações computacionais, bem como, a comparação feita com resultados teóricos.

Ribeiro et al. (2004) apresentaram um trabalho de aplicação da técnica de *moiré* geométrico associado a um processamento de imagem com o intuito de obter a medição do campo de tensões. Nesse trabalho, uma barra de metal de espessura fina, simulou um estado plano de tensão com o corpo de prova submetida à tração. Uma grade foi colada ao corpo e a diferença entre as grades do corpo antes e após o carregamento foi analisado. Foram ensaiadas grades de linhas paralelas e pontos equidistantes. O resultado do campo de deslocamento foi comparado com o campo de tensões obtido por simulação computacional através do *software Ansys 7.0*. O referido autor ressaltou em seu estudo que a análise só alcançou êxito empregando-se grandes deformações. Os resultados mostraram diferenças entre o campo de deslocamento obtido em relação à simulação computacional. Foi concluído ao final que as técnicas de *moiré* geométrico revelaram-se bem adaptadas à medição dos campos de deslocamento. As Figuras 14.a e 14.b mostram os campos de deslocamento gerados pela técnica de *moiré* geométrico para as direções vertical e horizontal, respectivamente.

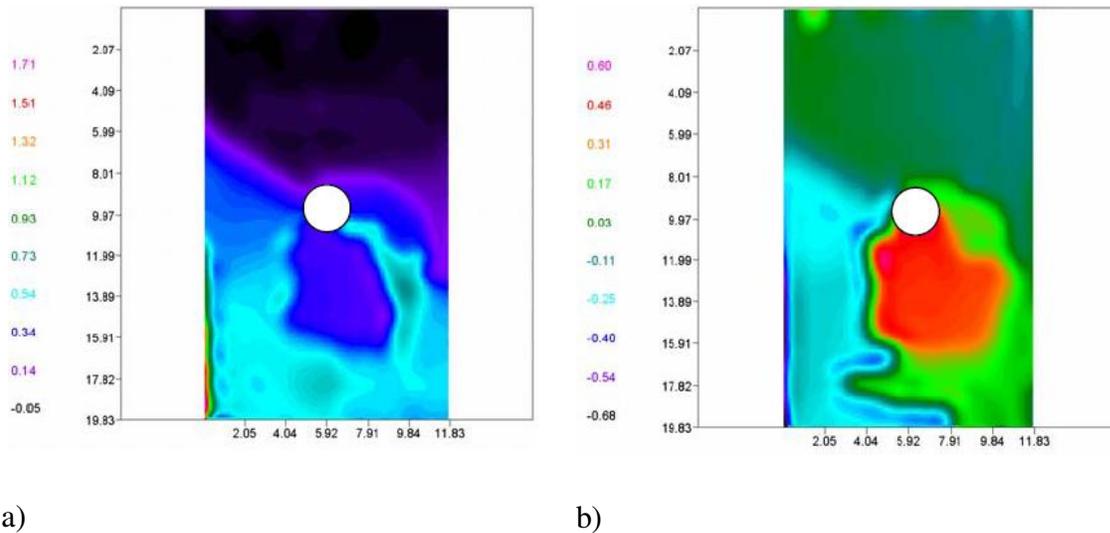


Figura 14.a. Campo de deslocamento: a) vertical. b) horizontal. Fonte: (RIBEIRO et al. 2004).

3.7 Cálculo de deslocamento e deformação pela técnica de *moiré*

Como foi descrito acima, a técnica de *moiré* quantifica deslocamentos, ou seja, a técnica não oferece diretamente dados de deformação e tensão. Cavaco e Silva (2002) explicam que campos de deslocamentos gerados experimentalmente são combinados com métodos numéricos e modelos matemáticos específicos, através do uso das equações constitutivas do material, para a determinação local de componentes de tensão. Como explicitado anteriormente, no Capítulo 3.5 por Mazzeti Filho (2004) e Affonso (2011), os trabalhos de pesquisa desses autores mostraram uma metodologia nos quais quantificaram deslocamentos pela técnica de *moiré*. Affonso (2011) também obteve as deformações do corpo de prova baseado nas informações do campo de deslocamento por meio de cálculo numérico.

3.7.1 Determinação de Deslocamento e Deformação

Gomes (2005) afirma que a determinação do deslocamento (Z) para carregamentos fora do plano é obtida através da determinação de cotas de nível, ou seja, da distância fora do plano

entre as franjas. As equações (15) à (18) são utilizadas no cálculo do momento de inércia (I), do carregamento (P) e do momento fletor (M) e deformação específica para o caso de uma viga bi-engastada com carregamento aplicado em seu vão central.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (15)$$

$$P = \frac{192EIZ}{L^3} \quad (16)$$

$$M = \frac{PL}{8} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{My}{EI} \quad (18)$$

3.8 Metodologia Híbrida

O método de quantificação de tensão está bem descrito por Doyle (2.008). Para desenvolver a metodologia de solução híbrida, deve-se primeiro entender e definir o problema em questão. Há duas categorias a serem analisadas: “Parâmetros de Força” e “Parâmetros de Caracterização”.

Os parâmetros de força estão relacionados com os dados de entrada. Os dados de entrada do problema podem ser classificados como direto ou indireto. Para entender como classificá-los adequadamente, segue o exemplo a seguir. Considere-se um sistema de aplicação de carga, descrito pela equação (19).

$$\{P\} = [K].\{u\} \quad (19)$$

Nesse sistema, o vetor de carregamento aplicado {P} e a matriz de rigidez [K] do material são conhecidos e o vetor de deslocamento {u} é desconhecido. Nesse caso, a equação direta é descrita pela equação (20). Esse é um caso típico de problemas de solução direta, onde o sistema e os dados de entrada são conhecidos e somente a resposta é desconhecida.

$$\{u\} = [K]^{-1} \cdot \{P\} \quad (20)$$

$$\{Resposta\} = [Sistema] \cdot \{DadosdeEntrada\}$$

No problema inverso, o sistema ou os dados de entrada são desconhecidos, porém, podem ser inferidos pelo uso de algumas informações de respostas obtidas. Um exemplo clássico de problema inverso para fácil entendimento é descrito por Doyle (2008) como a medida de carregamento (dado de entrada) e deformação (resposta) em um ensaio uniaxial para inferir o módulo de Young (sistema).

Assim sendo, fica definido que problemas diretos são aqueles pelo qual o sistema é conhecido, os dados de entrada são conhecidos e somente a resposta é desconhecida. Problemas inversos são aqueles que algo sobre o sistema ou o dado de entrada é desconhecido e o conhecimento de algo sobre a resposta é necessitada para atingir uma efetiva solução. Assim, o ingrediente chave para a solução de problemas inversos é o uso de dados de resposta e, desde já, conectá-los aos métodos experimentais.

Os parâmetros de caracterização determinam dois grupos de classificação: “completamente especificado” ou “parcialmente especificado”. Problema completamente especificado é aquele onde todas as informações do material (propriedades mecânicas), geometria, condições de contorno e carregamentos são conhecidos e os deslocamentos e as tensões são requeridas. Já no caso dos problemas parcialmente definidos, uma das informações não é conhecida no sistema, além do que quer se determinar.

As quantidades de interesse a serem determinados pelo método usual de análises híbridas, tal como distribuição de tensão e deformação, não podem ser considerados elementos desconhecidos, uma vez que o problema é completamente especificado, estes podem ser obtidos através de uma operação de pós-processamento no modelo.

Outra condição importante de se determinar é se o sistema analisado exibe “condição viciada”. Na condição viciada, mesmo que os resultados apresentem excelente concordância com o modelo, podem ocorrer distorções entre resultados qualitativos e quantitativos. Quando isso ocorre, é considerado que o sistema apresenta uma “Condição Viciada”. Para entender melhor, é admitido que certo erro de medida seja δ e que a variação dos resultados seja Δ , logo a amplificação dos erros é dado pela relação δ/Δ . Portanto, quanto maior for o Δ (mas não nulo), pequenas mudanças geram erros de medida que podem provocar grandes mudanças nos

resultados obtidos. A condição viciada é uma propriedade do sistema e não dos dados, porém, os erros nos dados são manifestações da condição viciada. A Figura 15 exibe um gráfico de respostas de um sistema com condição viciada.

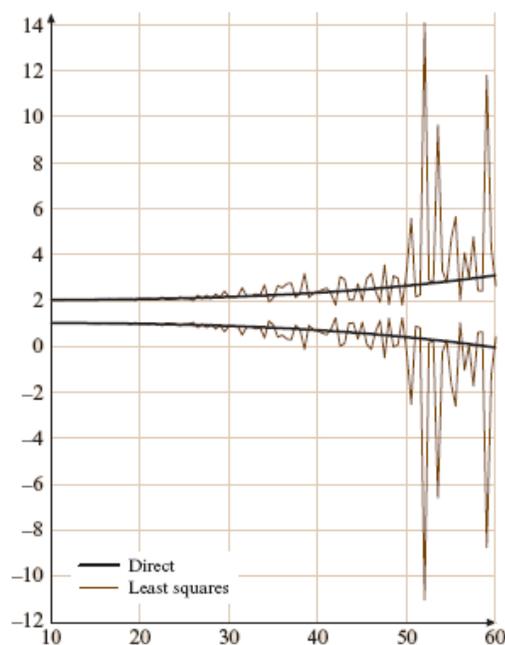


Figura 15. Gráfico de sistema com condição viciada. Fonte: (DOYLE, 2008)

3.9 Quantificação de Tensão

Doyle (2008) mostra como funciona a metodologia híbrida, a qual permite associar técnicas ópticas interferométricas com resultados quantitativos para análise de distribuição de tensão e deformação. Neste ítem é apresentada uma metodologia associando os dados experimentais com análise computacional dos dados obtidos para se gerar o mapa de distribuição de tensão qualitativo e quantitativo.

De acordo com Doyle (2004), a metodologia híbrida procura aliar os resultados experimentais aos cálculos matemáticos. Para determinar as tensões no plano, é necessário então que se defina o sistema a ser trabalhado. A equação (21) determina o campo de tensão em função da deformação. A matriz $[D]$ é uma matriz característica das propriedades mecânicas do corpo de prova, baseada na Lei de Hooke.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (21)$$

Quando o corpo apresenta um comprimento muito maior que largura e a espessura, a equação (18) determina a tensão para o estado unidimensional com maior precisão. Porém, quando a relação do comprimento em relação às outras dimensões não forem tão maiores, a determinação de tensão pode tomar tensões induzidas em dois planos ou mais; assim, a matriz característica [D] assume coeficientes específicos, conforme explica Assan (2003).

3.9.1 Quantificação de Tensões Fora do Plano (Estado Plano de Deformação).

Assan (2003) explica que problemas envolvendo corpos cuja geometria e estado de carregamento não mudam muito ao longo de seu eixo longitudinal são referidos como estado plano de deformação. Nesse caso, para quantificar as tensões fora do plano, deve-se aplicar uma carga onde os deslocamentos estejam concentrados na direção X_2 e nulos nas seções transversais. Exemplos clássicos de estado plano de deformação podem ser citados, como muros de arrimo, barragens, viga longa sobre base elástica, etc. A Figura 16 mostra o estado plano de deformação.

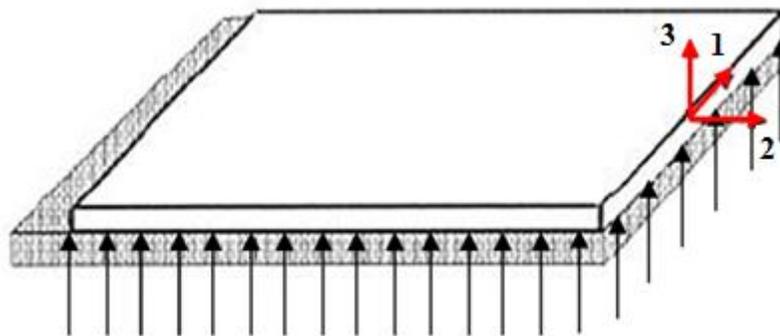


Figura 16. Exemplo de corpo de prova em estado plano de deformação: Fonte: (ASSAN, 2003).

Para o caso do estado plano de deformação, a matriz característica [D] do sistema para o cálculo do estado plano de deformações (Figura 17).

$$D = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & (1 - 2\nu)/2 \end{bmatrix}$$

Figura 17. Matriz Característica para o estado plano de deformações. Fonte: (ASSAN, 2003).

Logo, substituindo a matriz características [D] na equação (21), a equação constitutiva do plano de tensões é dada pela equação (22).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & (1 - 2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

Com os dados de cada franja, obtidos por *moiré*, obviamente cada franja representará um campo de deslocamento e, por conseguinte, a distribuição ao longo do corpo, ou seja, serão feitas simulações considerando cada franja uma simulação determinando tensões e, logo após, o programa computacional irá definir para cada franja uma coloração e uma escala de cores associada a esta.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia para os ensaios experimentais incluídos neste trabalho de pesquisa. O planejamento deste trabalho foi dividido em duas partes distintas. A primeira parte aborda o ensaio fotomecânico de *moiré*, bem como a quantificação de deformação e tensão através dos conceitos baseado na metodologia híbrida. A segunda parte rege os ensaios experimentais de validação realizados por extensometria elétrica e simulação computacional por elementos finitos. Os resultados dos ensaios de validação foram tomados para efeito de comparação com os resultados obtidos pela técnica fotomecânica de *moiré* para uma criteriosa análise da confiabilidade dos resultados que a técnica fornece.

4.1 Ensaio de Carregamento

Para este trabalho de pesquisa, a deformação fora do plano foi ocasionada por ensaios de flexão. Os corpos de prova foram confeccionados utilizando aço 1020. Os dados de propriedade mecânica foi fornecido pelo fabricante sendo o módulo de elasticidade “E” de 200 GPa e coeficiente de Poisson “ ν ” de 0,29. As dimensões do corpo de prova foi determinado segundo a norma ASTM E855 08/2.009 - Teste Método B – referente à ensaios de flexão em materiais metálicos com três pontos de aplicação de carga (dois pontos de apoio e um ponto de carregamento concentrado). A norma ASTM E855 - 08 define que o formato do corpo de prova deva apresentar área de seção retangular e sem variação dimensional, isto é, o corpo de prova não deve apresentar raios de concordância. A espessura (e) do corpo de prova deve variar no mínimo de 0,25 mm e no máximo 1,3 mm. A largura e a altura do corpo de prova são determinadas em função da espessura do corpo de prova. A Tabela 01 demonstra as relações estabelecidas pela norma.

Tabela 01. Relações dimensionais de corpos de prova para ensaios de flexão. Fonte: (ASTM E855-08/2009).

Dimensão do material	Espessura do material [mm]	Relações dimensionais [mm]
Comprimento Útil (L_0)	$0,25 \leq e \leq 0,51$	$L_0 = 150e$
	$e > 0,51$	$L_0 = 100e$
Comprimento Total (L_t)	$0,25 \leq e \leq 0,51$	$L_t = 250e$
	$e > 0,51$	$L_t = 165e$
Largura (b)	$0,25 \leq e \leq 0,51$	$b = 3,81$
	$e > 0,51$	$b = 12,70$

Como tolerância geométrica, a norma define que a variação média da espessura (e) do corpo de prova deve ser de no máximo 2% da espessura nominal. Com relação à largura, a variação não pode ultrapassar 0,2% ao longo do comprimento total do corpo de prova. As medidas devem ser tomadas nas bordas e em sua meia altura para verificar a tolerância.

De acordo com a norma ASTM, a altura útil para determinação do comportamento mecânico deve ser de 100 mm. Portanto, para ensaios de carregamento, o corpo de prova foi engastado nas extremidades do comprimento útil, deixando livre esta altura determinada. A Figura 18 ilustra o corpo de prova utilizado nos ensaios experimentais.

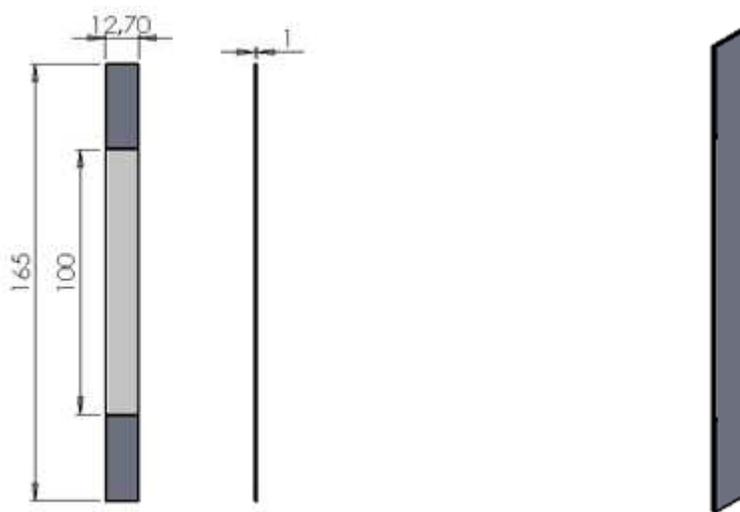


Figura 18. a) Vista frontal e lateral do corpo de prova com suas respectivas dimensões em unidades de milímetros. b) Vista isométrica do corpo de prova.

Os ensaios de carregamento fletor foram conduzidos no Laboratório de Óptica da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP/SP, em Campinas. A temperatura do ar no horário do ensaio experimental foi de aproximadamente 25 °C.

Para atender às necessidades exigidas pelo ensaio fotomecânico, foi desenvolvido um dispositivo especial para carregamento fletor, de maneira que a face de análise pudesse permanecer posicionada na direção vertical e frontalmente para a câmera digital, conforme ilustrado pela Figura 19.a. O carregamento aplicado no corpo de prova foi controlado pelo deslocamento (flecha) do corpo de prova. Para medir o deslocamento do corpo de prova, foi utilizado um relógio comparador digital da marca Mitutoyo Modelo 543-682 com deslocamento máximo para medição de 12,7 mm e precisão de 0,01 mm (Figura 19.b).

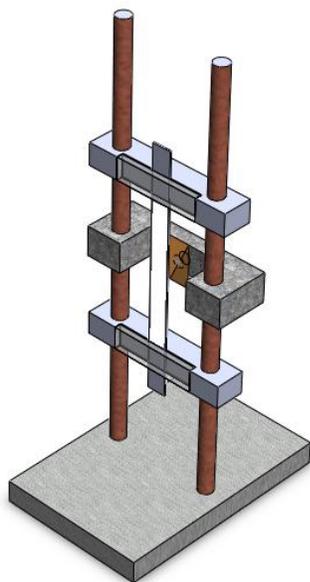


Figura 19.a. Dispositivo mecânico para carregamento fletor.



Figura 19.b. Relógio Comparador Digital.

Cinco estágios de carregamento foram adotados para serem aplicadas sobre o corpo de prova, produzindo deslocamentos de [0,5 mm], [1,0 mm], [1,5 mm], [2,0 mm], [2,5 mm]. Para controlar o deslocamento do corpo de prova, o relógio comparador, ao qual esteve preso por

um suporte metálico, teve sua ponta metálica posicionada justamente na face frontal, onde a grade foi projetada e na mesma altura onde o carregamento fletor foi aplicado.

4.2 Ensaio Fotomecânico pela Técnica Óptica de *Moiré* por *phase-shifting*

O arranjo experimental de *moiré* por *phase-shifting* incluiu o uso de uma câmera digital Samsung 6.4 Mega Pixels para captação e registro das imagens com controle remoto, para evitar qualquer tipo de deslocamento da área captada. Um projetor multimídia da marca Epson e acoplado a um PC foi empregado para projetar a grade de retículos sobre o corpo de prova. A grade projetada apresentou um período de 0,2 mm. Para evitar ruídos indesejados durante a projeção da grade sobre o corpo de prova, o projetor multimídia teve sua resolução ajustada junto com a resolução do computador (1024x768). A Figura 20 ilustra a disposição dos equipamentos.

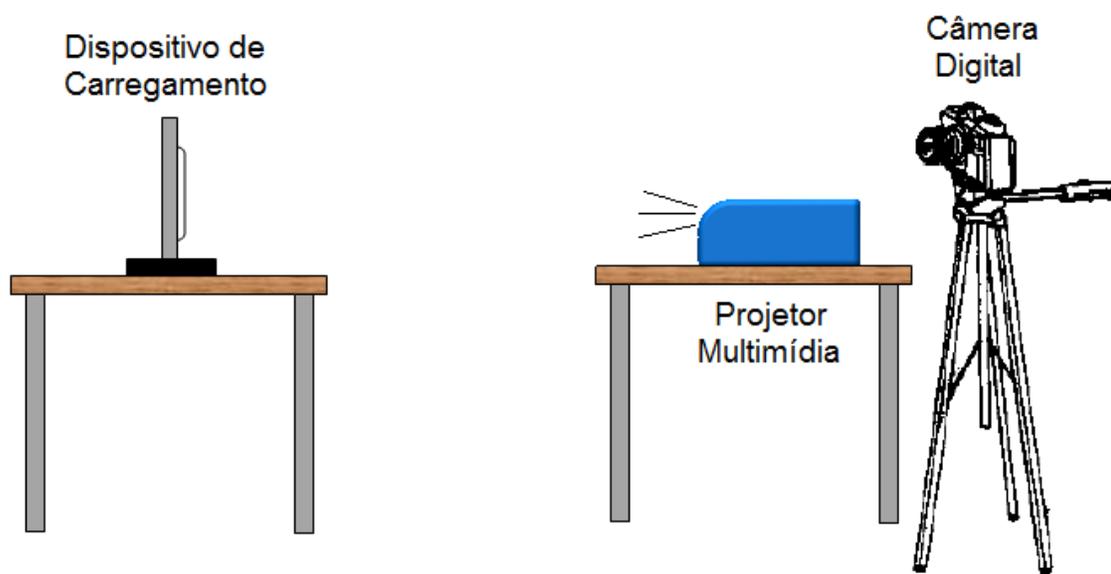


Figura 20. Arranjo Experimental para ensaio fotomecânico de *moiré* por *phase-shifting*.

Os corpos de prova tiveram suas faces de análise pintadas com tinta *spray* branco fosco, a fim de aumentar o contraste com a grade projetada. O ambiente onde foi realizado o ensaio fotomecânico tiveram suas janelas vedadas com placas para evitar a penetração de luz

no recinto. A base do dispositivo de carregamento foi firmemente preso à uma mesa por dois sargentos a fim de evitar qualquer tipo de movimentação quando aplicado o carregamento. Os equipamentos, após estarem fisicamente posicionados, passaram por ajustes para obtenção de imagens, i.e., a câmera teve sua imagem focalizada pelo zoom, de modo a captar a área desejada para estudo. Após a determinação de todos os parâmetros do arranjo experimental, nenhum desses foram alterados, a fim de não influenciar nos resultados obtidos.

Inicialmente, o ensaio experimental projetou as quatro grades sobre o corpo de prova ausente de qualquer carregamento. Cada grade foi denominada, para este trabalho de pesquisa, como $g_1(x,y)$, $g_2(x,y)$, $g_3(x,y)$ e $g_4(x,y)$. Após esta etapa de tomada das imagens da grade sobre o corpo de prova, novamente a grade ($g_1(x,y)$) foi projetada sobre o corpo de prova e os carregamentos foram aplicados, não havendo necessidade de se projetar as demais grades ópticas. Portanto, para cada ensaio de carregamento, um grupo de nove imagens foi obtido. As primeiras quatro imagens são referentes ao corpo sem carregamento. As outras cinco imagens foram obtidas para cada carregamento aplicado. Neste trabalho, essas imagens foram nomeadas como $I_n(x,y)$ com n variando de 1 a 5, sendo $I_1(x,y)$ [0,5 mm], $I_2(x,y)$ [1,0 mm], $I_3(x,y)$ [1,5 mm], $I_4(x,y)$ [2,0 mm] e $I_5(x,y)$ [2,5 mm].

4.2.1 Processamento de imagens

Para o processamento de imagem, foi utilizado os *softwares* ImageJ e SCILAB – 4.1.1. O processamento foi dividido em quatro etapas: Seleção da área de estudo, Tratamento das franjas, Tratamento da curva e Elevação Topográfica.

Na primeira etapa, referente à seleção da área de estudo, as imagens foram carregadas no *software* ImageJ para seleção e separação da área de estudo do plano de fundo. Para cada repetição do ensaio de carregamento, uma rotina foi criada com o intuito de selecionar os mesmos pontos que compõe a área de estudo e transformá-las de RGB para escala de cinza (8 bits).

A segunda etapa, relacionada ao tratamento que formou as franjas de interferência, foi realizada ainda no ambiente do *software* ImageJ. Para tal, foi aplicada a operação **difference**,

através do comando **Image Calculator**. Essa operação foi realizada entre as quatro grades para cada imagem carregada, conforme indicado pelas equações (23) à (26).

$$m_1(x, y) = g_1(x, y) - I_n(x, y) \quad (23)$$

$$m_2(x, y) = g_2(x, y) - I_n(x, y) \quad (24)$$

$$m_3(x, y) = g_3(x, y) - I_n(x, y) \quad (25)$$

$$m_4(x, y) = g_4(x, y) - I_n(x, y) \quad (26)$$

Posteriormente as imagens resultantes passaram por uma filtragem. Para tal, foram aplicados os filtros **Gaussian Blur** e **Mean** de maneira a suavizar as curvas obtidas. O grau de cada filtro aplicado variou de acordo com a imagem, sendo analisado caso a caso. Geralmente, quanto maior foram os ruídos sobre as franjas, mais forte foi aplicado o grau de filtragem. Para cada índice de carregamento foi gerado um pacote de quatro imagens, relacionadas à defasagem da grade.

O pacote de imagens tratadas no ImageJ foram salvas em escala e extensão Bitmap-24 bits e em escala de tons de cinza para serem transferidas posteriormente para o *software* SCILAB para a realização da terceira etapa, referente ao tratamento da curva. Nessa etapa, as quatro imagens, resultantes do processamento realizado no ImageJ, foram desempacotadas a fim de formar a topografia de deslocamento do corpo de prova. O *software* SCILAB foi aberto no modo **Interferometry GUI**. Inicialmente foi aberta a imagem $m_1(x,y)$. Posteriormente foi acionado o comando **Calculate Wrapped Phase** na barra de ferramentas **PhasedImages**. O pacote de quatro imagens tratadas no ImageJ foram salvas para dentro do programa SCILAB e foi selecionado a opção **Bucket 4a (90 deg)**. O resultado desse processamento gerou uma imagem com os dados de topografia de seu deslocamento, porém empacotada. Para realizar o desempacotamento da imagem, foi aplicado a operação **Unwrap Linearly**. Os resultados mostraram que foi necessário aplicar um ajuste da curva. Para tal, foi aplicada a operação **Power** com grau variante de acordo com o ajuste necessário. Este ajuste foi necessário, pois todos os ruídos da imagem não foram removidos durante o processo de filtragem, acarretando alguns erros, principalmente nas bordas superiores. O ajuste variou de acordo com o nível de ruído na imagem. A imagem resultante obtida foi representada em tons de cinza e foi nomeado como $m_{\text{result}}(x,y)$. A imagem foi salva como arquivo Bitmap-24 bits.

A imagem $m_{\text{result}}(x,y)$ foi transferida novamente para o *software* ImageJ e iniciada a última etapa, onde foi obtido o mapa de cores e os dados numéricos da elevação topográfica do deslocamento do corpo de prova. Para obter os dados numéricos de elevação topográfica, a imagem resultante passou pela operação **Image to Result**, ao qual forneceu todos os módulos de pixel para cada ponto do corpo de prova abrangendo toda a área de estudo. O arquivo foi salvo para ser aberto posteriormente em planilha Excel e permitir seu tratamento para quantificação de tensão e deformação. A mesma imagem $m_{\text{result}}(x,y)$ passou pelo processamento do comando **Interactive 3D Surface Plot** e foi fornecido o mapa de cores de deslocamento, resultante da deflexão do corpo de prova. O arquivo foi salvo em Bitmap – 24 bits. Ambos os dados foram utilizados para análise qualitativa e quantitativa dos resultados. O procedimento acima relatado foi repetido para cada imagem referente à ao seu estágio de carregamento.

4.2.2 Quantificação de tensões (metodologia híbrida)

Essa etapa consistiu na aplicação da metodologia híbrida para cálculo de deformação e tensão. Como abordado anteriormente, inicialmente o ensaio foi classificado, de acordo com a análise qualitativa dos parâmetros de força e de caracterização, conforme explicado no capítulo 3.2. Portanto, o ensaio deste trabalho de pesquisa para definição da metodologia híbrida foi classificado como direto, porque as condições experimentais fornecem dados de entrada e dados do sistema. O parâmetro de caracterização definiu o ensaio como “completamente especificado”, pois as informações do material, tais como suas propriedades mecânicas e sua geometria, além de parâmetros como condições de contorno e carregamentos, são conhecidas.

A técnica de *moiré*, como explicado anteriormente, fornece dados do campo de deslocamento e a quantificação das deformações, e por consequência, as tensões foram calculadas utilizando. As equações que determinam as tensões e deformações foram determinadas com base nos dados do resultado experimental obtidos pelo ensaio fotomecânico.

Para o ensaio de *moiré* por *phase-shifting*, os dados de elevação topográfica do corpo de prova fletido foram convertidos de módulo pixelar para unidades de milímetros. Os dados fornecidos pelo *software* ImageJ são referentes ao deslocamento fora do plano (eixo X_3) com relação à sua localização bi-dimensional; a direção do comprimento (eixo X_1) e a direção da largura (eixo X_2). Para esse trabalho de pesquisa, uma área de seção de deslocamento (eixo X_3) localizado à meia distância da largura total do eixo X_2 foi selecionada para os cálculos de deformação e tensão. Para a conversão dos dados de pixels para milímetros, foi necessário obter um fator de conversão. Esse fator foi calculado relacionando a intensidade do pixel no ponto onde o carregamento foi aplicado e o deslocamento (ou deformação) controlado pelo relógio comparador, ou seja, na altura mediana do corpo de prova (eixo X_3). A intensidade dos pixels ao longo do corpo de prova foi convertida de pixels para milímetros de deslocamento através deste fator de conversão.

Com os dados de pixels convertidos para milímetros, obteve-se então a deformação do corpo de prova. Para cálculo da deformação específica do corpo de prova, utilizaram-se as equações (15) à (18). A tensão foi então calculada através da equação (22).

4.3 Validação Experimental

Os resultados experimentais obtidos pela técnica de *moiré* foram comparados com outras técnicas convencionais para que possa ser analisada sua confiabilidade qualitativa e quantitativa, como forma de validação experimental. Para este trabalho de pesquisa, foram realizados ensaios de caráter teórico e prático. Para ensaios de caráter teórico, foi realizada uma simulação computacional, enquanto que, para ensaios de caráter prático, foram realizados ensaios de carregamento nos mesmos moldes do ensaio fotomecânico com medição por extensometria elétrica.

4.3.1 Simulação Computacional

Para comparar os resultados práticos com os resultados teóricos, foi conduzida uma simulação computacional utilizando o *software* Abaqus 6.10. O objetivo dessa etapa foi de

comparar resultados teóricos com os resultados práticos obtidos pelo ensaio fotomecânico. Neste caso, a simulação computacional caracterizou-se como resultado teórico, pois efeitos de singularidades do material, efeitos de carregamento, entre outras particularidades que fujam ao idealismo do ensaio de carregamento, não conseguem ser reproduzidos no ambiente virtual. O *software* Abaqus 6.10, assim como qualquer outra ferramenta computacional de análise de tensão, são baseados no método dos elementos finitos.

O ensaio computacional simulou duas condições de carregamento. A primeira foi regida somente com o corpo de prova e a segunda simulou o carregamento considerando o conjunto completo formado pelo corpo de prova e o dispositivo de carregamento. A primeira simulação foi realizada para fornecer dados concernentes somente do corpo de prova ao longo de seu comprimento, tais como, deslocamento, deformação e tensão. A segunda simulação tem por objetivo analisar o comportamento do conjunto de forma mais completa, abordando o comportamento do conjunto corpo de prova + dispositivo. Os resultados deste tipo de simulação objetivou dar suporte para uma melhor compreensão dos resultados experimentais obtidos pela técnica de *moiré* de forma qualitativa, não sendo possível analisar quantitativamente o corpo de prova isoladamente.

Para ambos os casos, o ambiente virtual buscou se aproximar das condições reais de ensaio fotomecânico. Para tal, utilizaram-se dimensões dos corpos de prova, deslocamentos e as condições de contorno condizentes com o ensaio fotomecânico, tais como o duplo engastamento nas extremidades do corpo de prova e carregamento na meia distância de seu comprimento. Aliado a isso, os módulos de Poisson e de elasticidade foram utilizados para a simulação computacional. A Figura 21 mostra o corpo de prova virtual e as condições de contorno reproduzido em ambiente virtual para realizar a simulação computacional. A Figura 22 ilustra o conjunto completo do dispositivo virtual utilizado para realizar a simulação computacional.

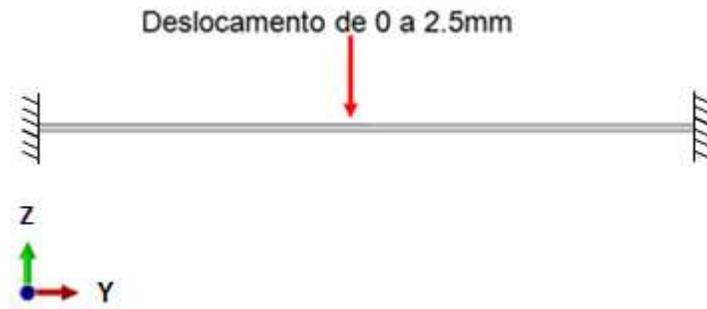


Figura 21. Corpo de prova virtual e condição de contorno reproduzido no *software* Abaqus 6.10.

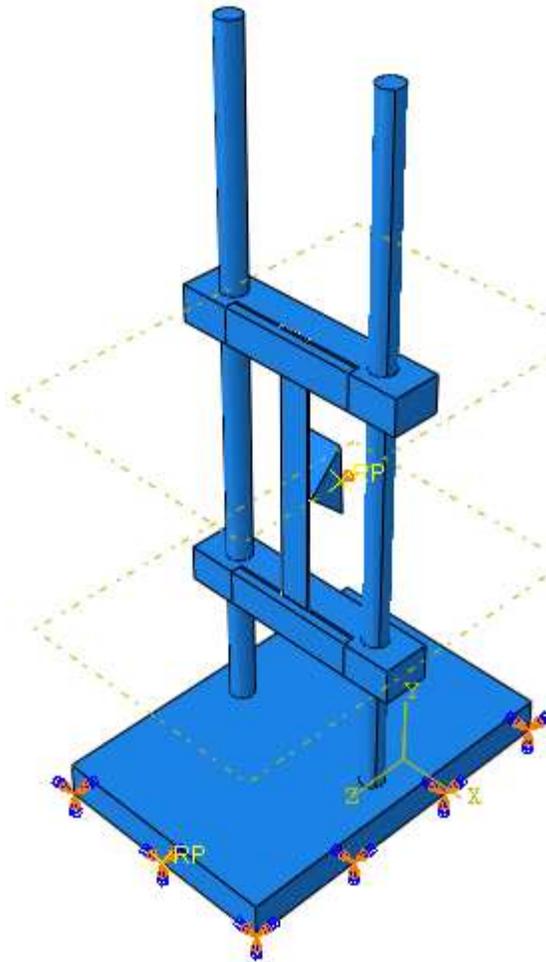


Figura 22. Dispositivo utilizado para simulação computacional.

4.3.2 Extensometria Elétrica

O ensaio de carregamento por extensometria elétrica foi realizado no Laboratório de Estruturas, na Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, situado na cidade de Campinas – SP. Para tal, um total de cinco *strain-gages* da marca KYOWA do tipo KFG-5-120-C1-11 foram posicionados ao longo do comprimento útil do corpo de prova, conforme ilustra a Figura 23, porém, devido à situação de engastamento das extremidades, não é possível acoplar *strain-gages*. Para tal situação, estas duas regiões terão dados definidos de acordo com as condições de contorno do ensaio de carregamento e, posteriormente discutidos.

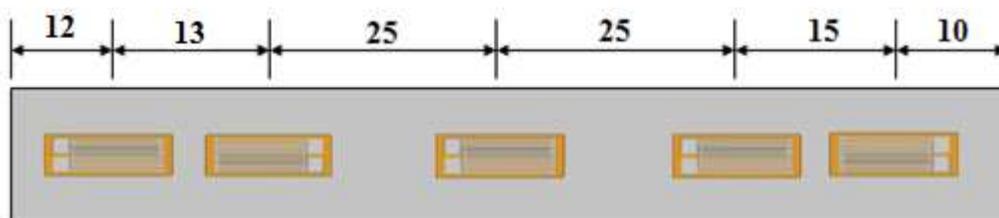


Figura 23. Posicionamento dos *strain-gages* ao longo do comprimento útil do corpo de prova. Medidas em milímetros.

O deslocamento foi controlado por um relógio comparador com saída de dados diretos para o computador, de forma que os dados de deformação, obtidos pelo *software*, fossem tomados com os dados de deslocamento máximo em tempo simultâneo. Um sistema de aquisição de dados com o aquisidor SYSTEM 5.000 e o programa MG 5.000 foram utilizados para o registro dos dados de deslocamento do relógio comparador e de deformação específica nos pontos de medida do corpo de prova. Cinco repetições foram realizadas. A temperatura do ar no horário do ensaio experimental foi de aproximadamente 17 °C.

A extensometria elétrica fornece dados de deformação específica. Portanto, para se obter dados de deslocamento do corpo de prova e de tensão, utilizou-se equações para fim de comparação com resultados teóricos e práticos obtidos pela técnica de *moiré*. Para obter o deslocamento do corpo de prova, as equações de (15) à (18) foram utilizadas. Para cálculo de tensão, os dados de deformação específica obtida pelo ensaio experimental, utilizou-se a equação (22) onde os dados de módulo de elasticidade e de Poisson foram fornecidos pela empresa fabricante do aço (item 4.1).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A discussão dos resultados obtidos pela técnica de *moiré* foi dividida em: resultados qualitativos e quantitativos.

Os dados qualitativos obtidos pela técnica de *moiré* foram comparados com os dados qualitativos obtidos pela simulação computacional, e os dados quantitativos obtido pela TM foram comparados com os resultados quantitativos da simulação computacional e da extensometria elétrica.

5.1 Resultado Qualitativo

Para melhor discussão dos resultados qualitativos, inicialmente serão apresentados os resultados qualitativos obtidos pela simulação computacional, de maneira a compreender o comportamento mecânico do corpo de prova quando carregado e, depois, serão apresentados os resultados obtidos pela técnica de *moiré* para melhor serem analisados.

O *software* Abaqus 6.10 gerou, como resultado qualitativo, uma figura do corpo de prova virtual colorida, sendo referido como “mapa” e seguido de uma régua graduada em cores com dados quantitativos, ao qual se permite associar a cor diretamente com o valor da medida. Foram tomados três tipos de medidas: Mapa de Deslocamento, Mapa de Deformação Específica e Mapa de Tensão. A Figura 24 mostra os resultados do mapa de deslocamento obtidos pela simulação computacional no plano bi-dimensional, enquanto que a Figura 25 ilustra os resultados de deslocamento tri-dimensional, bem como a régua graduada em cores com os dados quantitativos de deslocamento.



Figura 24. Campo de deslocamento em vista bi-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.

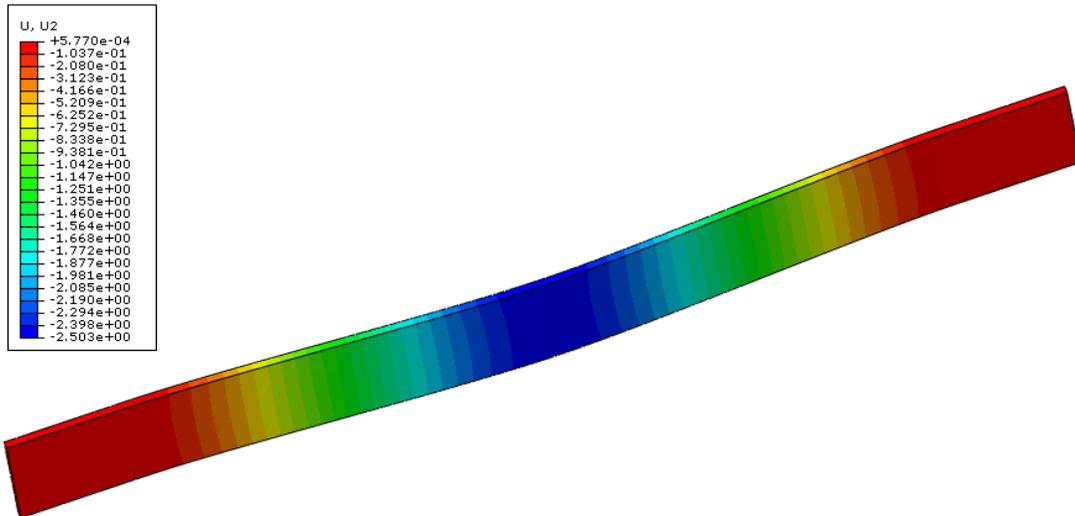


Figura 25. Campo de deslocamento em vista tri-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.

A Figura 26 mostra os resultados do mapa de deformação específica obtidos pela simulação computacional no *software* Abaqus 6.10 no plano bi-dimensional, enquanto que a Figura 27 ilustra os resultados de deslocamento em vista tri-dimensional, bem como a régua graduada com os dados quantitativos de deformação específica.

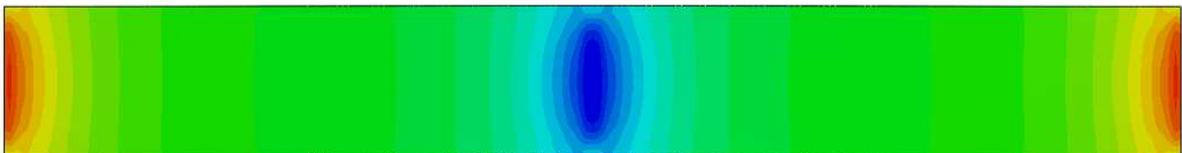


Figura 26. Campo de deformação específica em vista bi-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.

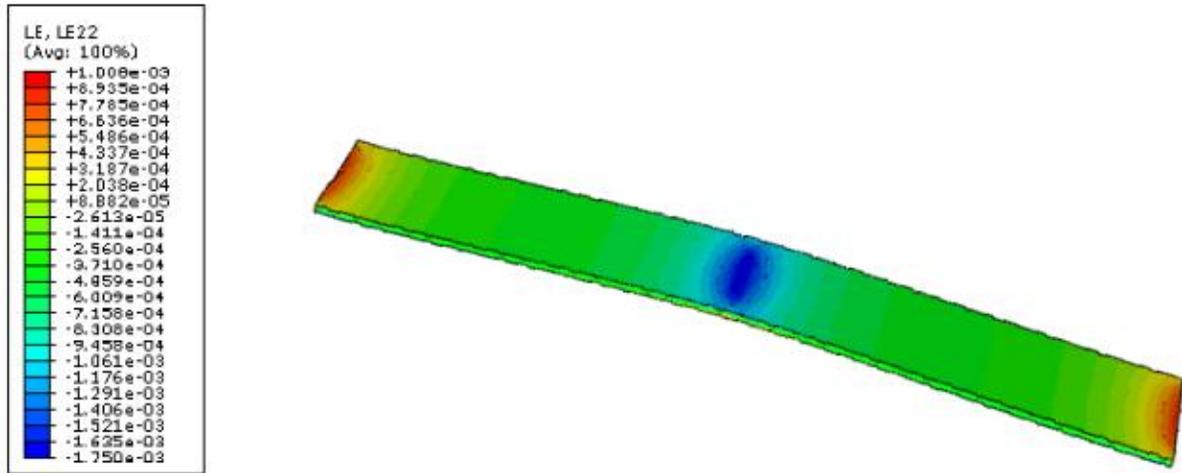


Figura 27. Campo de deformação específica em vista tri-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.

A Figura 28 mostra os resultados do mapa de tensão obtidos pela simulação computacional no *software* Abaqus 6.10 no plano bi-dimensional, enquanto que a Figura 29 ilustra os resultados de deslocamento em vista tri-dimensional, bem como, a régua graduada com os dados quantitativos de tensão.

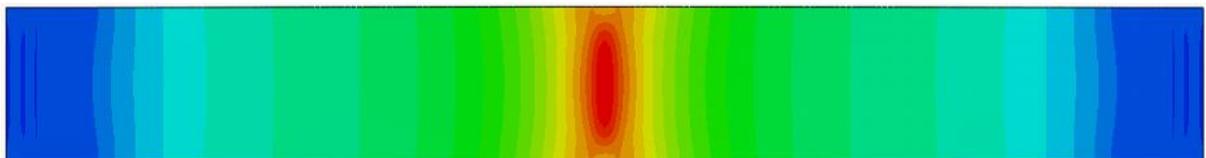


Figura 28. Campo de tensão em vista bi-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.

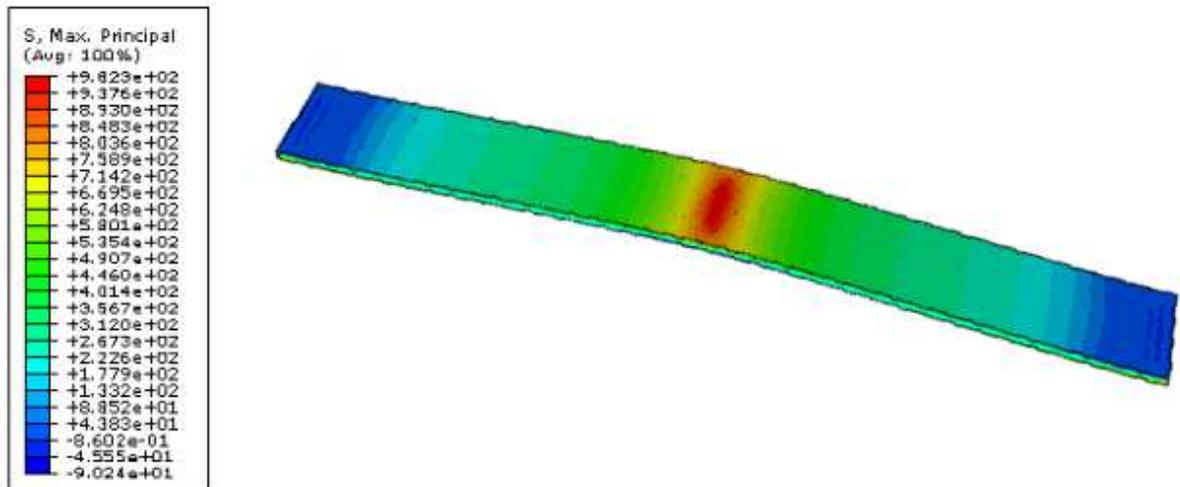


Figura 29. Campo de tensão em vista tri-dimensional para corpo de prova bi-engastado obtido por simulação computacional.

Analisando as Figuras 24 à 29, percebe-se que, para cada corpo de prova carregado, o seu comportamento mecânico mostrou que o deslocamento (deformação total), deformação específica e tensão estão diretamente relacionados, i. e., quanto maior o deslocamento, maiores serão a deformação e a tensão. Também verifica-se que as deformações, tensões e deslocamentos também são simétricos ao longo do comprimento do corpo de prova tendo seu ponto mínimo, localizado na região engastada e seu pico localizado na região mediana, ponto onde ocorreu a aplicação do carregamento pelo dispositivo. O mapa colorimétrico revela que os mapas de distribuição de tensão e deformação são semelhantes entre si, evidenciando uma relação direta entre ambos, mas diferentes do comportamento do mapa de deslocamento. Porém, vale ressaltar que essa afirmação só é válida para o caso do corpo de prova se encontrar na região elástica.

A Figura 30 mostra o resultado de análise do deslocamento do dispositivo de carregamento para todos os estágios de carregamento.

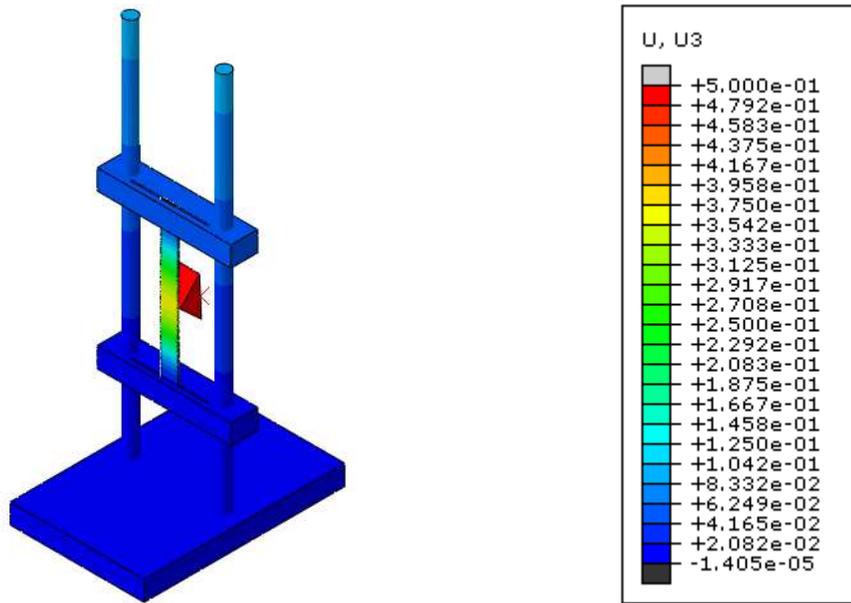


Figura 30.a) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 0,5 mm.

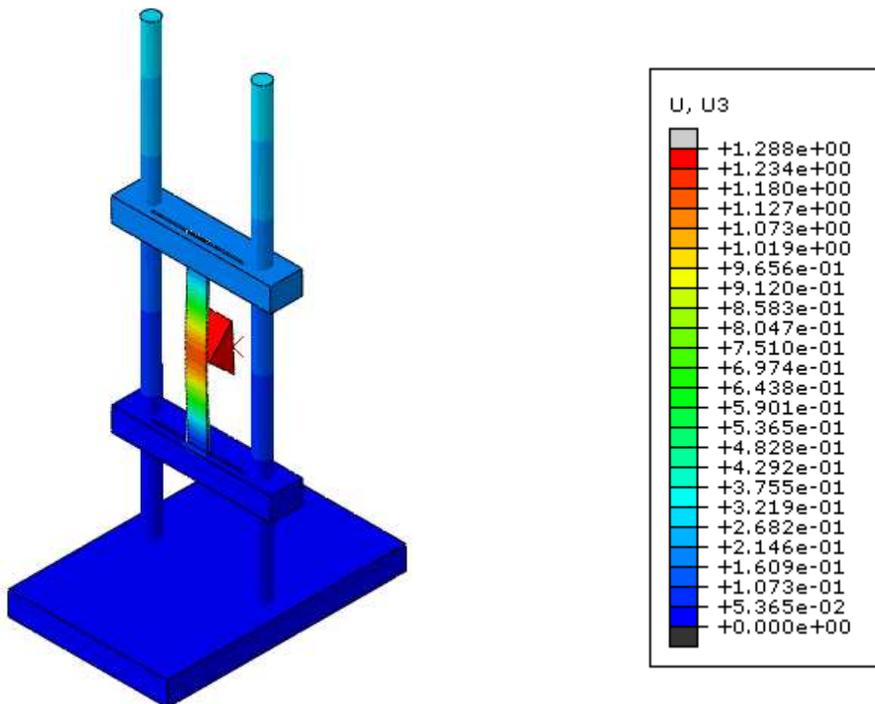


Figura 30.b) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 1,0 mm.

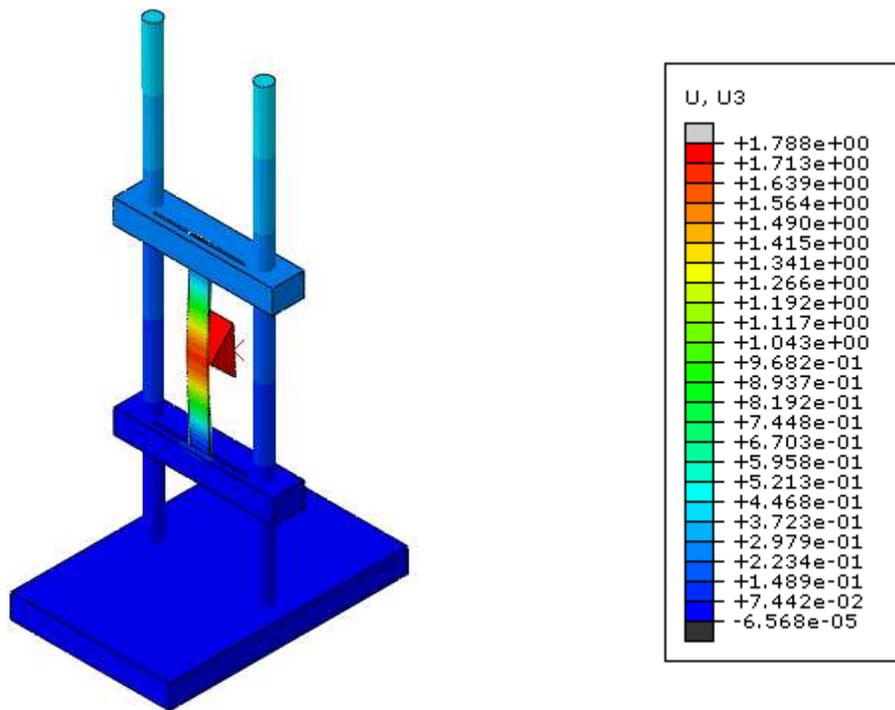


Figura 30.c) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 1,5 mm.

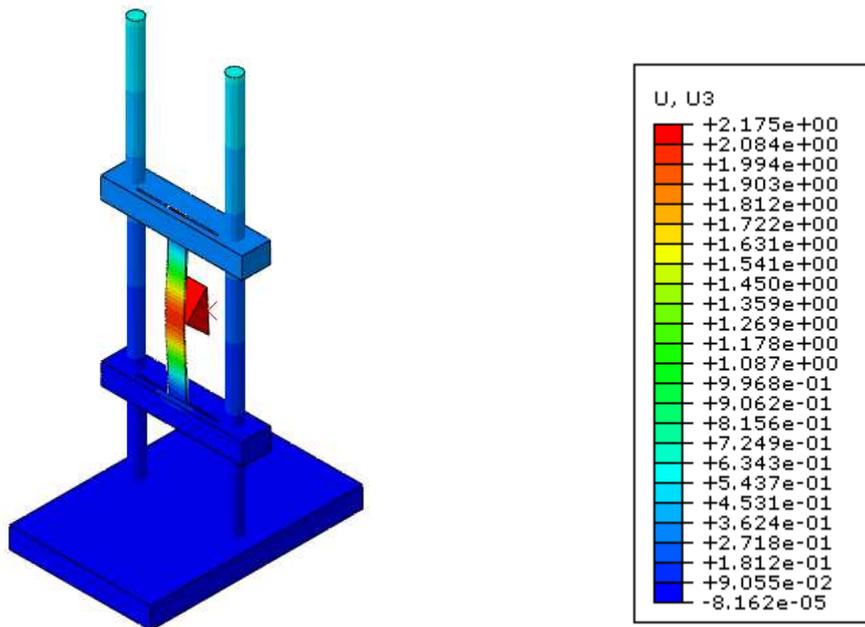


Figura 30.d) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 2,0 mm.

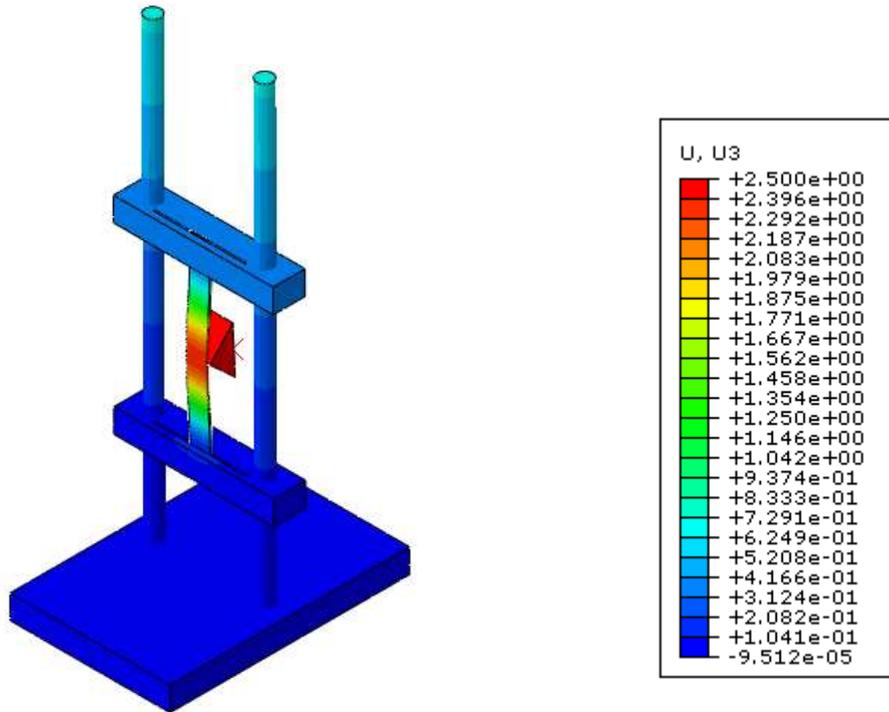


Figura 30.e) Análise do deslocamento do conjunto corpo de prova e dispositivo de carregamento de 2,5 mm.

A simulação computacional do conjunto completo mostrou que, quando uma carga é aplicada pelo dispositivo, uma reação é imposta de modo que os pilares de sustentação da carga sofre uma deformação. Este deslocamento pode ser refletido nos resultados obtidos pela técnica de *moiré*, e é objeto de análise dos resultados a serem discutidos posteriormente.

As Figuras 31 à 35 mostram os resultados qualitativos obtidos pela técnica de *moiré* por *phase-shifting*. Todas as imagens tiveram acopladas a régua graduada em cores e escala relativa em pixel, obtidas pelo *software* ImageJ. Vale ressaltar que, a régua obtida pelo processamento de imagens não está relacionada ao módulo de tensão obtido pelo ensaio fotomecânico. Este valor é o módulo pixelar, porém, pode ser associado, pois tensão e deslocamento estão diretamente relacionados. Porém, para este trabalho de pesquisa a régua colorimétrica servirá como auxílio no entendimento do mapa qualitativo de distribuição de deslocamento e conseqüentemente de tensão obtidos pela técnica de *moiré* por *phase-shifting*.

Também é ressaltado que o *software* ImageJ é bastante versátil no que tange ao mapa de comportamento mecânico e, diversos tipos de franjas podem ser obtidos pelo *software* ImageJ, Dentre as opções disponíveis, destacam-se as franjas de forma isocromáticas ou com distribuição colorimétrica. Devido à semelhança dos resultados oferecida pela simulação computacional, foi optado analisar as franjas por distribuição colorimétrica.

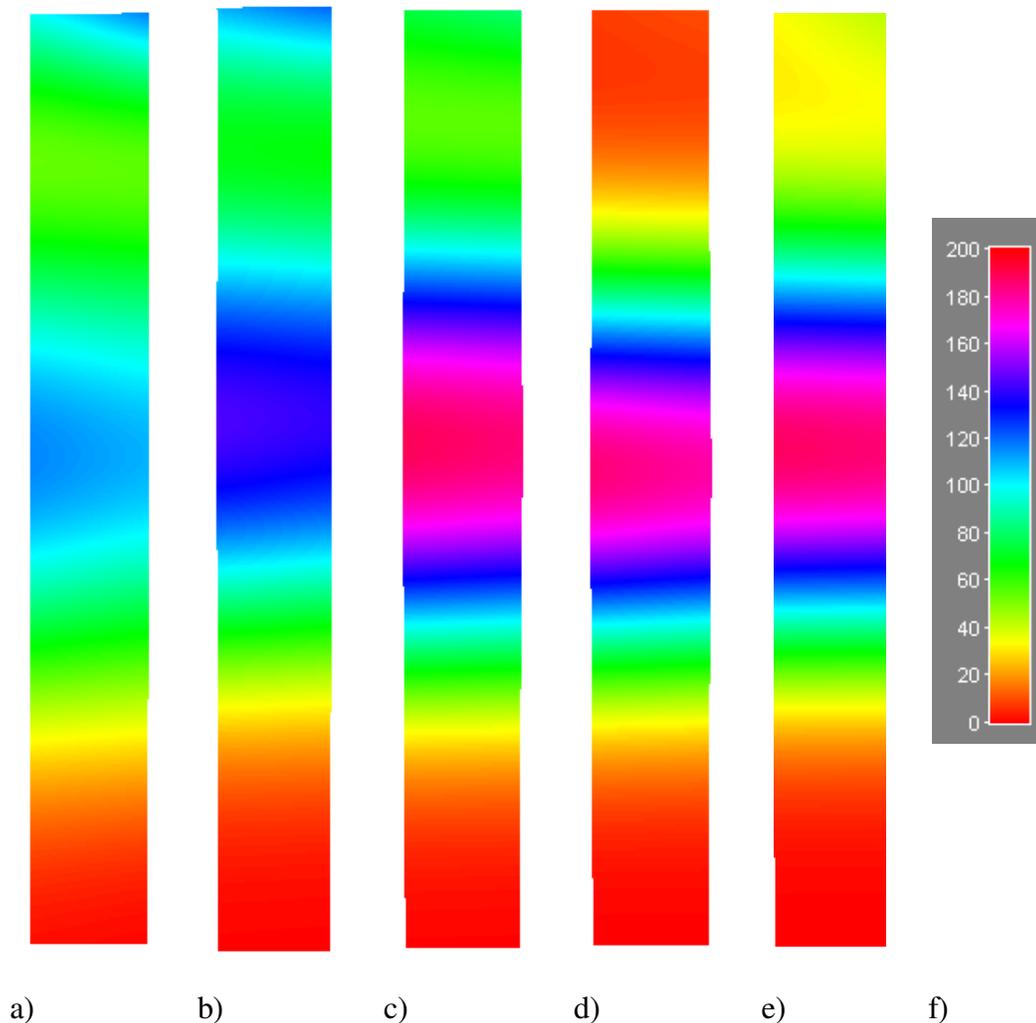


Figura 31. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 01 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.

Os resultados qualitativos, ilustrados na Figura 31, demonstraram que o corpo de prova 01 apresentou boa simetria das franjas, principalmente no corpo de prova deslocado em 2,0 mm. A simetria se tornou mais nítida e a intensidade das cores das franjas também foi

crescente à medida que o carregamento foi ampliado. As franjas se mostraram praticamente paralelas, mostrando que o carregamento não provocou movimentos de torção no corpo de prova, resultantes do engastamento com o carregamento aplicado.

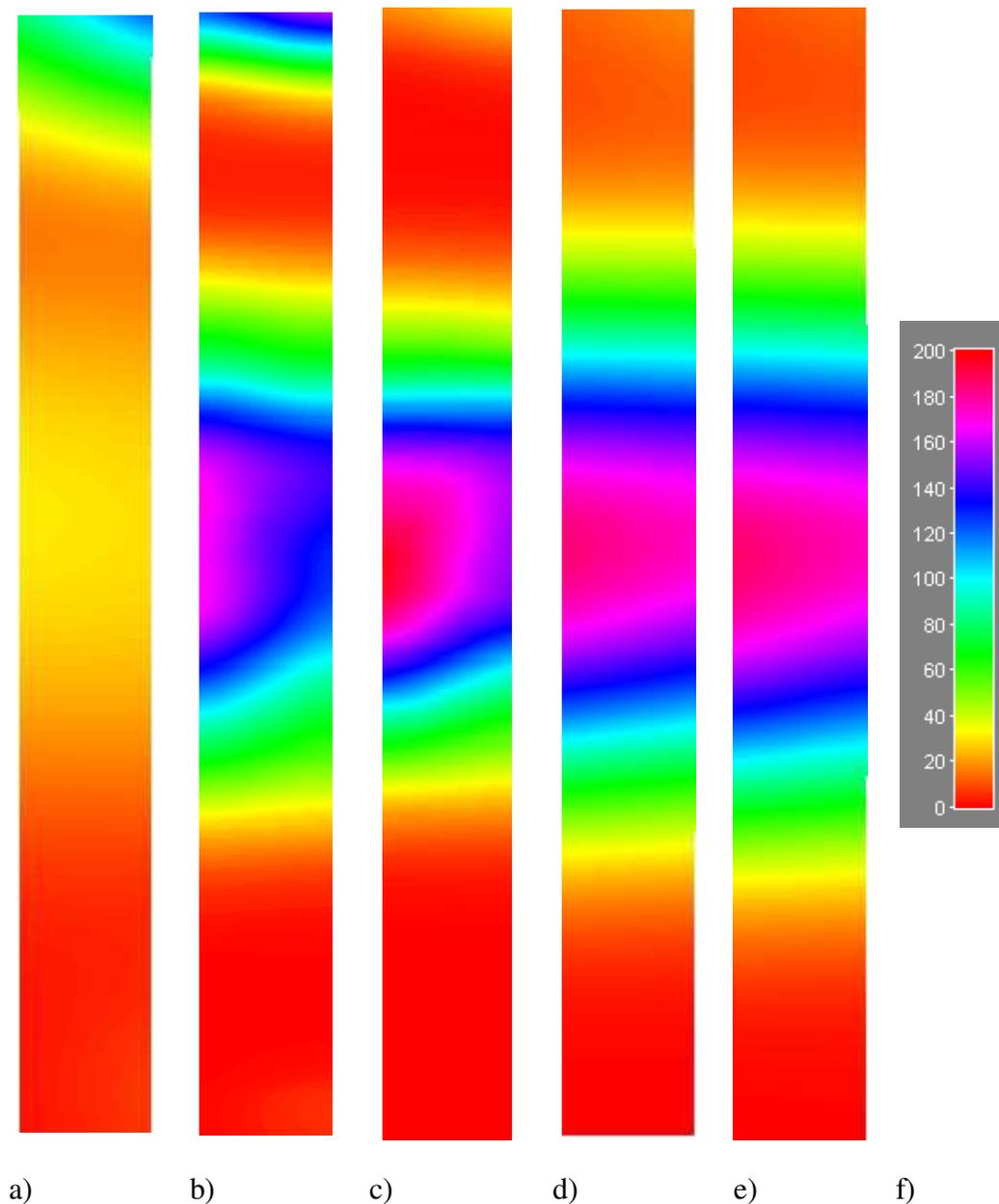


Figura 32. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 02 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.

Os resultados qualitativos, ilustrados na Figura 32, mostraram que o corpo de prova 02 apresentou boa simetria das franjas, principalmente no corpo de prova deslocado em 1,5 mm,

2,0 mm e 2,5 mm. A simetria foi crescente e a intensidade das cores das franjas também foi crescente à medida que o carregamento foi ampliado. As franjas apresentaram uma leve inclinação, mostrando que o carregamento pode ter provocado movimentos de torção no corpo de prova.

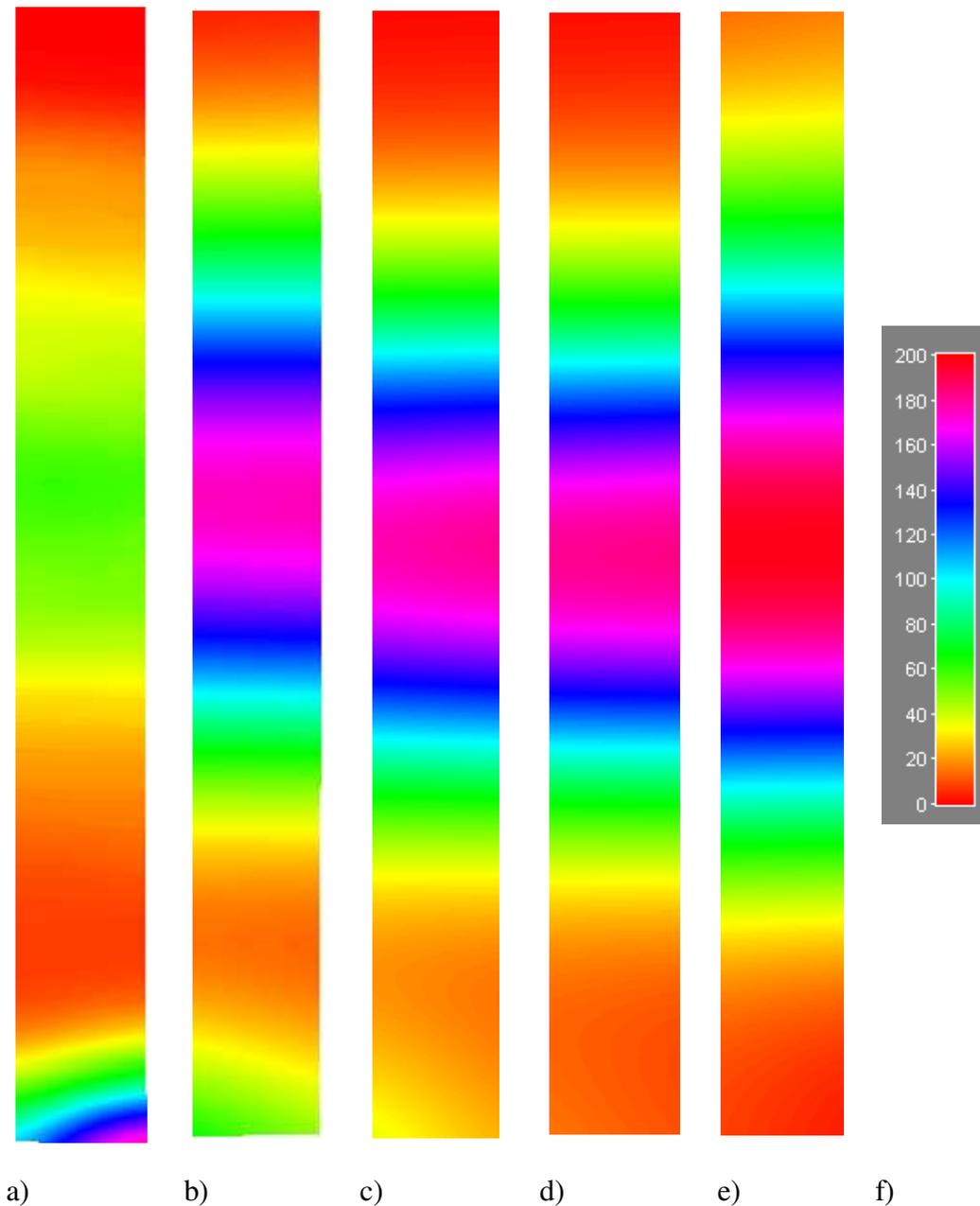


Figura 33. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 03 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.

Os resultados qualitativos, ilustrados na Figura 33, mostraram que o corpo de prova 03 apresentou bons índices de simetria das franjas. A simetria foi crescente e a intensidade das cores das franjas também foi crescente à medida que o carregamento foi ampliado. As franjas ficaram praticamente paralelas, mostrando que o carregamento não provocou movimentos de torção no corpo de prova.

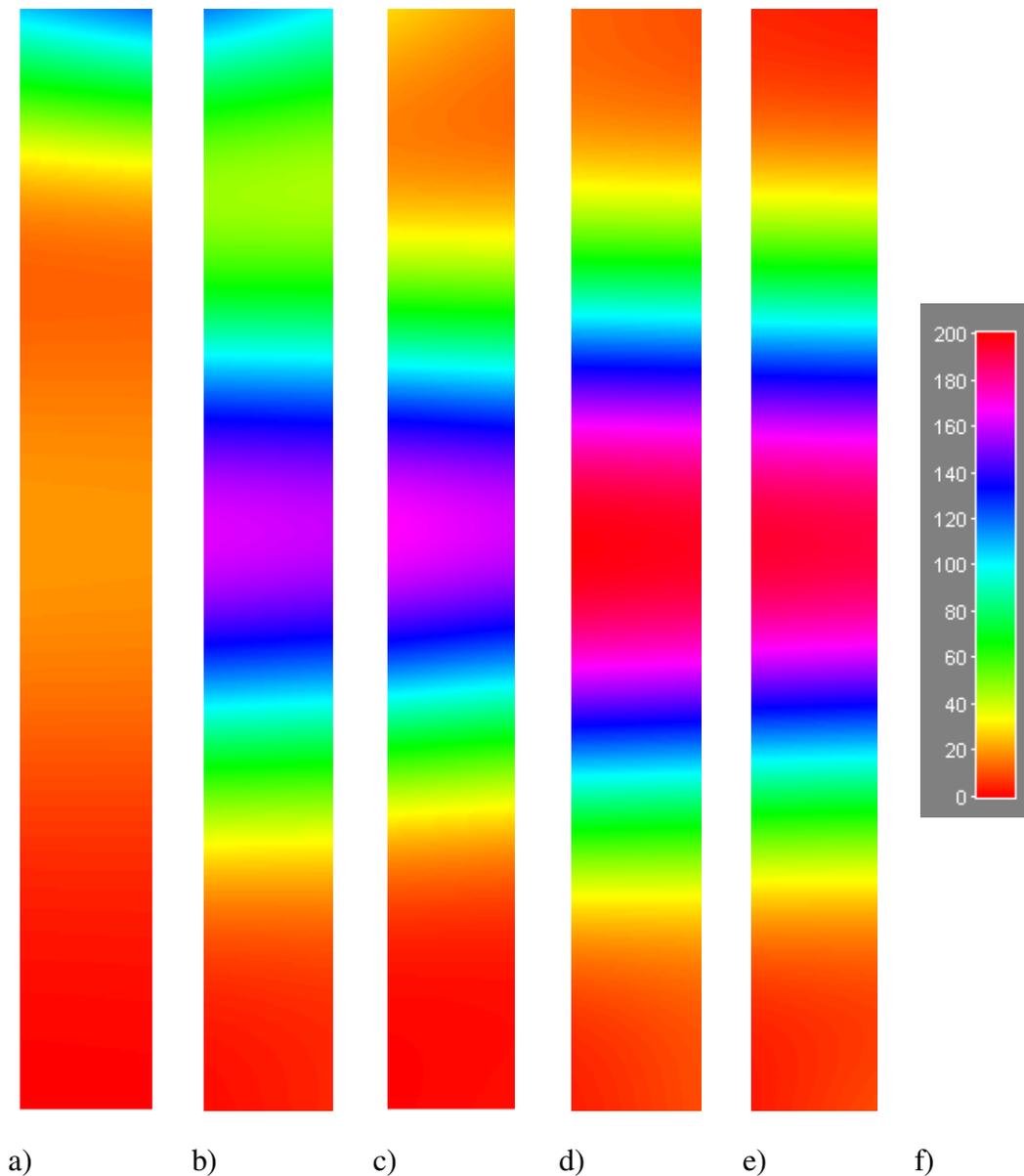


Figura 34. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 04 para deslocamentos de:
a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.

Os resultados qualitativos, ilustrados na Figura 34, mostraram que o corpo de prova 04 apresentou boa simetria das franjas. A simetria foi crescente e a intensidade das cores das franjas também foi crescente à medida que o carregamento foi ampliado. Percebe-se uma leve inclinação das franjas, principalmente na região central do corpo de prova, mostrando que pode ter ocorrido uma leve torção do corpo de prova no momento o carregamento.

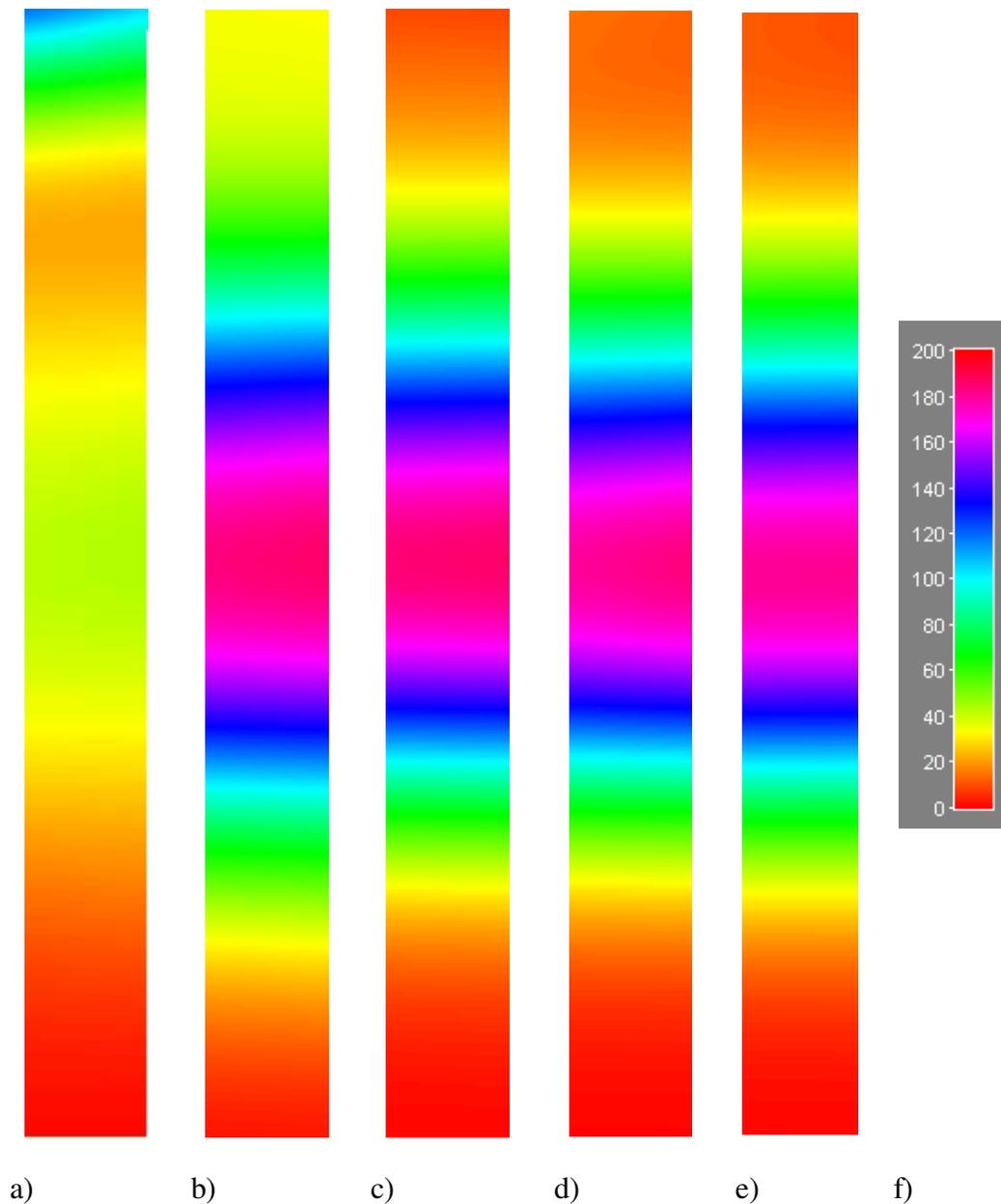


Figura 35. Mapa qualitativo colorimétrico para o corpo de prova 05 para deslocamentos de: a) 0,5 mm; b) 1,0 mm; c) 1,5 mm; d) 2,0 mm e e) 2,5 mm; f) Régua graduada em cores.

Os resultados qualitativos, ilustrados na Figura 35, mostraram que o corpo de prova 05 apresentou boa simetria das franjas, principalmente para os estágios de deslocamento de 1,0, 1,5 mm, 2,0 mm e 2,5 mm. A simetria foi crescente e a intensidade das cores das franjas também foi crescente à medida que o carregamento foi ampliado. As franjas apresentaram uma leve inclinação, mostrando que o carregamento possa ter provocado movimentos de torção no corpo de prova.

A análise qualitativa do mapa de cores dos corpos de prova mostrou que, para regiões onde as os tons variam de vermelho alaranjado (módulo pixelar = 0) à amarelo (módulo pixelar = 35). Tons que variaram de azul claro (módulo pixelar = 110) até vermelho (módulo pixelar = 200) apresentam alto índice de deslocamento do corpo de prova.

Pelo *software* ImageJ também é possível obter a vista tri-dimensional do mapa qualitativo do comportamento mecânico do corpo de prova obtido pela técnica de *moiré*. A Figura 36 ilustra um dos casos obtidos. Todos os demais resultados de deslocamento tri-dimensional estão ilustrados no Apêndice “A”.

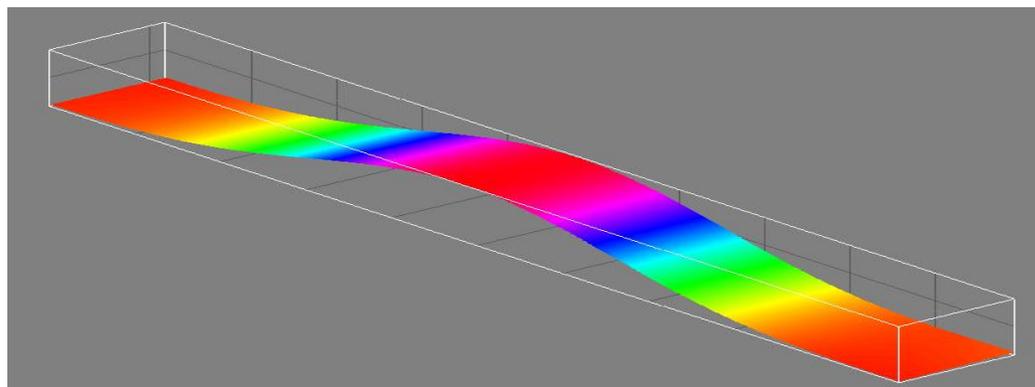


Figura 36. Mapa qualitativo tri-dimensional gerado pela técnica de *moiré*.

Analisando a Figura 36, percebe-se que o comportamento do corpo de prova deformado (ou deslocado para melhor entendimento), obtido pela técnica de *moiré*, assemelha-se aos resultados obtidos pela simulação computacional, tanto para os resultados de tensão quanto de deformação.

Os resultados qualitativos mostraram que o corpo de prova 05 apresentou os melhores índices de simetria de franjas para todos os corpos. A intensidade das cores das franjas não

sofreram grandes variações a partir do carregamento de 1,5 mm. As franjas ficaram paralelas, mostrando que não houve momentos de torção no corpo de prova quando carregado.

Os resultados qualitativos obtidos pela simulação computacional são de caráter teórico, i.e., são comportamentos esperados para corpos de prova que tenha isotropia plena e contínua. Portanto, há de se observar que nenhum tipo de material obedece tão rigorosamente esta condição ideal, criando assim leves distorções entre os resultados esperados e os resultados obtidos em testes práticos de carregamento.

Pelos resultados qualitativos, pode-se afirmar que, segundo a distribuição de deformação e tensão, obtida pela simulação computacional, o corpo comportou-se em sua maioria de forma simétrica, i.e., as cargas crescem da extremidade para o centro do corpo de prova. Esta simetria também foi notada nos resultados obtidos por *moiré*. Percebe-se também que a intensidade das cores foi crescente à medida que o carregamento aplicado sobre o corpo de prova foi ampliado, o que não é mostrado qualitativamente pela simulação computacional no corpo de prova, mas sim representado pela régua de cores. Neste aspecto, os resultados experimentais apresentaram uma grande concordância com os resultados teóricos.

Também foram observadas algumas distorções. Estas distorções foram provocadas por erros ocorridos no ensaio de carregamento, bem como, por problemas na projeção da grade, os quais serão relatados abaixo.

Uma pequena assimetria foi observada de deslocamento na extremidade superior dos corpos de prova. Esse fato sucedeu, pois, com o carregamento do corpo de prova, no protótipo utilizado para testes, o elemento foi levemente fletido para frente, conforme mostram os resultados da simulação computacional ilustrados na Figura 35. A técnica de *moiré* por *phase-shifting* foi sensível o suficiente para captar este deslocamento provocado pela flexão das barras de suporte do protótipo e que foi rebatida no corpo de prova.

Outro tipo de assimetria foi observada para todas as repetições dos corpos de prova com deslocamento de 0,5 mm. Para esses, todos os casos mostraram que uma das bordas apresentaram um deslocamento extremamente alto, porém, analisando o restante do comprimento do corpo de prova, essa anomalia do comportamento desaparece e o comportamento da curva torna-se mais simétrico. Provavelmente esse comportamento possa ter sido ocorrido por distorções na grade projetada e que, foram rebatidas nas franjas de interferência.

Também foi percebido que a simetria foi crescente à medida que o deslocamento foi ampliado. Isto mostra que a técnica de *moiré* por *phase-shifting* foi sensivelmente afetada para baixos deslocamentos do corpo de prova. Esta sensibilidade a baixos deslocamentos já seria esperada, visto que o processo de desempacotamento das imagens passa por um processo de interpolação de imagens. Esse problema de baixa sensibilidade foi relatado por Costa (2006). Porém, à medida que o deslocamento foi ampliado, este erro de borda se tornou menor. Logo, a técnica demonstrou-se altamente confiável e refletiu os resultados esperados para um corpo de prova fletido. Esta situação de baixo deslocamento, refletido em maiores distorções nos resultados qualitativos, pode estar relacionada com a condição viciada do sistema, como relatado por Doyle (2008).

Os problemas de distorção no paralelismo das franjas podem ter ocorridos principalmente por motivos de contato da garra com o corpo de prova. A própria pressão na garra pode ter induzido, em alguns ensaios, a um dos lados ficar mais propício ao giro lateral, quando carregado. Tentou-se minimizar esses fatores ao máximo, durante o ensaio experimental, tentando manter o mesmo nível de pressão entre todos os parafusos da garra, porém, elevados o suficiente para que o corpo não deslizesse para as laterais e nem fosse movimentado frontalmente, quando carregados.

Para efeitos de comparação, a Figura 37 ilustra o resultado dos mapas qualitativos de deslocamento, de deformação específica e de tensão obtidos pela simulação computacional, com os resultados qualitativos obtidos pela técnica de *moiré*. Pelos resultados apresentados, foi notado que o mapa qualitativo de *moiré* é mais próximo do mapa de deslocamento que o de deformação e tensão. Portanto, pode-se afirmar que, qualitativamente, o mapa de *moiré* é hábil em fornecer o campo de deslocamento do corpo de prova.

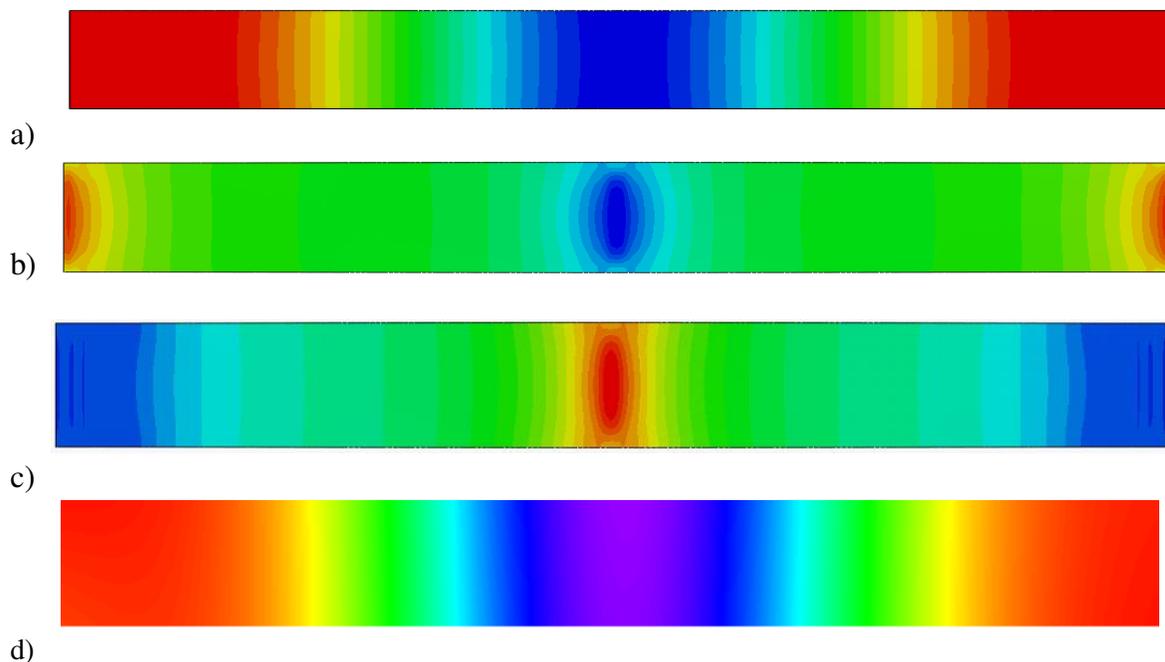


Figura 37. Mapa qualitativo de: a) deslocamento obtido por simulação computacional. b) deformação específica obtida por simulação computacional. c) tensão obtida por simulação computacional. d) *moiré* por *phase-shifting*.

5.2 Resultados Quantitativos

As Figuras 38 à 40 apresentam um exemplo da curva de deslocamento, deformação específica e de tensão obtidos pelo ensaio de extensometria elétrica. Porém, para efeitos de comparação com os resultados obtidos pela técnica de *moiré* e simulação computacional, a média das curvas foi plotada. Todos os resultados obtidos pela extensometria elétrica estão apresentados no Apêndice A deste trabalho de pesquisa.

Os dados de deslocamento do corpo de prova terão suas extremidades com valores adotados de 0 (zero), pois, pelo fato de seu engastamento, não haverá movimentação do corpo de prova. Para os dados de deformação específica e tensão, a curva será compreendida apenas nas regiões de 12 à 90 mm do comprimento do corpo de prova. As extremidades terão valores desconsiderados para análise, devido à impossibilidade de acoplar strain-gages nessas regiões, conforme relatado anteriormente.

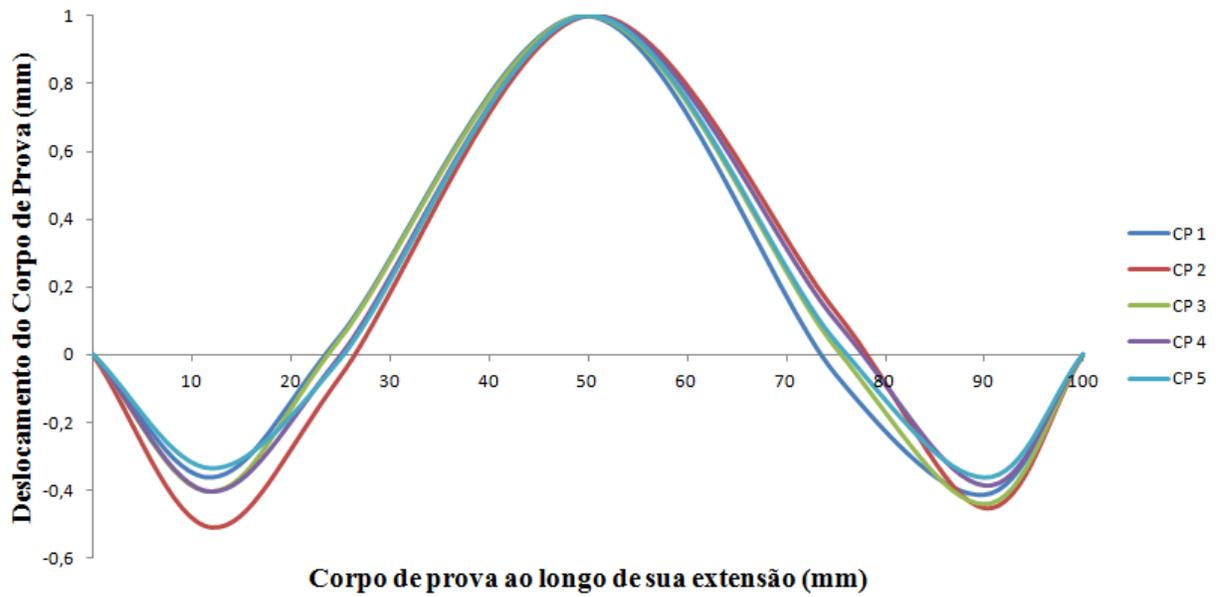


Figura 38. Curva de deslocamento do corpo de prova obtido pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.

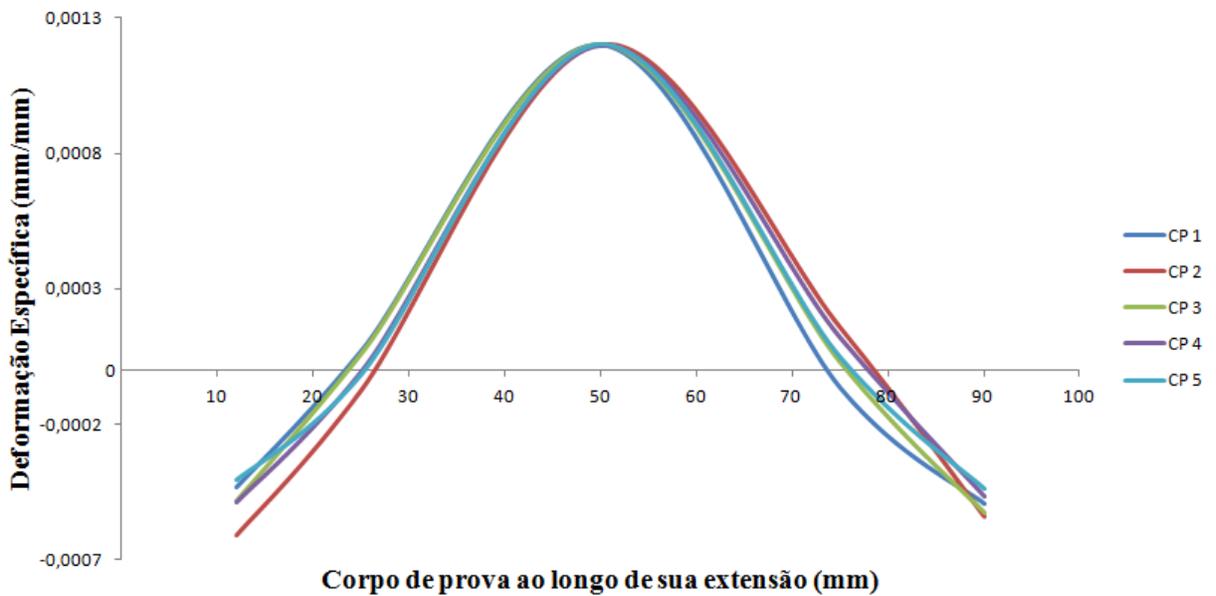


Figura 39. Curva de deformação específica do corpo de prova obtido pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.

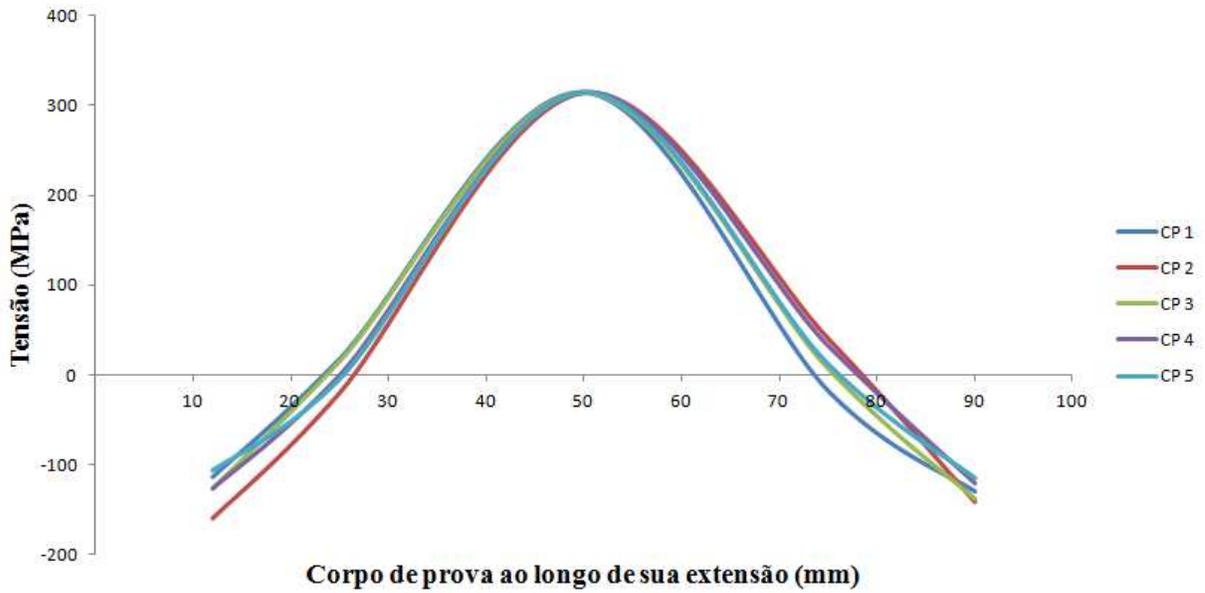


Figura 40. Curva de tensão do corpo de prova obtido pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.

As Figuras 41 à 46 mostram o comportamento da curva de deslocamento ao longo do comprimento do corpo de prova para os ensaios experimentais de *moiré* e extensometria elétrica (média das curvas) e a simulação computacional.

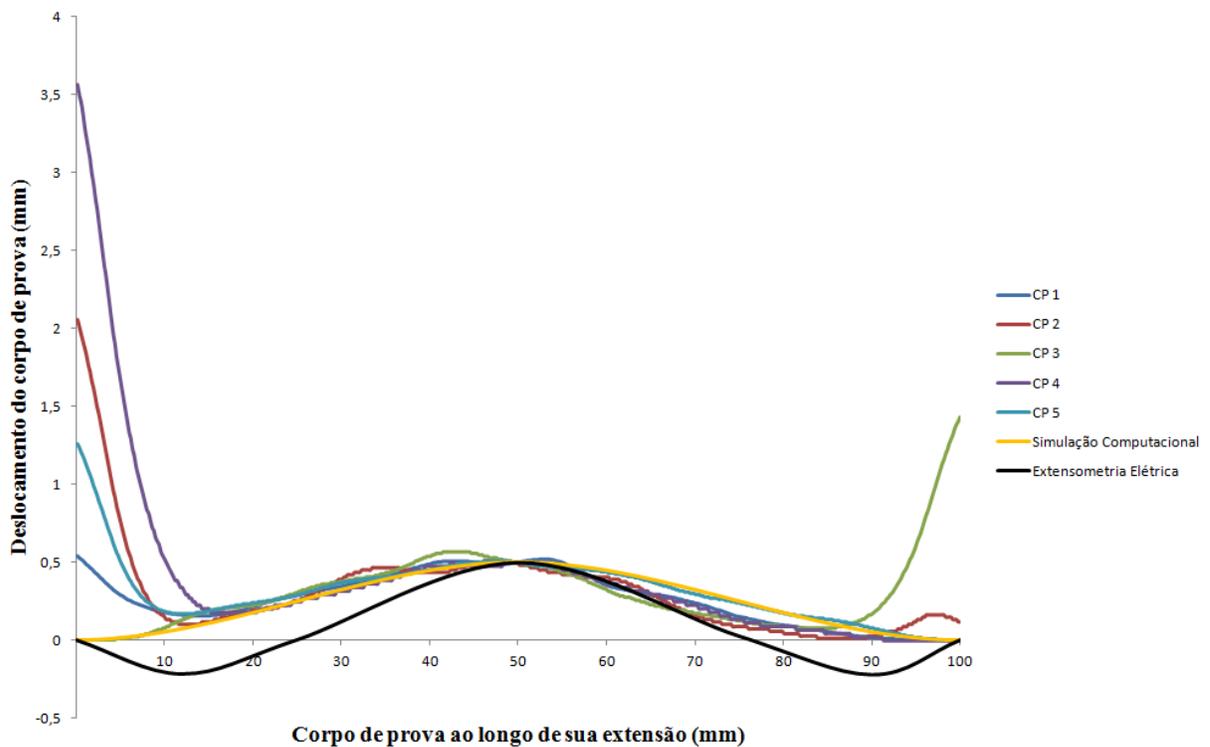


Figura 41. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 0,5 mm.

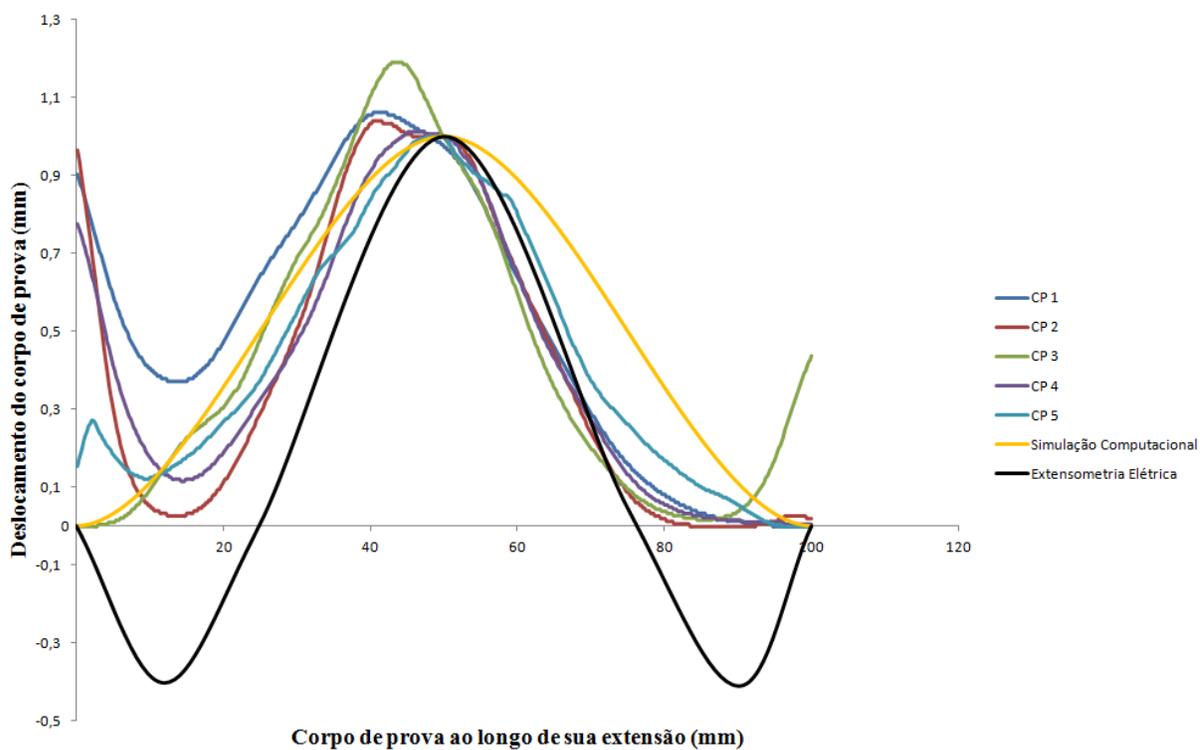


Figura 42. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 1,0 mm.

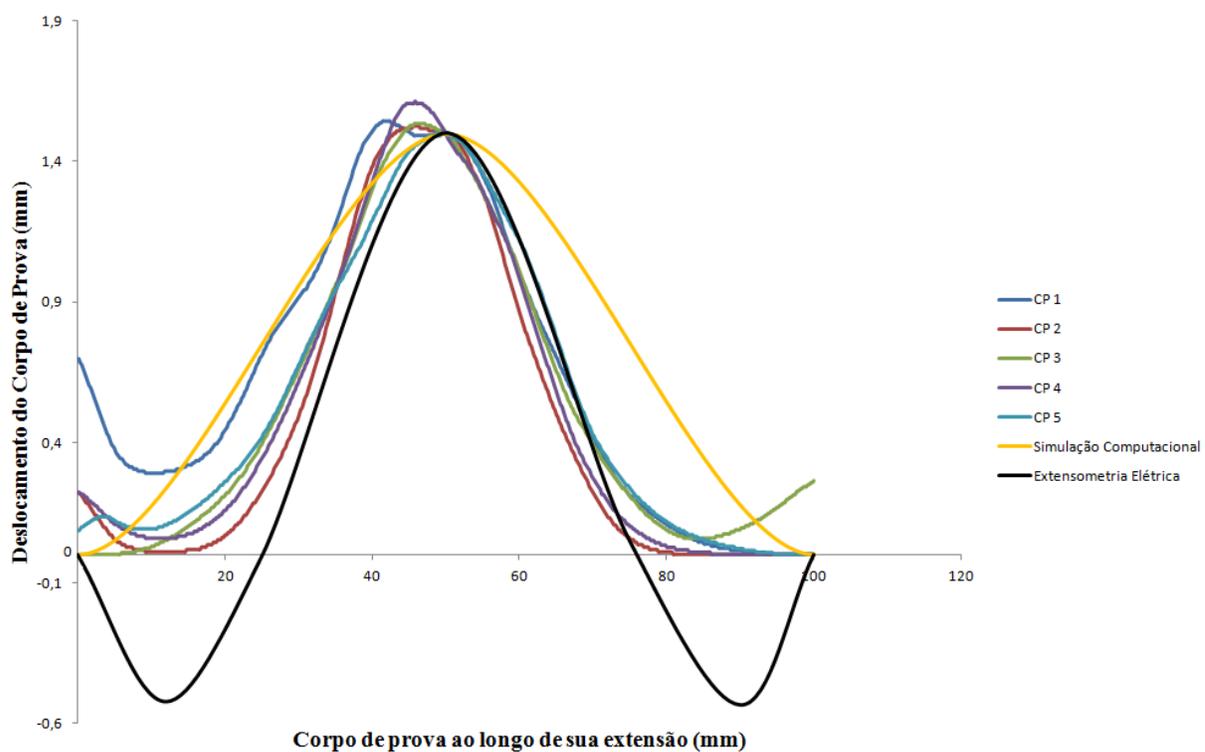


Figura 43. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 1,5 mm.

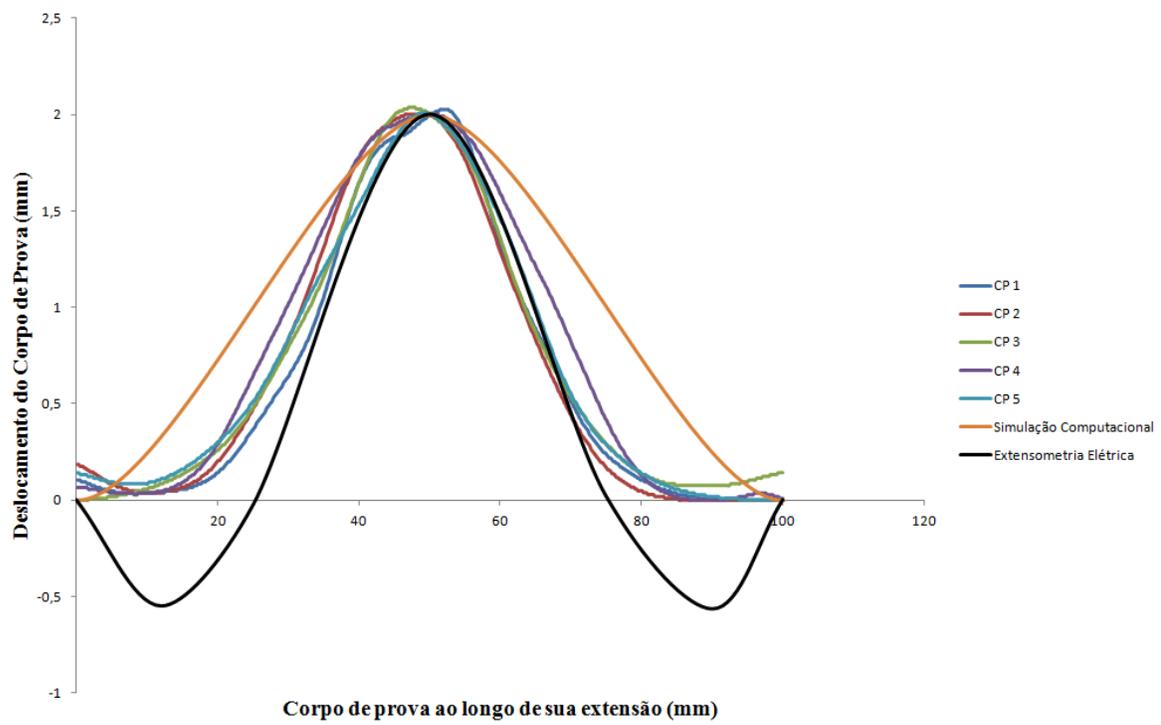


Figura 44. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 2,0 mm.

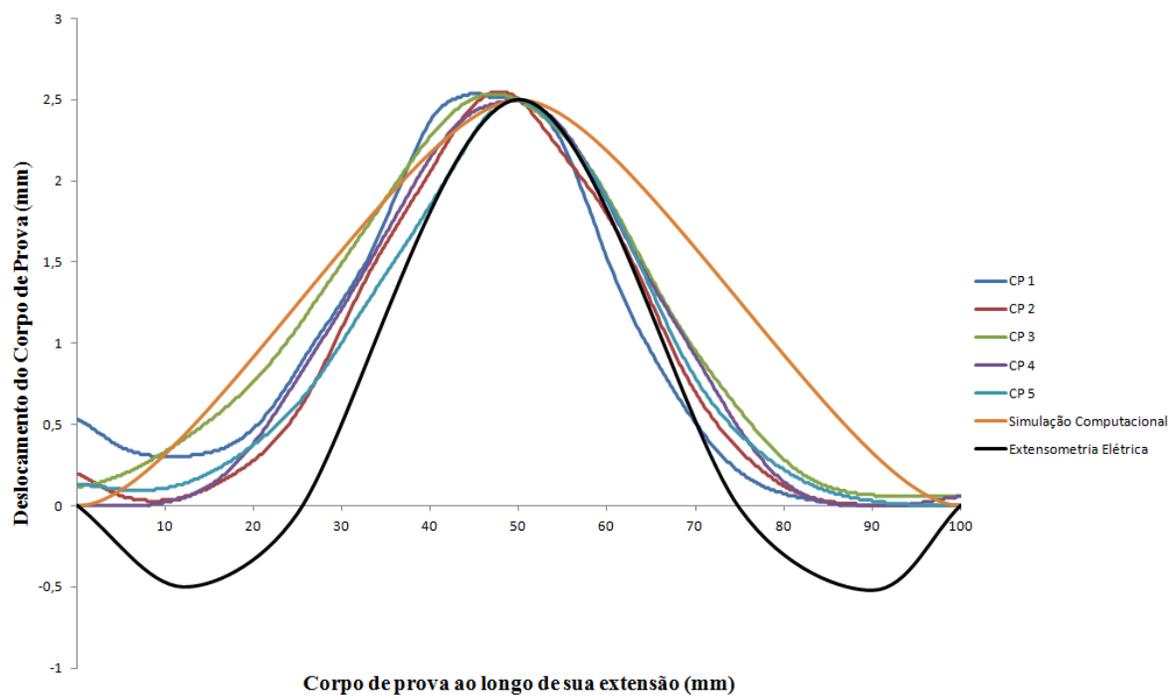


Figura 45. Curva de deslocamento do corpo de prova para deslocamento total de 2,5 mm.

Para analisar melhor a confiabilidade dos dados de deslocamento para cada tipo de técnica, os resultados quantitativos obtidos pelo método de *moiré*, por simulação computacional e por extensometria elétrica foram comparados. As tabelas 02 à 06 mostram a média dos dados de deslocamento obtidos pela técnica de *moiré* e foram comparados com os resultados obtidos pela técnica de extensometria elétrica e simulação computacional. Para este trabalho de pesquisa, os pontos de análise adotados para comparação são baseados no mesmo ponto de medida obtido pela técnica de extensometria elétrica.

Tabela 02. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 0,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [mm]						Simulação Computacional [mm]	Extensometria Elétrica [mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	0,542	2,060	0,000	3,568	1,261	1,48±1,25	0,000	0,000±0,00
12	0,159	0,106	0,132	0,341	0,169	0,18±0,08	0,073	-0,226±0,02
25	0,289	0,257	0,302	0,250	0,288	0,27±0,02	0,250	0,003±0,03
50	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,50±0,00	0,500	0,500±0,00
75	0,151	0,091	0,122	0,136	0,238	0,15±0,05	0,250	0,025±0,03
90	0,168	0,030	0,165	0,023	0,077	0,09±0,06	0,053	-0,223±0,01
100	0,000	0,121	1,434	0,000	0,000	0,31±0,56	0,000	0,000±0,00

Tabela 03. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,0 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [mm]						Simulação Computacional [mm]	Extensometria Elétrica [mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	0,903	0,966	0,000	0,775	0,155	0,56±0,44	0,000	0,000±0,00
12	0,379	0,149	0,149	0,135	0,141	0,19±0,10	0,151	-0,403±0,07
25	0,641	0,478	0,478	0,324	0,373	0,46±0,12	0,499	0,005±0,05
50	1,000	1,00	1,000	1,000	1,000	1,00±0,0	1,000	1,000±0,00
75	0,159	0,088	0,096	0,132	0,263	0,15±0,07	0,499	0,046±0,07
90	0,014	0,000	0,039	0,016	0,056	0,03±0,02	0,110	-0,411±0,04
100	0,000	0,000	0,438	0,005	0,000	0,09±0,19	0,000	0,000±0,00

Tabela 04. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [mm]						Simulação Computacional [mm]	Extensometria Elétrica [mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	0,698	0,218	0,000	0,223	0,085	0,25±0,27	0,000	0,000±0,00
12	0,297	0,009	2,379	0,058	0,106	0,57±1,02	0,236	-0,523±0,11
25	0,705	0,222	0,391	0,338	0,415	0,41±0,18	0,749	-0,007±0,06
50	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,50±0,00	1,500	1,500±0,00
75	0,208	0,057	0,209	0,099	0,239	0,16±0,08	0,749	0,049±0,11
90	0,015	0,000	0,091	0,000	0,021	0,03±0,04	0,173	-0,053±0,06
100	0,000	0,000	0,263	0,000	0,000	0,05±0,12	0,000	0,000±0,00

Tabela 05. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,0 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [mm]						Simulação Computacional [mm]	Extensometria Elétrica [mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	0,105	0,185	0,000	0,066	0,142	0,10±0,07	0,000	0,000±0,00
12	0,038	0,039	0,095	0,047	0,109	0,11±0,14	0,329	-0,551±0,11
25	0,362	0,468	0,476	0,638	0,512	0,49±0,10	0,998	-0,029±0,05
50	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,00±0,00	2,000	2,000±0,00
75	0,238	0,171	0,295	0,418	0,294	0,28±0,09	0,998	-0,019±0,12
90	0,010	0,000	0,076	0,000	0,019	0,02±0,03	0,243	-0,566±0,06
100	0,000	0,000	0,143	0,009	0,000	0,03±0,06	0,000	0,000±0,00

Tabela 06. Dados de deslocamento pontual fora do plano do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [mm]						Simulação Computacional [mm]	Extensometria Elétrica [mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	0,531	0,193	0,115	0,000	0,129	0,19±0,20	0,000	0,000±0,00
12	0,302	0,048	0,403	0,059	0,129	0,18±0,16	0,428	-0,503±0,11
25	0,833	0,580	1,094	0,786	0,622	0,79±0,20	1,248	-0,046±0,046
50	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,50±0,00	2,500	2,500±0,00
75	0,205	0,338	0,588	0,469	0,434	0,41±0,14	1,248	-0,021±0,10
90	0,000	0,000	0,069	0,000	0,029	0,02±0,03	0,320	-0,524±0,08
100	0,000	0,000	0,058	0,059	0,000	0,02±0,03	0,000	0,000±0,00

As Figuras 46 à 50 mostram o comportamento da curva de deformação específica ao longo do comprimento do corpo de prova para os ensaios experimentais de *moiré* e extensometria elétrica e a simulação computacional. Vale ressaltar que as deformações e tensões aqui mostradas referem-se apenas às tensões principais máximas (ϵ_{11} e σ_{11}). As deformações e tensões mínimas (ϵ_{22} e σ_{22}) e de cisalhamento (ϵ_{12} e σ_{12}) não foram abordadas pelo fato da tensão mínima ser muito baixa, como mostraram os resultados preliminares da

simulação computacional, os resultados das deformações e tensões principais podem ser comparados com os resultados obtidos pela extensometria elétrica.

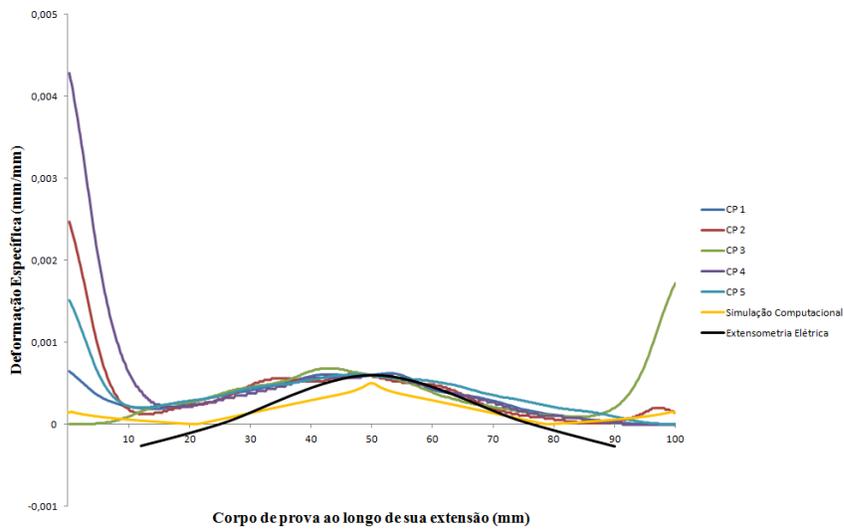


Figura 46. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 0,5 mm.

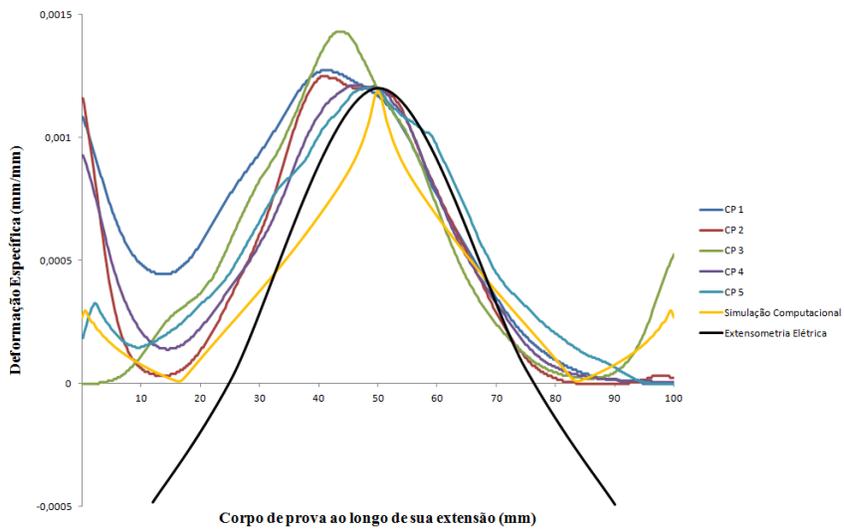


Figura 47. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 1,0 mm.

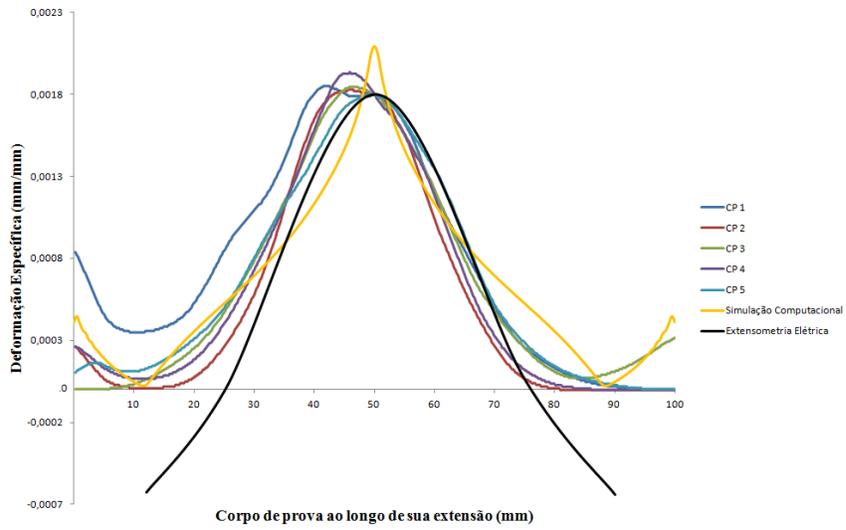


Figura 48. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 1,5 mm.

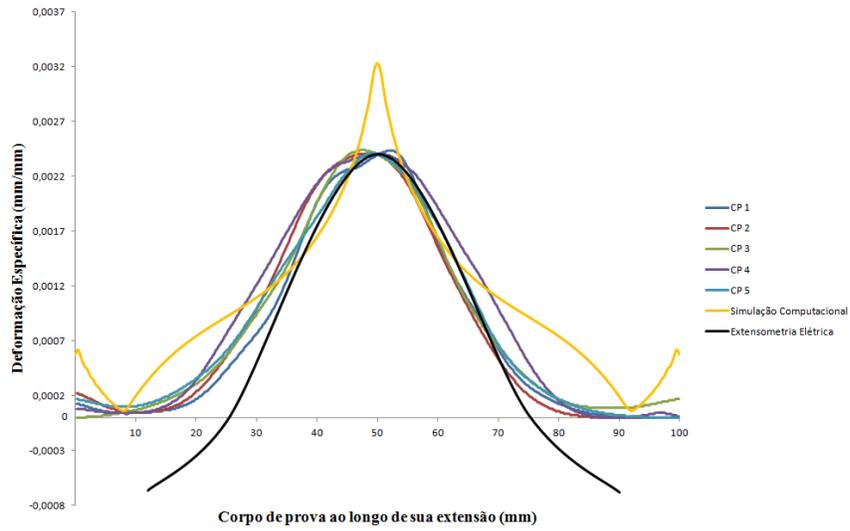


Figura 49. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 2,0 mm.

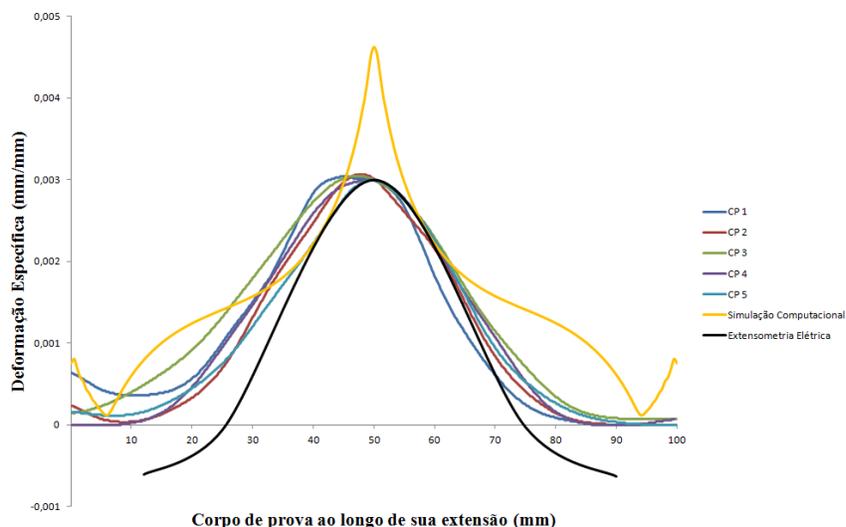


Figura 50. Curva de deformação específica do corpo de prova para deslocamento total de 2,5 mm.

As tabelas 07 à 11 mostram a média dos dados de deformação específica obtidos pela técnica de *moiré*, assim como feito anteriormente para os dados de deslocamento.

Tabela 07. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 0,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [$\times 10^{-4}$ mm/mm]						Simulação Computacional [$\times 10^{-4}$ mm/mm]	Extensometria Elétrica [$\times 10^{-4}$ mm/mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média \pm Des. Pad.		
0	6,51	24,73	0,00	42,81	15,14	17,84\pm16,80	1,37	-
12	1,94	1,27	1,53	4,10	2,03	2,17\pm1,12	0,47	-2,22 \pm 0,32
25	3,48	3,10	3,62	3,00	3,46	3,33\pm0,27	0,60	-0,02 \pm 0,32
50	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00\pm0,00	5,02	6,00 \pm 0,00
75	1,81	1,10	1,47	1,64	2,86	1,78\pm0,66	0,60	0,30 \pm 0,45
90	0,20	0,36	1,98	0,27	0,92	0,75\pm0,74	0,60	-2,68 \pm 0,22
100	0,00	1,45	17,20	0,00	0,00	3,73\pm7,55	1,37	-

Tabela 08. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,0 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [$\times 10^{-4}$ mm/mm]						Simulação Computacional [$\times 10^{-4}$ mm/mm]	Extensometria Elétrica [$\times 10^{-4}$ mm/mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média \pm Des. Pad.		
0	10,84	11,60	0,00	9,30	1,86	6,72\pm5,39	2,70	-
12	4,55	0,41	1,78	1,61	1,70	2,01\pm1,52	0,51	-4,84 \pm 0,79
25	7,70	3,46	5,73	3,89	4,48	5,05\pm1,70	-0,70	0,06 \pm 0,6
50	11,71	12,00	12,00	12,00	12,00	11,94\pm0,12	11,85	12,00 \pm 0,00
75	1,90	1,06	1,14	1,58	3,15	1,77\pm0,84	2,36	0,55 \pm 0,88
90	0,16	0,00	0,47	0,19	0,67	0,30\pm0,27	0,76	-4,94 \pm 0,44
100	0,00	0,25	5,25	0,06	0,00	1,11\pm2,31	2,70	-

Tabela 09. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [$\times 10^{-4}$ mm/mm]						Simulação Computacional [$\times 10^{-4}$ mm/mm]	Extensometria Elétrica [$\times 10^{-4}$ mm/mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média \pm Des. Pad.		
0	8,37	2,61	0,00	2,67	1,01	2,93\pm3,24	4,10	-
12	3,56	0,10	0,61	0,70	1,26	1,25\pm1,35	0,27	-6,28 \pm 1,36
25	8,46	2,66	4,70	4,05	5,00	4,98\pm2,15	5,24	-0,08 \pm 0,66
50	18,00	18,00	18,00	18,04	18,00	18,01\pm0,02	20,91	18,00 \pm 0,00
75	2,50	0,68	2,50	1,18	2,87	1,95\pm0,95	5,24	0,60 \pm 1,37
90	0,18	0,00	1,05	0,00	0,25	0,30\pm0,43	0,47	-6,41 \pm 0,78
100	0,00	0,00	3,16	0,00	0,00	0,63\pm1,41	4,10	-

Tabela 10. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,0 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [$\times 10^{-4}$ mm/mm]						Simulação Computacional [$\times 10^{-4}$ mm/mm]	Extensometria Elétrica [$\times 10^{-4}$ mm/mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média \pm Des. Pad.		
0	1,25	2,22	0,00	0,79	1,70	1,20\pm0,85	5,72	-
12	0,46	0,47	1,03	0,56	1,31	0,77\pm0,38	3,35	-6,61 \pm 1,41
25	4,34	5,61	5,71	7,66	6,14	5,89\pm1,19	9,17	-0,36 \pm 0,65
50	24,00	24,00	24,06	24,00	24,00	24,01\pm0,03	32,36	24,00 \pm 0,00
75	2,85	2,05	3,54	5,01	3,52	3,39\pm1,09	9,17	0,24 \pm 1,44
90	0,11	0,00	0,91	0,00	0,23	0,25\pm0,38	1,90	-6,79 \pm 0,81
100	0,00	0,00	1,71	0,11	0,00	0,36\pm0,75	5,72	-

Tabela 11. Dados de deformação específica pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [$\times 10^{-4}$ mm/mm]						Simulação Computacional [$\times 10^{-4}$ mm/mm]	Extensometria Elétrica [$\times 10^{-4}$ mm/mm]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média \pm Des. Pad.		
0	6,38	2,32	1,38	0,00	1,55	2,32\pm2,41	7,57	-
12	3,62	0,58	4,83	0,56	1,55	2,22\pm1,91	7,95	-6,04 \pm 1,40
25	10,00	6,95	13,13	9,43	7,46	9,39\pm2,45	14,10	-0,55 \pm 0,56
50	30,00	30,07	30,00	30,00	30,00	30,01\pm0,03	46,22	30,00 \pm 0,00
75	2,46	4,06	7,05	5,63	5,21	4,88\pm1,72	14,10	-0,25 \pm 1,26
90	0,00	0,00	0,83	0,00	0,35	0,24\pm0,36	6,10	-6,28 \pm 0,99
100	0,00	0,00	0,69	0,70	0,00	0,28\pm0,38	7,57	-

As Figuras 51 à 55 mostram o comportamento da curva de tensão ao longo do comprimento do corpo de prova para os ensaios experimentais de *moiré* e extensometria elétrica, e a simulação computacional.

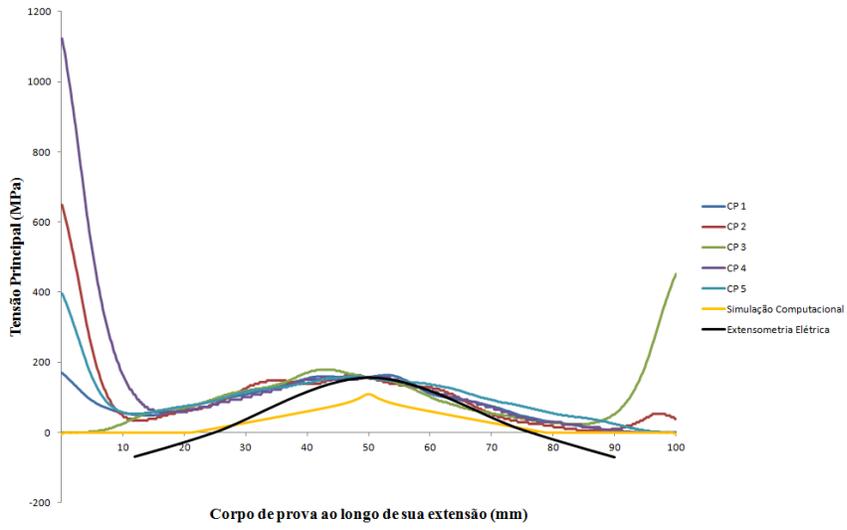


Figura 51. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 0,5 mm.

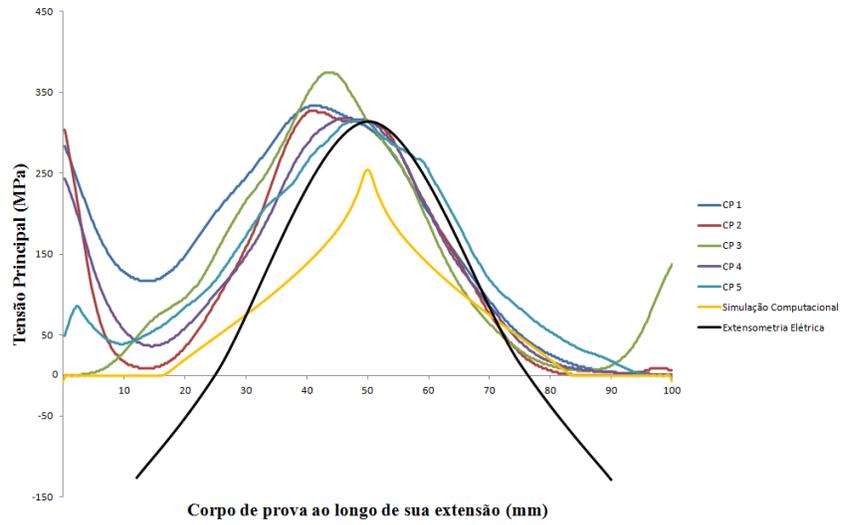


Figura 52. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 1,0 mm.

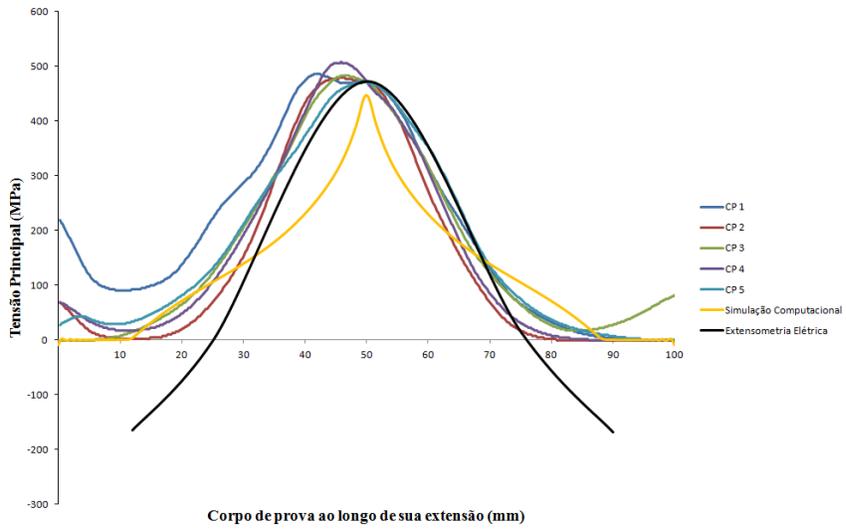


Figura 53. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 1,5 mm.

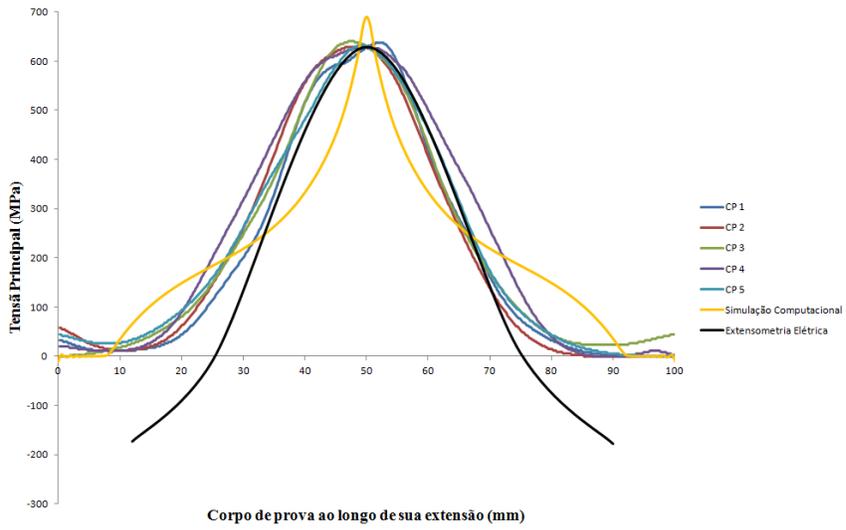


Figura 54. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 2,0 mm.

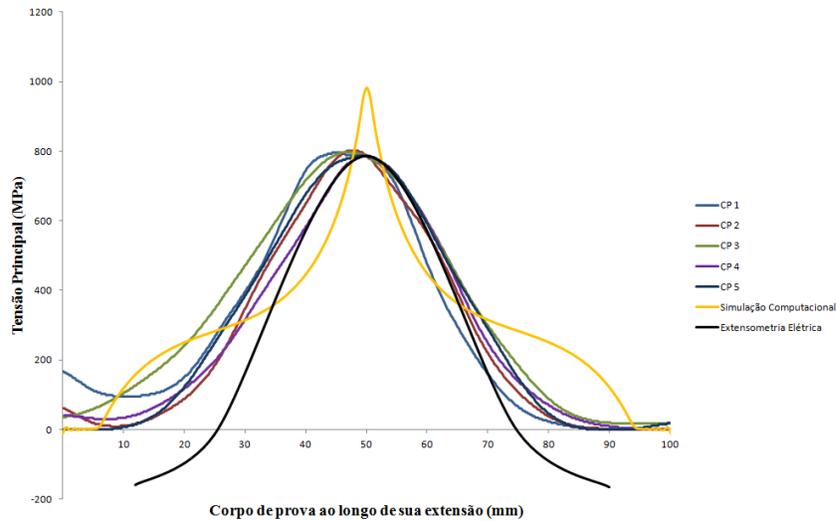


Figura 55. Curva de tensão do corpo de prova para deslocamento total de 2,5 mm.

As tabelas 12 à 16 mostram a média dos dados de tensão obtidos pela técnica de *moiré*, assim como calculado anteriormente para os dados de deslocamento.

Tabela 12. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 0,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [MPa]						Simulação Computacional [MPa]	Extensometria Elétrica [MPa]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	170,4	648,1	0,0	1122,2	396,7	467,5±439,6	0,00	-
12	50,9	33,3	40,0	107,2	53,2	56,9±29,3	-0,0021	-68,80±10,24
25	91,2	81,0	94,9	78,6	90,7	87,3±7,1	11,98	0,58±8,37
50	157,2	157,2	157,2	157,2	157,2	157,2±0,0	108,53	157,25±0,00
75	47,57	28,6	38,6	42,9	75,0	46,5±17,4	11,98	7,99±11,72
90	5,28	9,5	51,9	7,1	24,2	19,6±19,5	-0,0085	-70,37±5,74
100	0,0	38,12	451,0	0,0	0,0	97,8±198,1	0,00	-

Tabela 13. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,0 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [MPa]						Simulação Computacional [MPa]	Extensometria Elétrica [MPa]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	284,1	303,8	0,0	243,6	48,7	176,0±141,2	0,000	-
12	119,3	10,7	46,83	42,3	44,3	52,7±40,0	0,010	-126,85±20,73
25	201,7	90,9	150,2	102,0	117,4	132,4±44,7	47,4	1,60±15,41
50	306,9	314,5	314,5	314,5	314,5	313,0±3,4	254,7	314,5±0,00
75	49,9	27,8	30,0	41,5	82,7	46,4±22,2	47,4	14,46±22,83
90	4,33	0,0	12,4	5,2	17,7	7,9±7,0	-0,0103	-129,3±11,55
100	0,0	6,4	137,8	1,7	0,0	29,2±60,8	0,000	-

Tabela 14. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 1,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [MPa]						Simulação Computacional [MPa]	Extensometria Elétrica [MPa]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	219,5	68,6	0,00	70,0	26,6	77,0±85,0	-9,3	-
12	93,4	2,7	16,1	18,1	33,2	32,7±35,6	3,2	-185,73±62,16
25	221,9	70,0	123,1	106,3	130,7	130,4±56,2	104,9	-2,76±17,49
50	471,7	471,7	471,7	473,0	471,7	472,0±0,6	446,9	471,7±0,00
75	65,4	17,8	65,6	31,1	75,3	51,0±25,0	104,9	20,10±40,66
90	4,7	0,00	27,6	0,0	6,6	7,8±11,5	0,12	-188,60±48,46
100	0,00	0,00	82,8	0,0	0,0	16,6±37,0	-9,3	-

Tabela 15. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,0 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [MPa]						Simulação Computacional [MPa]	Extensometria Elétrica [MPa]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	32,9	58,3	0,0	20,7	44,7	31,3±22,4	0,00	-
12	12,0	12,3	26,9	14,7	34,3	20,1±10,1	65,20	-173,36±36,85
25	113,8	147,3	149,7	200,8	161,0	154,5±31,3	183,40	-9,31±17,00
50	629,0	629,0	630,5	629,0	629,0	629,3±0,7	689,20	629,00±0,00
75	74,9	53,7	92,8	131,4	92,4	89,1±28,6	183,40	6,18±37,82
90	3,0	0,0	23,9	0,0	5,9	6,6±10,0	34,00	-178,14±21,11
100	0,0	0,0	44,9	2,9	0,0	9,56±19,8	0,00	-

Tabela 16. Dados de tensão pontual do corpo de prova para taxa de deslocamento de 2,5 mm

Ponto de Medição	Ensaio de <i>Moiré</i> [MPa]						Simulação Computacional [MPa]	Extensometria Elétrica [MPa]
	C1	C2	C3	C4	C5	Média ± Des. Pad.		
0	167,1	60,8	36,2	0,0	40,6	61,0±63,3	0,00	-
12	95,0	15,2	126,8	14,8	40,6	58,5±50,3	157,50	-158,25±36,77
25	262,1	182,3	344,2	247,3	195,6	246,3±64,2	282,10	-14,40±14,62
50	786,3	788,2	786,3	786,3	786,3	786,7±0,8	982,20	786,3±0,00
75	64,6	106,4	184,8	147,6	136,6	128,0±45,2	282,10	-6,48±33,12
90	0,0	0,0	21,7	0,0	9,2	6,2±9,5	117,70	-164,74±25,97
100	0,0	0,0	18,1	18,5	0,0	10,9±10,0	0,00	-

Analisando-se os resultados por extensometria elétrica, apresentados nas Figuras 38 à 40, percebe-se que o comportamento da curva obtida apresenta uma variação entre as repetições. Também nota-se que esta variação é maior nas extremidades do corpo de prova que em relação à parte central, onde ocorreu a aplicação da carga no corpo de prova. Este mesmo comportamento é observado nas curvas obtidas pela técnica de *moiré*; portanto, a variação das curvas podem ser recorrentes do ensaio de carregamento, propriamente dito e não simplesmente pela técnica óptica avaliada.

Analisando as curvas características de deslocamento (ou deformação total) do corpo de prova, apresentados nas Figuras 41 à 45, é possível afirmar que os resultados mostraram que seu comportamento apresentaram relação entre si, ou seja, há uma clara concordância entre as envergadura das curvas deformadas obtidas tanto para simulação computacional, quanto para extensometria elétrica e técnicas de *moiré*. Porém, algumas divergências puderam ser observadas, tais como, na extensometria elétrica, há uma região localizada nas extremidades que mostra que um corpo de prova bi-engastado apresenta uma região de deformação negativa (quando se toma as regiões de engastamento como referencial nulo), fato esse não observado nas curvas obtidas pelos demais ensaios. A curva obtida pela simulação computacional mostra uma concavidade mais aberta que os resultados experimentais. Para as curvas obtidas pela técnica de *moiré*, na média, pode-se afirmar que mostraram comportamentos intermediários entre os resultados obtidos pela técnica de extensometria elétrica e simulação computacional, porém, com resultados mais próximos para a extensometria, exceto para o gráfico da Figura 44. Comparando a curva de deslocamento obtida pela técnica de extensometria elétrica com os resultados da simulação computacional, percebe-se claramente que há certa distância entre os resultados teóricos esperados, com os resultados experimentais. É esperado que a curva obtida pela técnica de *moiré* gere resultados mais próximos dos resultados obtidos pela extensometria elétrica, uma vez que ambos são resultados de cunho experimental.

Analisando-se as curvas de deformação específica e de tensão apresentadas nas Figuras de 46 à 50 e de 51 à 55, respectivamente, percebe-se que há grande concordância em relação ao comportamento dos resultados experimentais obtidos pela técnica de *moiré* com os resultados obtidos pela extensometria elétrica. Observa-se que nas bordas houve certa discrepância nos resultados experimentais, onde a deformação específica e a tensão apresentaram módulos negativos para os resultados obtidos por extensometria elétrica, fato não observado para os resultados obtidos por *moiré*. A curva média dos dados de extensometria elétrica, plotada nos gráficos, apresentou certa proximidade das curvas obtidas por *moiré*. A técnica de *moiré* não gerou, considerando o processamento de imagens adotado para esse trabalho, obter regiões com dados negativos, pois não há valores de pixels negativos. Para tal, estes valores se aproximam do valor modular nulo.

Com relação aos resultados teóricos, pode-se afirmar que houve certa discrepância nos dados obtidos. A curva gerada pela simulação computacional indicou uma deformação específica bastante próxima dos resultados obtidos por *moiré* nas bordas, porém o mesmo não ocorreu para os resultados de tensão, onde essa borda gerou valores próximos a zero. As curvas de tensão e deformação obtidas pela simulação computacional apresenta um comportamento que revela um pico na região central do corpo de prova, o qual não foi observado junto aos resultados dos ensaios experimentais, mas mostrou-se crescente à medida que o carregamento era ampliado. Timoshenko e Gere (1984) relatam que teoricamente esse comportamento é esperado na curva de tensão e deformação, uma vez que o pico ocorre devido à deformação plástica do material.

Em síntese, o comportamento das curvas de tensão e deformação específica apresentou uma proximidade maior com a curva gerada pela extensometria elétrica quando comparado com a curva gerada por simulação computacional. A afirmação da proximidade entre os dados experimentais de extensometria elétrica e *moiré* mostra que a TM é capaz de gerar resultados próximos do valor experimental que do valor teórico. Os resultados mostraram que a região intermediária, situada entre 25 e 75 mm da extensão do corpo de prova apresentaram dados muito próximos. Apesar desta proximidade observada, houve variação entre as curvas obtidas experimentalmente. É esperada certa variação para cada curva obtida independente da técnica experimental utilizada, pois, as repetições foram realizadas em corpos de prova distintos tanto para as curvas obtidas pela técnica de *moiré* quanto por extensometria elétrica, como mostram os gráficos A.6 à A.10 (Apêndice).

Os dados apresentados nas Tabelas 02 à 16 mostraram que os dados de campo de deslocamento, tensão e deformação específica obtidos pela técnica de *moiré* foram medianos entre os dados obtidos pela extensometria elétrica e simulação computacional. Não houve um comportamento que permitisse determinar a proximidade dos dados obtidos pela técnica de *moiré*. No geral, pode-se afirmar que nas bordas a técnica de *moiré* apresentou dados próximos aos dados obtidos pela simulação computacional, enquanto que na região central (25 à 75 mm) os dados se aproximaram do resultados obtidos pela extensometria elétrica. Outro fato que chamou a atenção esteve no alto desvio padrão observado para os resultados obtidos por *moiré*. O desvio padrão variou de acordo com a região analisada e com a taxa de carregamento aplicada. Analisando os dados obtidos, foi observado que o desvio padrão foi

maior nas regiões de borda que na região central. Com relação à variação da taxa de carregamento, observou-se que, para maiores taxas de carregamento, o desvio padrão dos resultados foi menor. De uma forma geral, o desvio padrão foi considerado alto, porém, analisando os resultados obtidos pela extensometria elétrica, observou-se que também foi alto o desvio padrão dos resultados experimentais obtidos. Isto permite afirmar que o alto índice no desvio padrão ocorreu mais por causa das condições experimentais de carregamento do que por imprecisão do método analisado.

Analisando as curvas obtidas pela técnica de *moiré*, percebe-se que os resultados mais confiáveis estão na região central do corpo de prova. As extremidades apresentaram certa distorção. Essa distorção ocorreu devido aos efeitos de borda provavelmente por problemas de iluminação, conforme relatado por Braga et. al. (2009) ou distorções recorrentes do processamento das imagens, principalmente na aplicação de filtros, tais como, o Gaussian Blur. Também é notado que a curva é mais coerente com os dados comparativos quanto maior for o deslocamento provocado. Também nota-se que os efeitos de borda são menos expressivos à medida que se aumenta a carga aplicada. Esse comportamento acima citado é notado principalmente nos carregamentos que promoveram deslocamentos de 2,0 e 2,5 mm, onde a curva é visualmente mais nítida que em relação às demais. Esse efeito pode ser explicado pela natureza da técnica de *moiré* por *phase-shifting*, o qual gera franjas padrões através da interferência entre as grades referencial e objeto e que, quanto maior for o deslocamento do corpo de prova, melhor será a interferência entre as grades e conseqüentemente a curva torna-se mais nítida. Portanto, a aplicação da técnica de *moiré* por *phase-shifting* para uso como técnica fotomecânica está condicionada à deformação aplicada sobre o corpo de prova. A aplicação de grades mais densas (de menor período) poderia ser empregada para se gerar curva mais nítida correspondentes à deformações menores, porém, este trabalho de pesquisa ficou limitado na qualidade dos equipamentos de projeção da grade, i.e., para este trabalho de pesquisa o período da grade foi de 2 mm. Grades de maior densidade apresentavam franjas de *moiré* na projeção e essas influenciaram os resultados obtidos. Essa franja é recorrente da interpolação dos pixels projetados pelo equipamento *multimídia*, mesmo sendo sua resolução igual à do computador (1280x768). A densidade adequada foi obtida experimentalmente projetando-se a grade sobre o corpo de prova. Espera-se de trabalhos

futuros, a análise da qualidade de equipamentos para obtenção de resultados menos sujeitos a esses efeitos distorsivos.

Também é notado nos resultados obtidos pela técnica de *moiré* que uma das extremidades apresenta uma inclinação com relação à outra, ou seja, enquanto uma borda está no eixo zero, a outra borda apresenta valores fora deste ponto e que são discordantes com os resultados de simulação computacional e extensometria. A ocorrência dessa distorção foi esperada. Essa inclinação é provocada por duas razões, às quais estão associadas ao ensaio de carregamento e de arranjo experimental dos equipamentos de ensaio fotomecânico. Em relação às razões de ensaio de carregamento, a inclinação foi provocada pela deflexão dos pilares de apoio do dispositivo de carregamento, como foi comprovado na Figura 30 que mostra a movimentação do conjunto quando aplicada a carga. Com relação ao arranjo experimental dos equipamentos de ensaio fotomecânico, a inclinação está relacionada à posição do projetor *multimídia* e da câmera digital. A câmera digital foi posicionada frontalmente ao corpo de prova e à mesma altura do ponto mediano do corpo de prova, porém, o projetor foi levemente deslocado para baixo do ponto mediano do corpo de prova. Esse deslocamento gera certa distorção no período ao longo do comprimento da grade, formando assim essa distorção dos dados de deslocamento no que tange às suas extremidades.

6. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos neste trabalho de pesquisa, é possível afirmar que:

1. Qualitativamente, a técnica de *moiré* é eficaz e viável em fornecer mapa de campo de deslocamento (ou deformação total). Os mapas qualitativos de tensão e deformação específica, não foram concordantes com o mapa qualitativo obtido pela técnica de *moiré*. Este dado mostra que, para um corpo de prova bi-engastado e com carregamento fletor, onde a curva de deslocamento difere teoricamente do comportamento da curva de tensão e deformação, a técnica de *moiré* é hábil apenas em obter o campo de deslocamento (deformação total).
2. Quantitativamente, os resultados de deslocamento (deformação total), tensão e deformação específica estão em conformidade com os resultados experimentais obtidos pela extensometria elétrica. A curva de deslocamento gerada por dados teóricos apresentou correlação com a curva obtida pela técnica de *moiré*, porém, o mesmo não foi verificado para o comportamento das curvas de tensão e deformação específica. Houve concordância entre as curvas de deslocamento, deformação específica e tensão obtida pela extensometria elétrica. Essa observação permite concluir que os dados de tensão e deformação obtidos pela técnica de *moiré* são de caráter experimental, o que reforça a importância do uso dessa técnica para ensaios de inspeção não destrutivos. Portanto, assumindo que os resultados experimentais apresentaram elevada correlação, pode-se afirmar que a técnica de *moiré*, quando associada à metodologia híbrida, foi eficaz e viável para determinar quantitativamente a tensão e a deformação específica.
3. O uso da técnica de *moiré* por *phase-shifting* apresenta certa restrição para baixas taxas de deformação do corpo de prova. Para mapas qualitativos, essa sensibilidade foi menor que a sensibilidade apresentada para obtenção de dados quantitativos.

Portanto, conclui-se que a técnica de *moiré* por *phase-shifting* é amplamente viável para obter dados de deslocamento, tensão e deformação específica quantitativamente. Qualitativamente, para o caso estudado, a técnica apresentou confiabilidade apenas para analisar o campo de deslocamento. A forma como são obtido os dados abre um leque para a automação do sistema de obtenção e tratamento de dados e obtenção de resultados, o que favorece o uso industrial desta técnica para controle de qualidade de produtos.

Ao final deste trabalho de pesquisa sugere-se uma análise da técnica de *moiré* para outros tipos de carregamento. Também é sugerida a análise da técnica de *moiré* em casos onde haja uma correlação teórica entre as curvas de deslocamento (deformação total) com o comportamento entre as curvas de tensão e deformação. Da mesma forma, é sugerida a análise da influência dos equipamentos na obtenção de dados de deslocamento, tensão e deformação específica pela técnica de *moiré* por *phase-shifting*.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, E. A. **Extensometria óptica por *moiré* geométrico digital para análise de tensões no plano**. 225 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2011.

AFFONSO, E.A.; DAL FABBRO, I.M.; DEMARZO, M.A. Application of a *moiré* technique in studying wooden structural connections. **Revista Ciência e Tecnologia**. Campinas, n° VIII, n. 12, pp.61-65. Campinas, SP, Brasil, junho de 2005.

ALBIERO, D.; LOURENÇO, L. S.; BERALDO, A. L.; RODRIGUES, S.; DAL FABBRO, I. M.; MACIEL, A. J. S. Determination of Wood specimens using isostrain patterns generated for *moiré* technique. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 1, pp. 15-24, 2007.

ALMEIDA, P. A. O.; MARTÍNEZ, O. J. L. M. **Fabricação e caracterização de películas para fotoelasticidade de reflexão**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, SP, Brasil, 1996.

AJOVALASIT, A. **Breve guida alla scelta dei metodi di analisi sperimentale delle tensioni**, 1998. Acessado em Jul. 2010. Disponível em: <<http://dmti.unifi.it/aias/articoli/not%2084/ajovalasit.html>>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E855 - 08**. Standard Test Methods for Bend Testing of Metallic Flat Materials for Spring Applications Involving Static Loading. Pittsburgh, 2009.

ASSAN, A. E. **Método dos Elementos Finitos**. Ed. Unicamp, Campinas, Brasil, 2.003.

BASTOS, L. F.; TAVARES, J. M. R. S. Um sistema de ferramentas de processamento e análise de imagens de *moiré*: apresentação. **In**: 5º Encontro Nacional de Análise de Tensões e Mecânica Experimental, Coimbra, 21 - 23 Janeiro, 2004.

BRAGA Jr. R. A., OLIVEIRA, B. S., COSTA, R. M., LINO, A. C. L., DAL FABBRO, I. M. Supression of Border Effects in Moiré Techniques Using Three-Dimensional Methods. **Automation and Emerging Technologies**. V. 102, n. 1, pp. 1-8, jan., 2009.

BUYTAERT, J. A. N.; DIRCKX, J. J. J. *Moiré* perfilometry using liquid crystals for projection and demodulation. **Optic Express**, v.16, n.1, pp. 179-193, jan., 2008.

CAVACO, M. A. M.; SILVA, D. M. S. Métodos Híbridos Experimentais na Análise de Tensões em Dutos. **In: 6ª Conferência sobre tecnologia e equipamentos**, Salvador, Brasil, 2002.

CHEN, W. F.; HAN, D. J. **Plasticity for Structural Engineers**. New York: Ed. Springer-Verlag, 1987.

CHIANG, F. P. **Moiré Methods of Strain Analysis**. Manual on Experimental Stress Analysis. York: Ed. SESA. v.1. p 290-308. Ago. 1979.

COELHO, C. P.; TAVARES, J. M. R. S. Técnicas Base para Aquisição de Informação Tri-dimensional sem Contacto: Uma Descrição. **Revista Electrónica de Sistemas da Informação**. v. 2, n. 1, pp. 1 – 11. Jul. 2003.

COSTA, R. **Proposta de um processo de captura e análise de imagens para determinação de forma e superfície de materiais biológicos pela técnica de moiré**. 35 p. Monografia de conclusão de curso em Ciências da Computação, Universidade Federal de Lavras, 2006.

DOYLE, J. F. **Modern Experimental Stress Analysis: Completing the solution of partially specified problems**. Ed. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, England, 2004.

DOYLE, J. F. **Hybrid Methods**. Springer Handbook of Solid Mechanics, Ed. Sharpe, New York, 2008.

FONSECA, J. **Ferramentas de Simulação em Mecânica: Elementos Finitos**. Notas de Aula, 2.002.

GAZZOLA, J. **Aplicação de Técnica Óptica no Estudo da Distribuição de Tensões em Modelos Reduzidos de Feixe de Toras e Peças Serradas**. 151 p. Dissertação de Mestrado

em Engenharia Agrícola – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2011.

GAZZOLA, J.; DAL FABBRO, I. M.; RODRIGUES, S. Mechanical Properties of *Eucalyptus Grandis* Assisted By a *Moiré* Technique. **Proceedings...**Antalya: AntAgEng, v. 1, pp. 859-863, 2008-a.

GAZZOLA, J.; DAL FABBRO, I. M.; ALMEIDA, C. C. *Moiré* Assisted Uniaxial Traction And Compression Tests On Bundle Logs Models. In: **Proceedings...** Antalya: AntAgEng, v. 1, pp. 471-474, 2008-b.

GOMES, S.T. **Interferometria Speckle e *Moiré* Geométrico Aplicados à Perfilometria de Protótipos Mecânicos**. 67 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, 2005.

GOMES, S. T.; BRAGA Jr. R. A.; LINO, A. C. L.; RABELO, G. F.; COSTA, R. M. Calibração da técnica de *moiré* aplicada a perfilometria de protótipos mecânicos. **Revista Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n.2, pp 574-579, mar./abr., 2009.

HERTZ, H.; RUSSOMANO, T.; PORTO, F.; STEIGER, A.; AZEVEDO, D. F. G.; GURGEL, J. Desenvolvimento da Técnica de *Moiré* de Sombra como Alternativa de Baixo Custo para Análise Postural. **Scientia Medica**, Porto Alegre. v. 15, n. 4, pp. 235-242 Out/Nov. 2005.

LINO, A. C. L. **Técnica óptica de *moiré* visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares**. 100 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

LINO, A. C. L.; DAL FABBRO, I. M. Determinação da topografia de uma fruta pelas técnicas de *moiré* de sombra com multiplicação de franjas. **Revista Ciência Agrotécnica**. Lavras, v. 28, p. 119-125, 2004.

LINO, A. C. L. **Aplicação de *moiré* de projeção com deslocamento de fase na construção de modelos digitais topográficos de órgãos vegetais**. 92 p. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

- MASE, G. E. **Continuum Mechanics**. Mc-Graw-Hill Book, Nova York, 1.970.
- MASCHIO, A. V. **A estereoscopia: Investigação de processos de aquisição, edição e exibição de imagens estereoscópicas em movimento**. 231 p. Dissertação de Mestrado em Desenho Industrial – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP, 2.008.
- MAZZETI Filho, V. **Utilização da Interferometria de *Moiré* no Estudo de Tensões Dinâmicas em Discos Flexíveis**. 115 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- MOORE, D. T.; TRUAX, B.E. Phase-locked *moiré* fringes analysis for automatic contouring of diffuse surface. **Appliedoptics**. Washington. Vol.18, n. 4, pp. 91-96, mar., 1970.
- ODEN, J. T. **Mechanics of elastic structures**. Mc-Graw-Hill Book, Nova York, 1967.
- OLIVEIRA, S. A. G. **Desenvolvimento de materiais para fotoelasticidade de reflexão**. 93 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 1988.
- PASTOUKHOV, V. A.; VOORVALD, H. J. C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. Ed. Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 1995.
- POST, D.; HAN, B.; IFJU, P. **High sensitivity *moiré*: experimental analysis for mechanics and materials**. New York: Spring-Verlag, 1994.
- RIBEIRO, J. L. S. **Fundamentação da Técnica Fotoelástica com a Construção de um Equipamento Básico– Polariscópio Modelo** –. 83 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontífica Universidade Católica de Minas Gerais, 2001.
- RIBEIRO, J.; VAZ, M.; PILOTO, P. Medição de campos de tensões recorrendo à técnica de *moiré*. **In: VIII Congresso Ibérico de Métodos Computacionais em Engenharia**, Lisboa, Portugal, 2004.
- SCIAMMARELLA, C. A. The *moiré* method – A review. **Experimental Mechanics**. v.44, n.8, pp. 418-433, nov., 1982.

SHAKERIN, S.; JENSEN, D. D. Enhancement of mechanics education by means of photoelasticity and finite element method. **International Journal of Mechanical Engineering Education**. V. 29, n. 4, 2000.

SPINELLI, H. A.; SILVA, F. A. Aplicação da Fotoelasticidade na Análise Estrutural de uma Junta Rebitada de Uso Aeronáutico. In: **Anais...** Guaratinguetá, 2003.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Teoria da Elasticidade**, Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1980.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos Sólidos**, Rio de Janeiro: Ed. Livros Técnicos e Científicos, 1984.

WILLEMANN, D. P. **Desenvolvimento de uma roseta óptica para medição de tensões e deformações utilizando holografia eletrônica**. 117 p. Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

WOLFE, R. W.; ROWLANDS, R.; LIN, C. H. Full Field Stress/Strain Analysis: Use of *Moiré* and TSA for Wood Structural Assemblies. **In:** Proceedings of the Experimental Mechanics Plenary Session at the Forest Products Research Society Annual Meeting, Portland, USA, 1994.

APÊNDICES

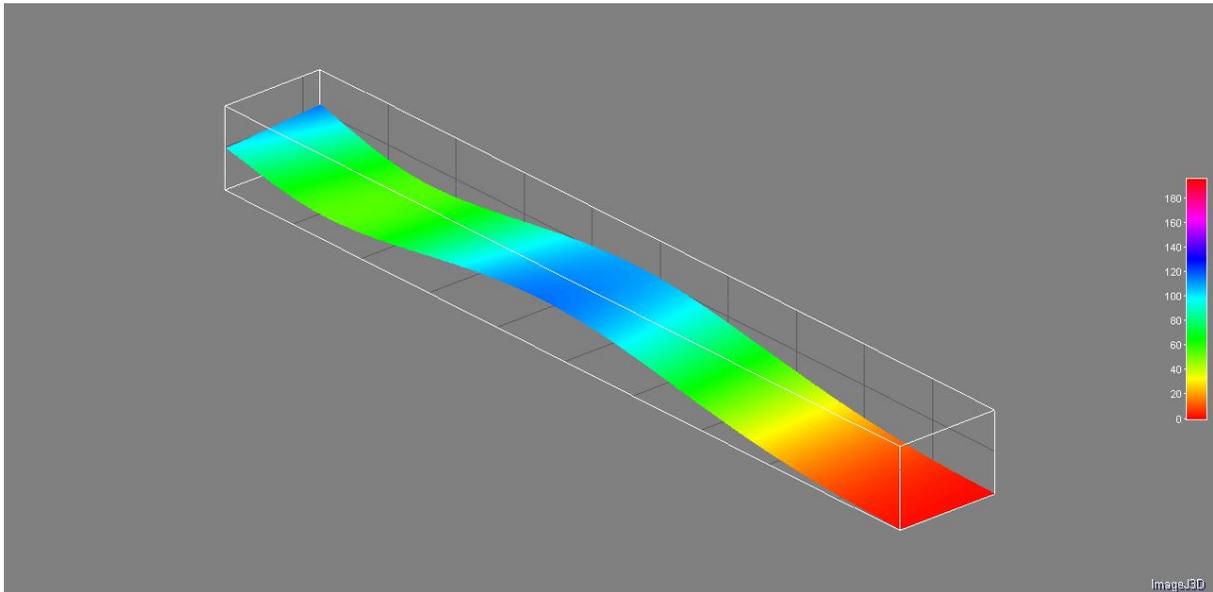


Figura A.1. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 0,5 mm para o corpo de prova 1.

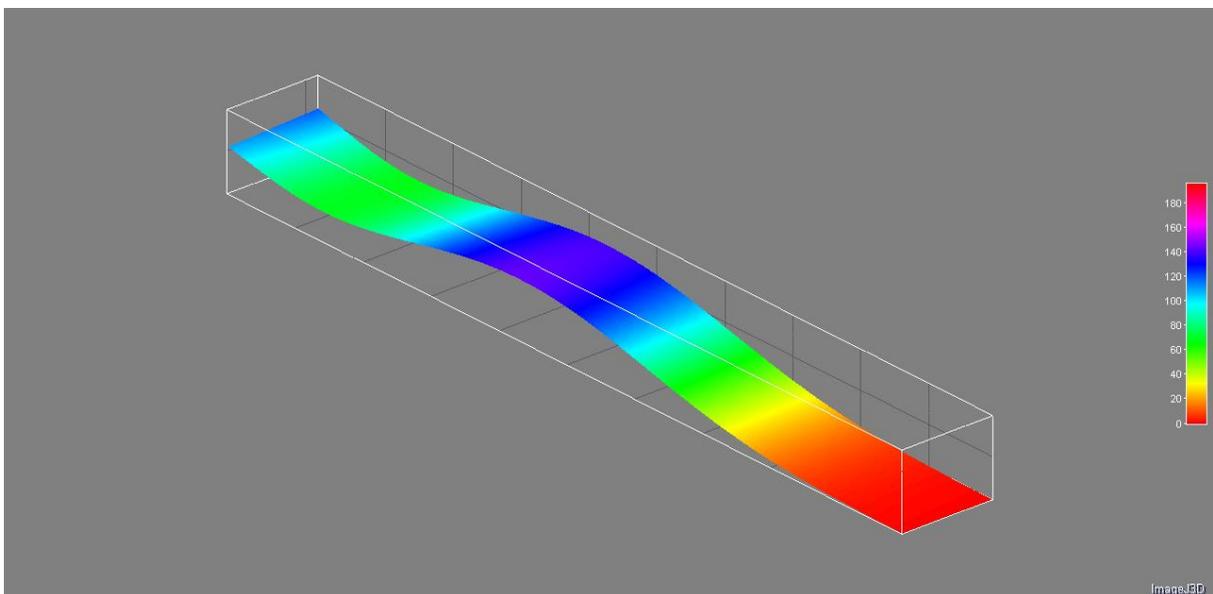


Figura A.2. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,0 para o corpo de prova 1.

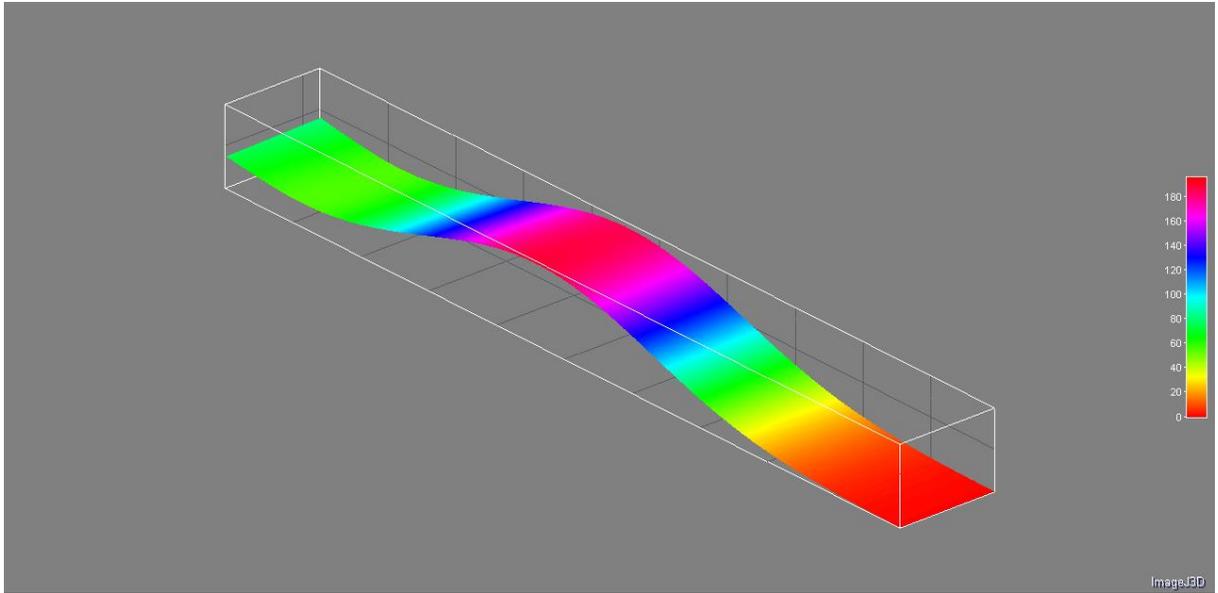


Figura A.3. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,5 mm para o corpo de prova 1.

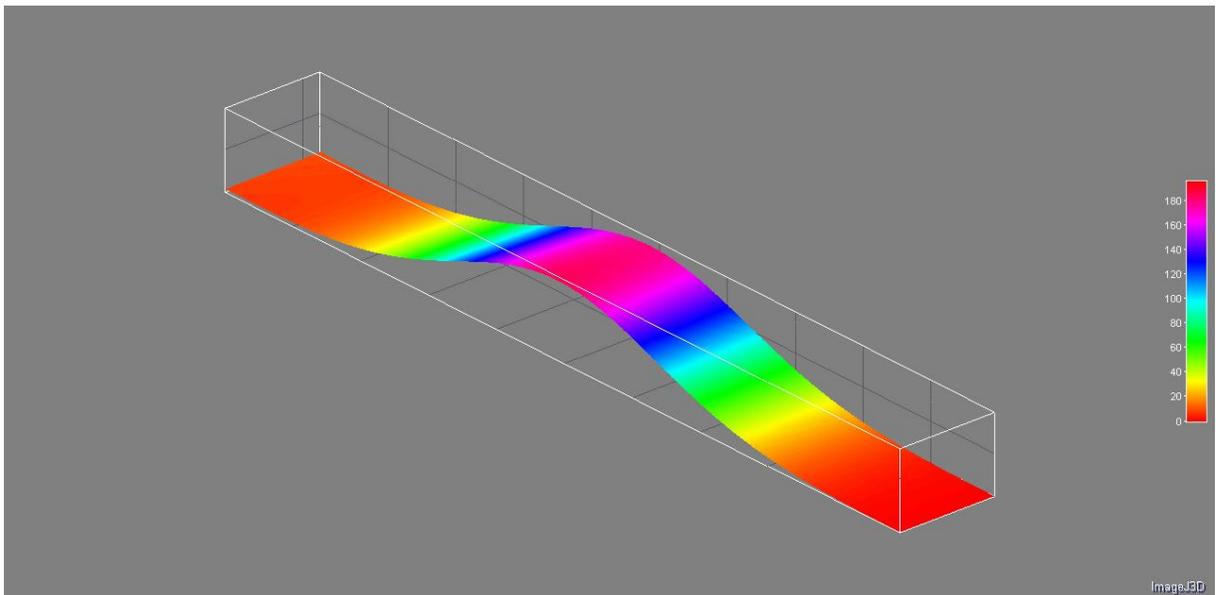


Figura A.4. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,0 mm para o corpo de prova 1.

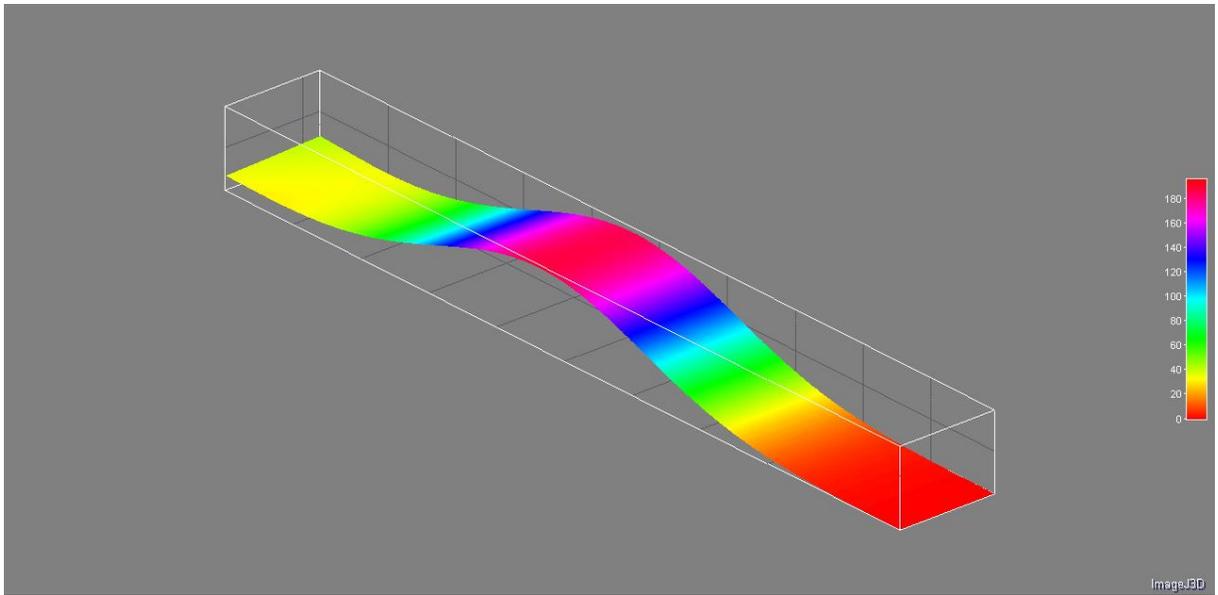


Figura A.5. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,5 mm para o corpo de prova 1.

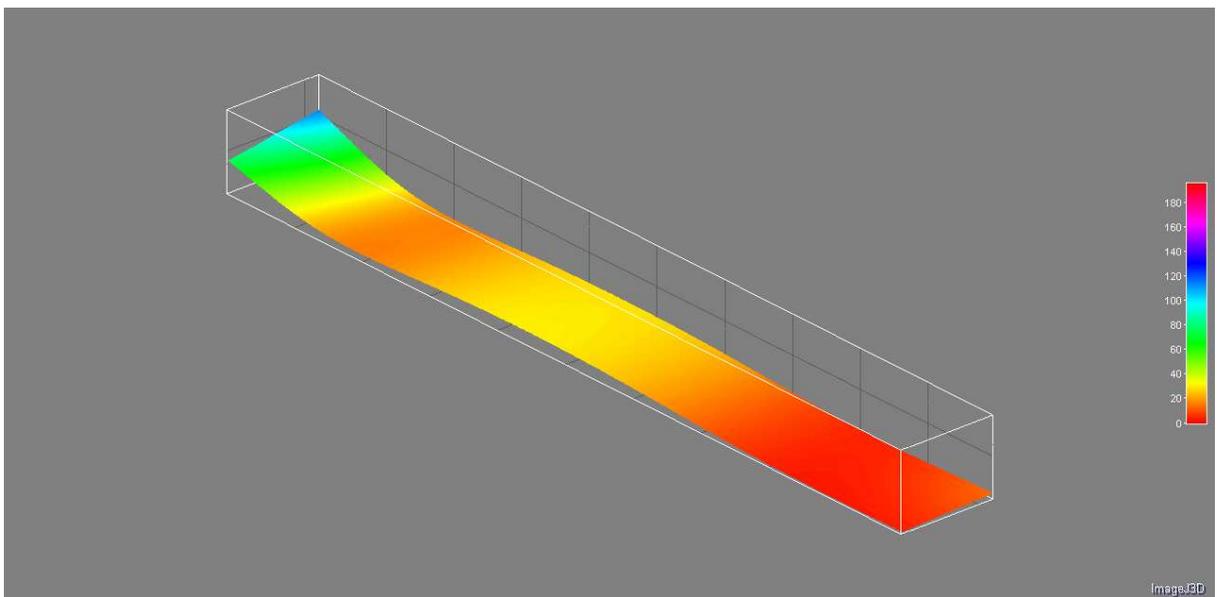


Figura A.6. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 0,5 mm para o corpo de prova 2.

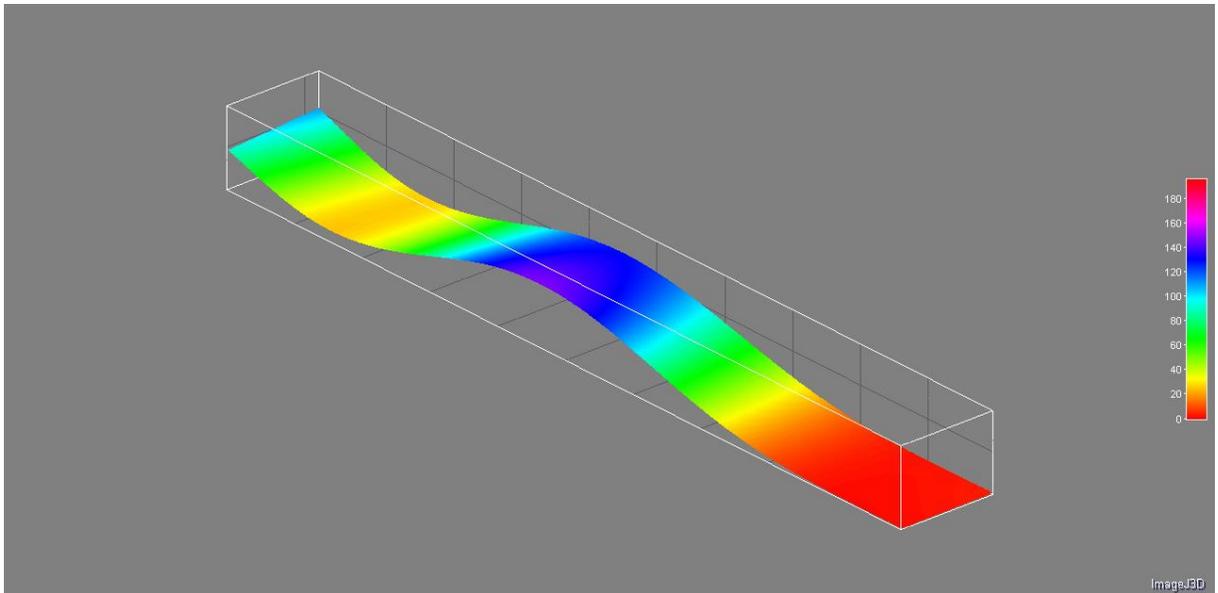


Figura A.7. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,0 mm para o corpo de prova 2.

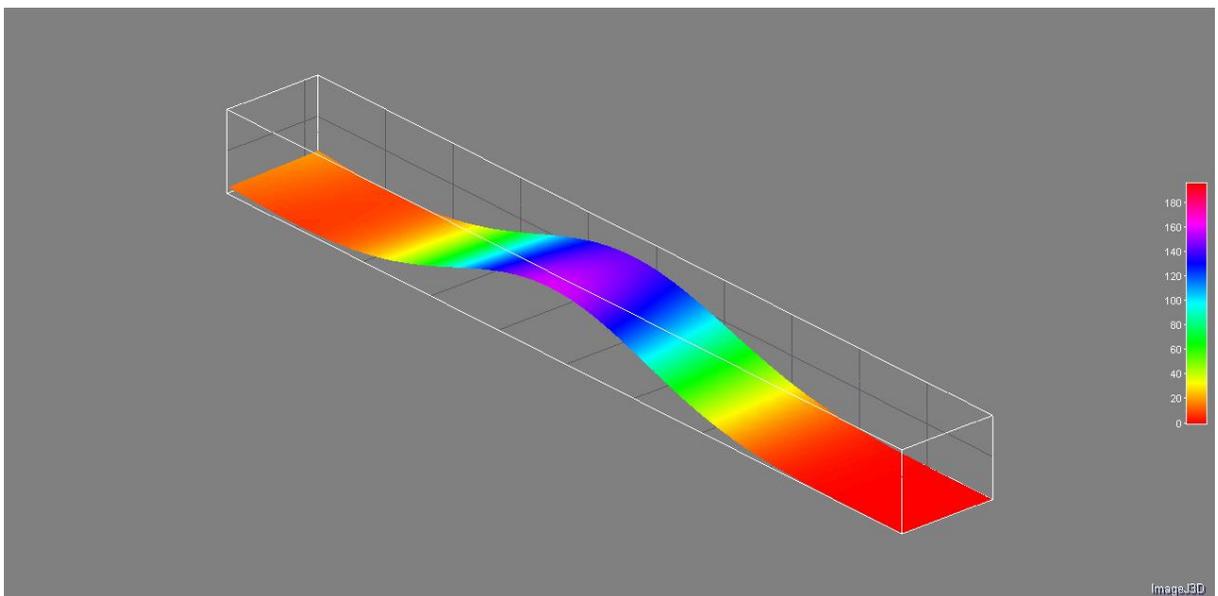


Figura A.8. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,5 mm para o corpo de prova 2.

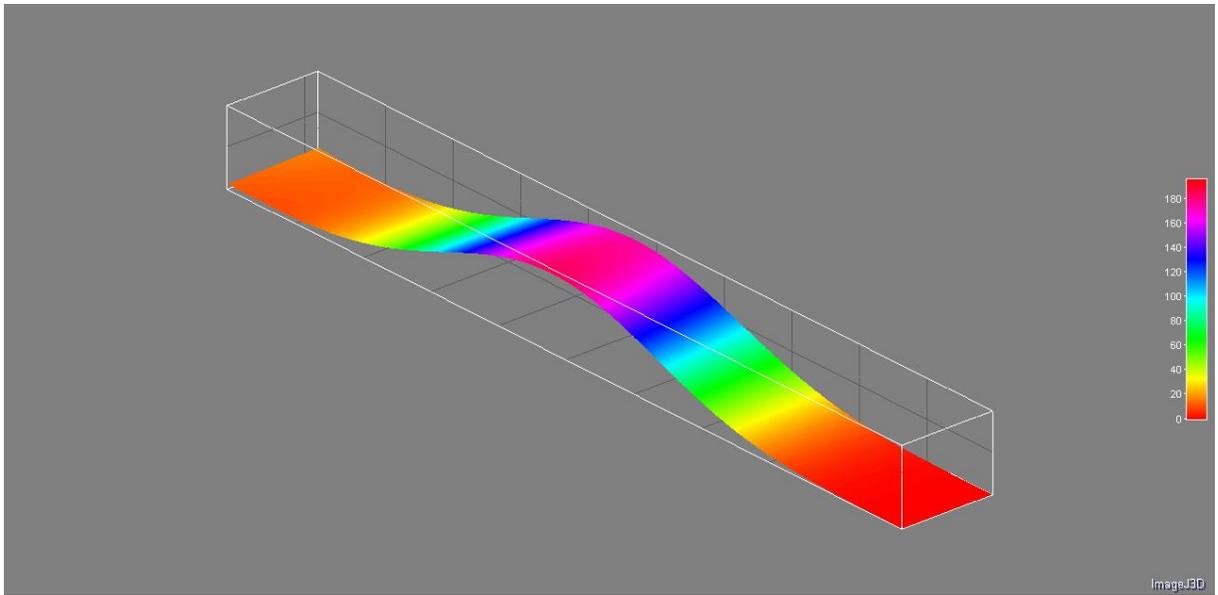


Figura A.9. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,0 mm para o corpo de prova 2.

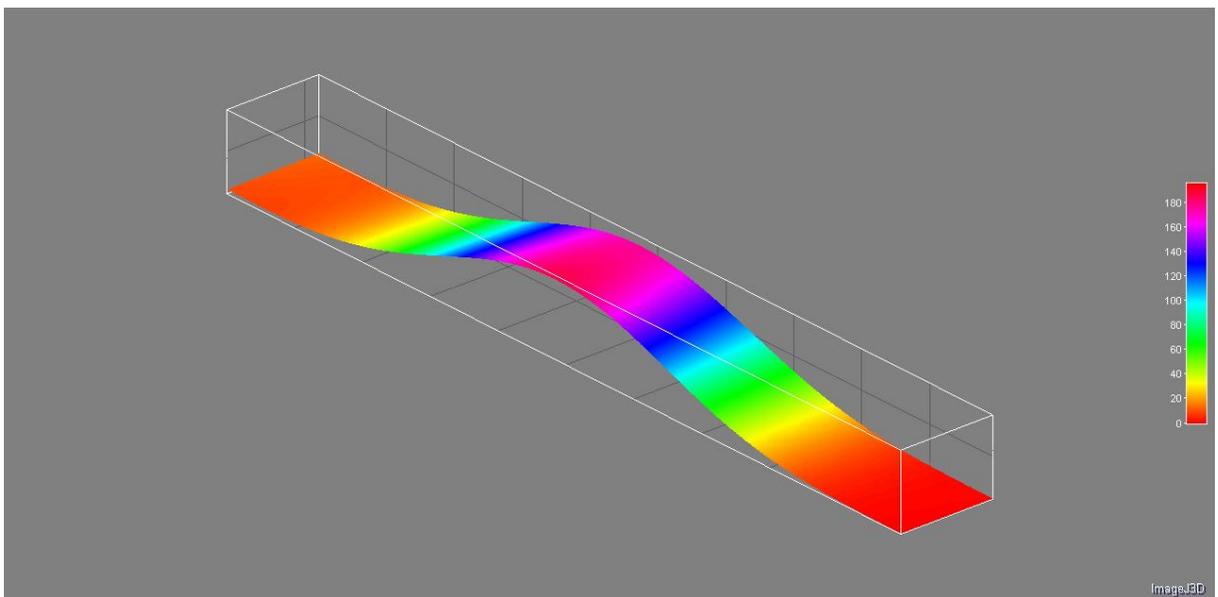


Figura A.10. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,5 mm para o corpo de prova 2.

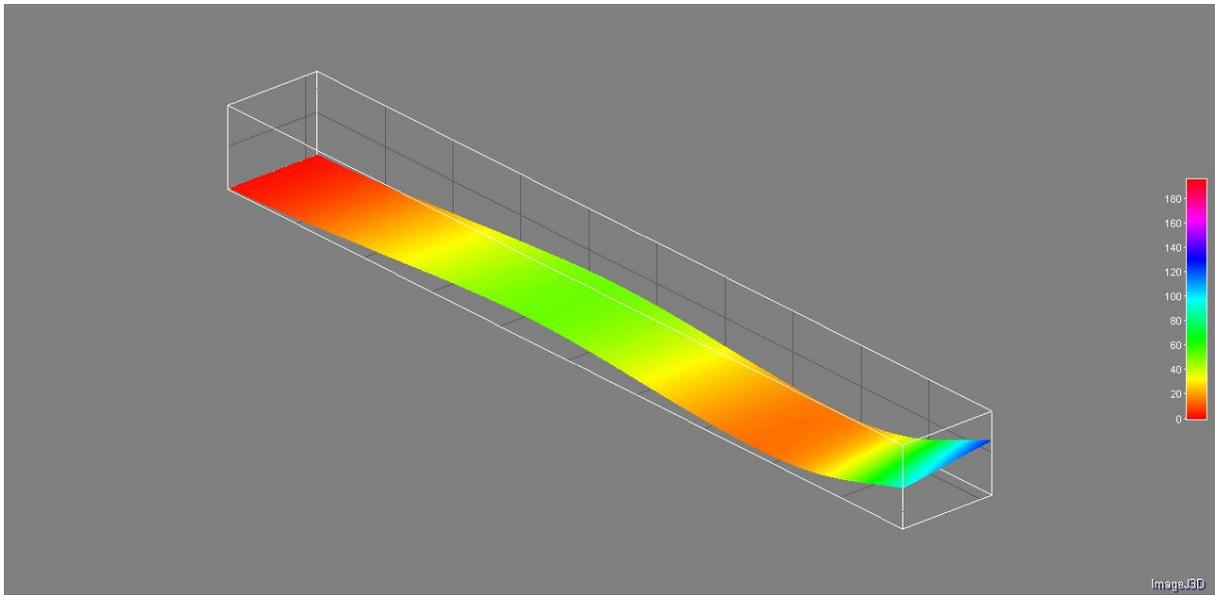


Figura A.11. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 0,5 mm para o corpo de prova 3.

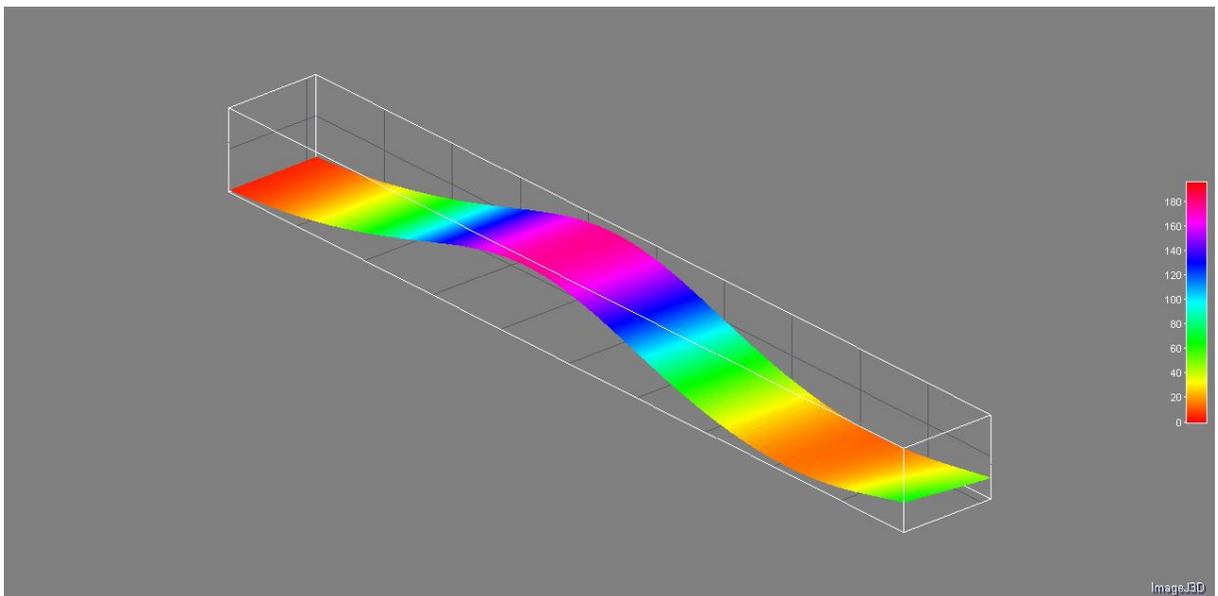


Figura A.12. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,0 para o corpo de prova 3.

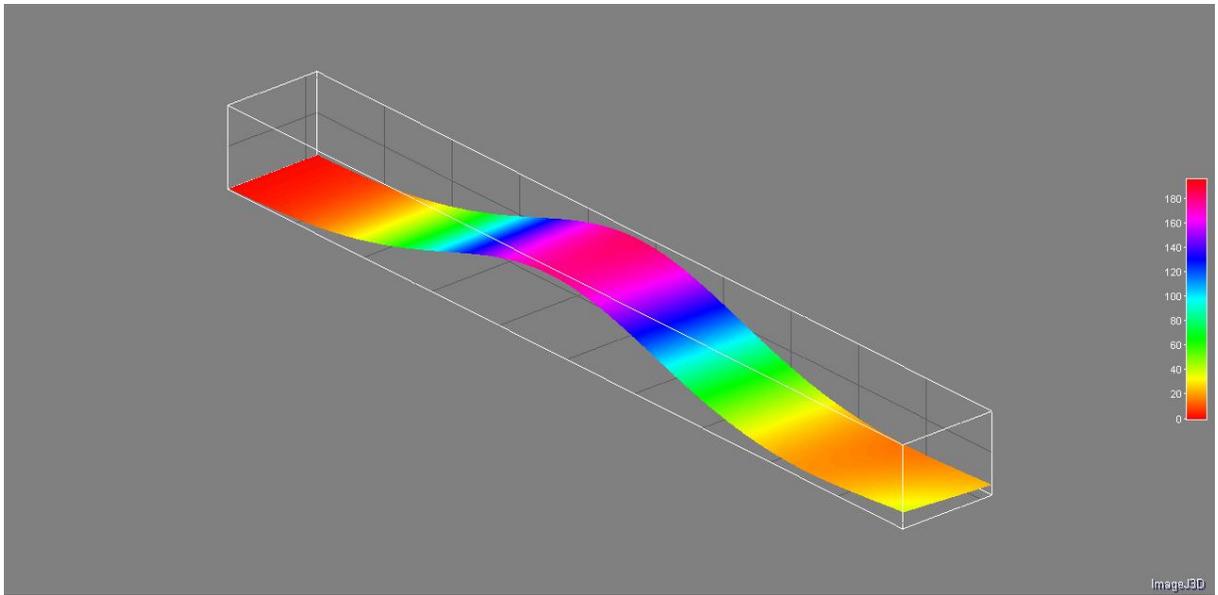


Figura A.13. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,5 mm para o corpo de prova 3.

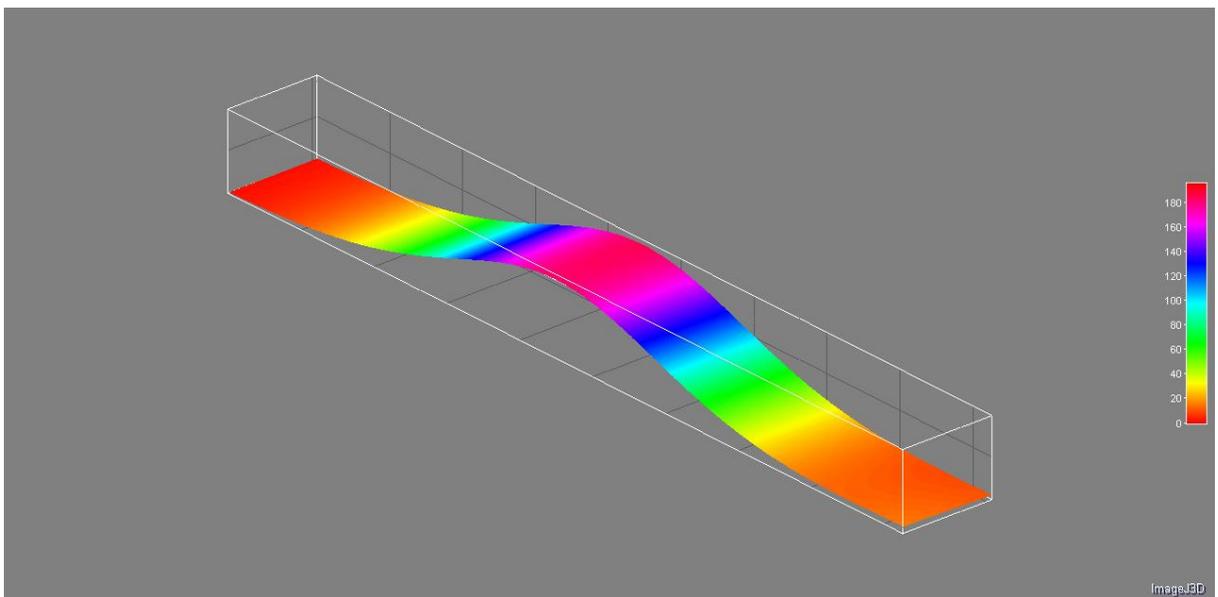


Figura A.14. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,0 mm para o corpo de prova 3.

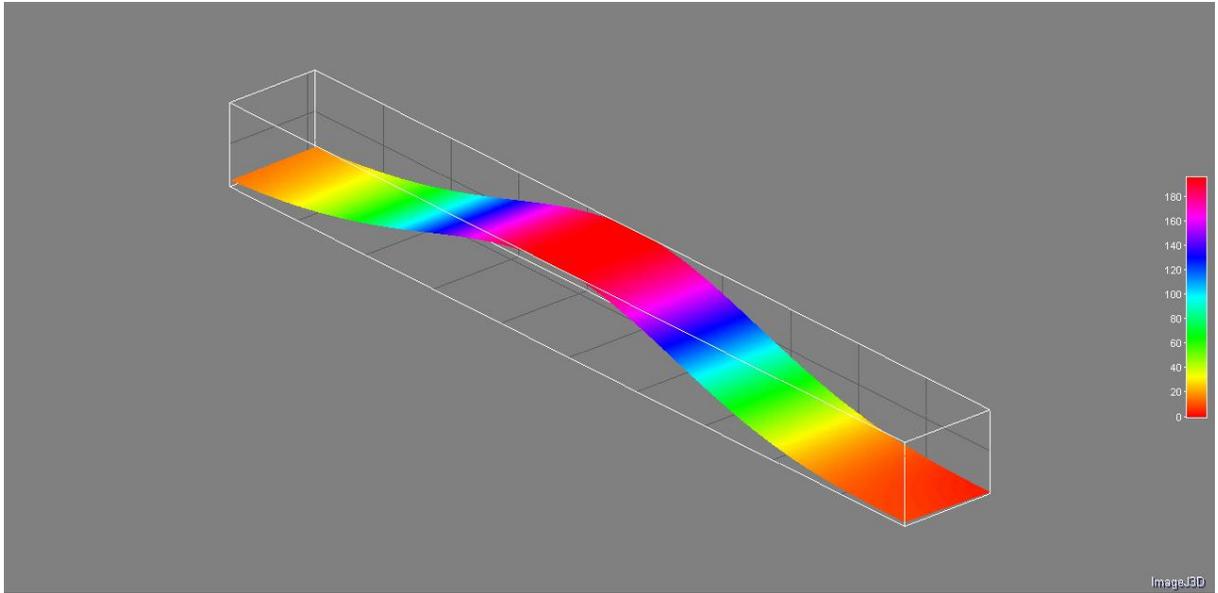


Figura A.15. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,5 mm para o corpo de prova 3.

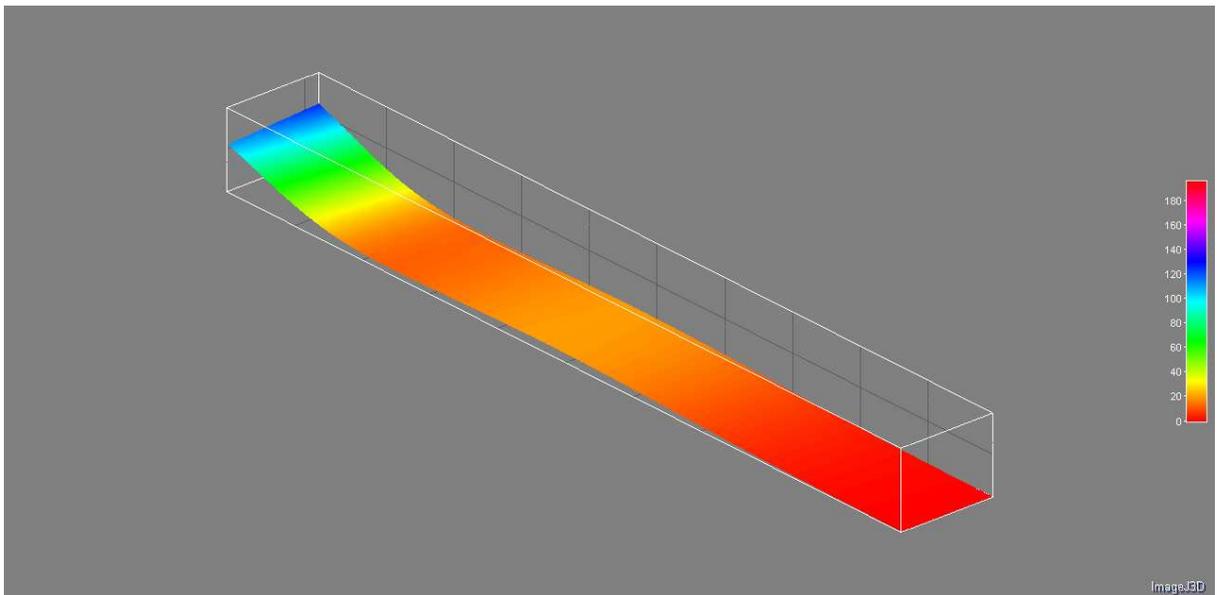


Figura A.16. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 0,5 para o corpo de prova 4.

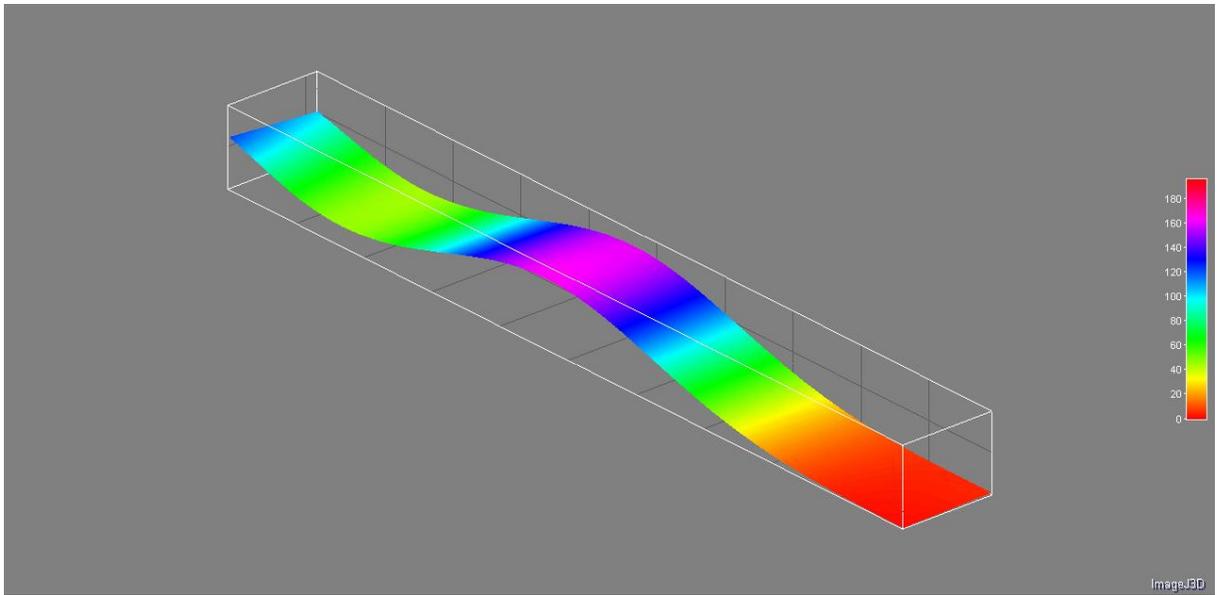


Figura A.17. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,0 mm para o corpo de prova 4.

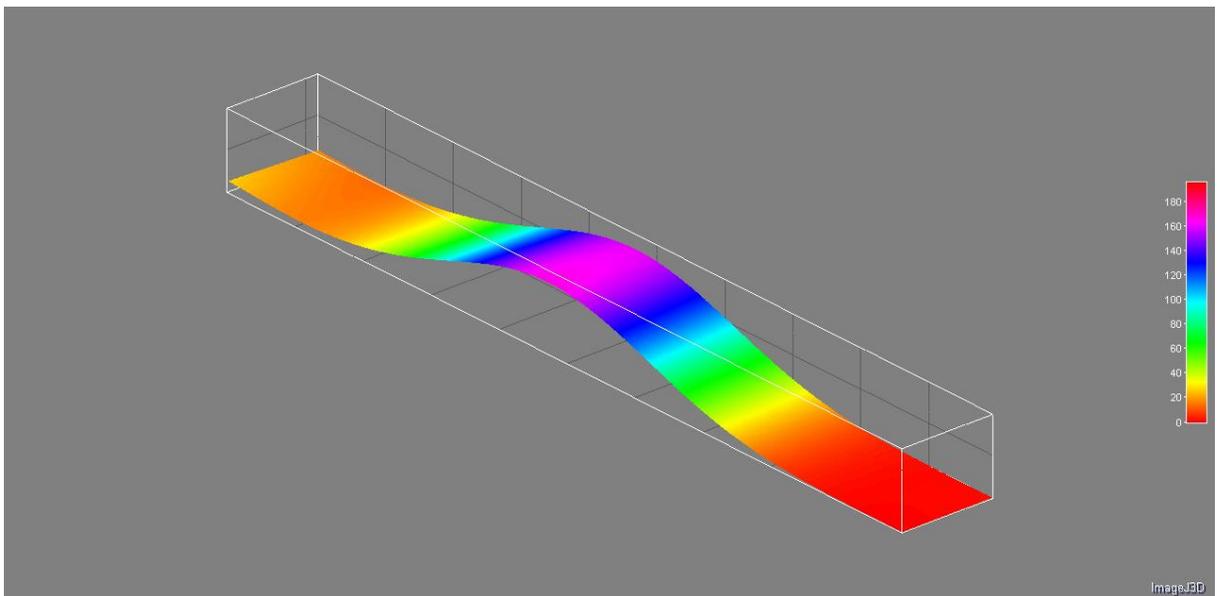


Figura A.18. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,5 mm para o corpo de prova 4.

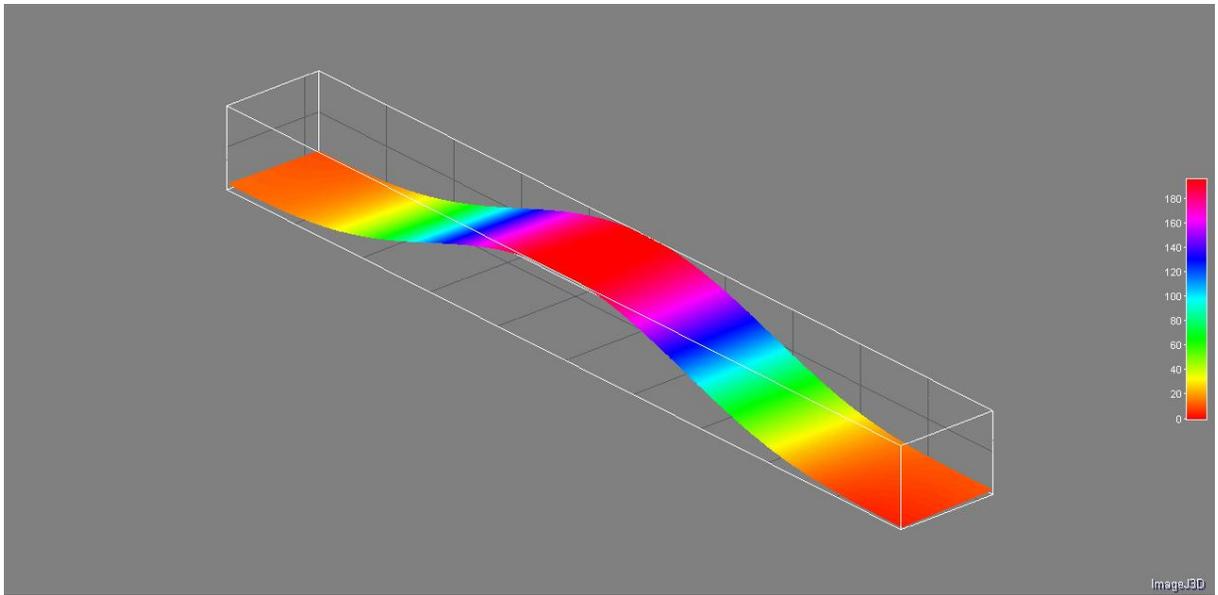


Figura A.19. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,0 mm para o corpo de prova 4.

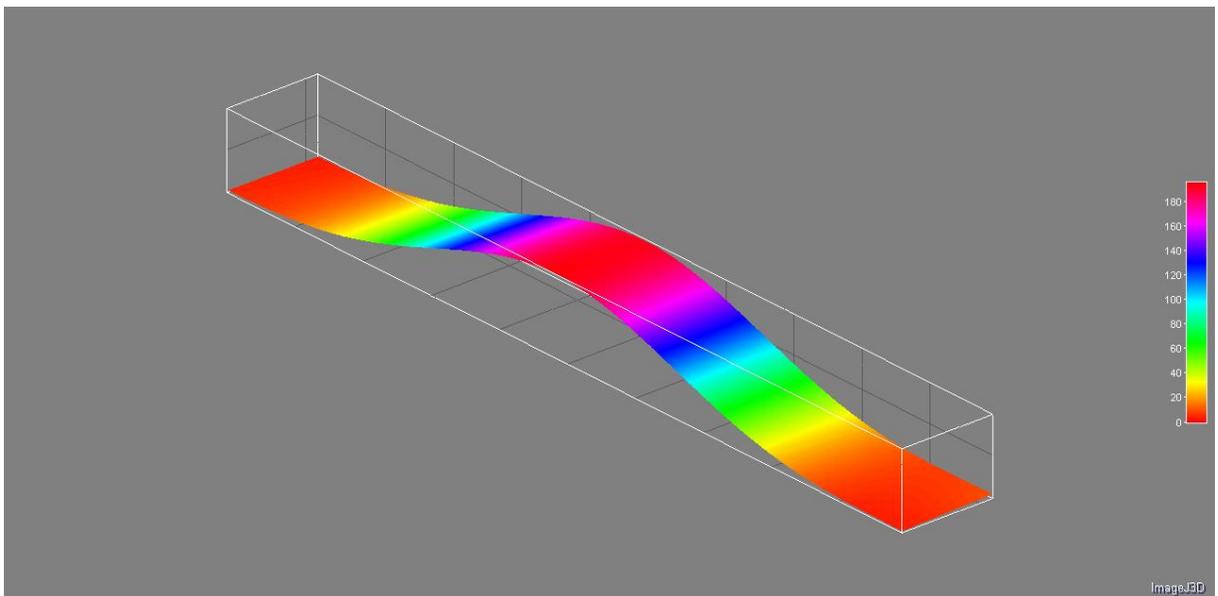


Figura A.20. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,5 mm para o corpo de prova 4.

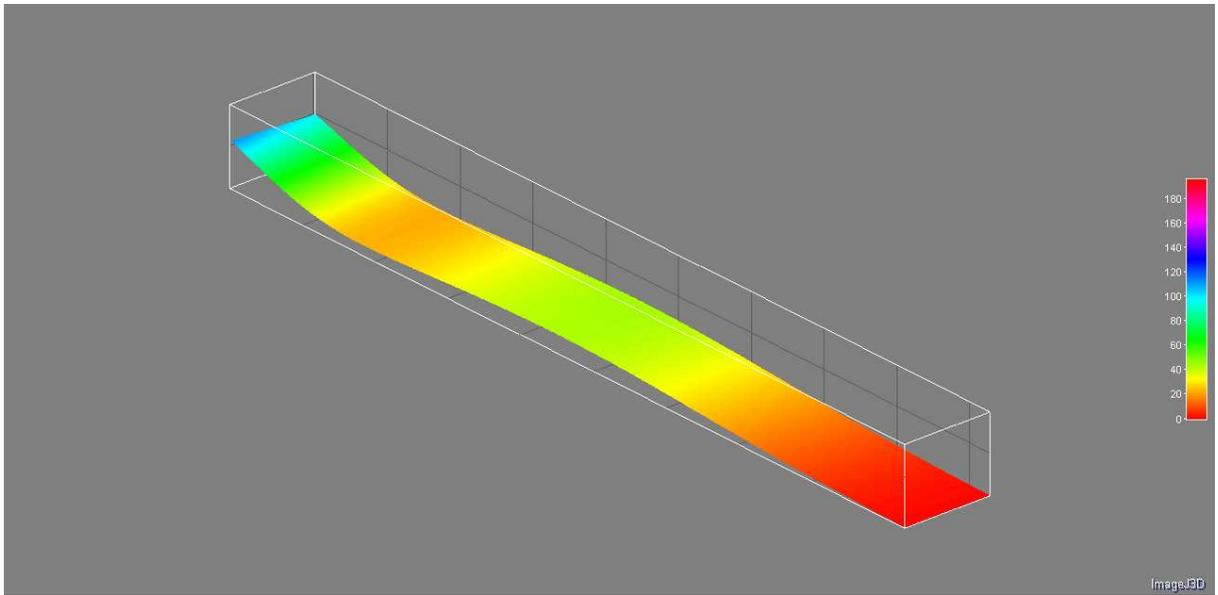


Figura A.21. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 0,5 mm para o corpo de prova 5.

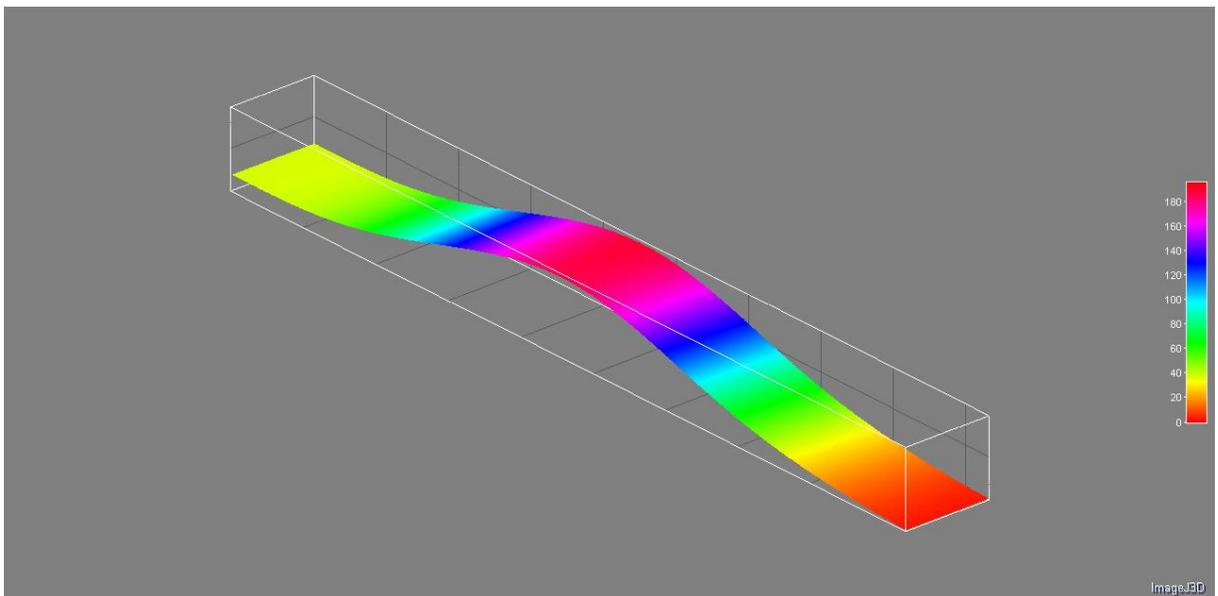


Figura A.22. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,0 mm para o corpo de prova 5.

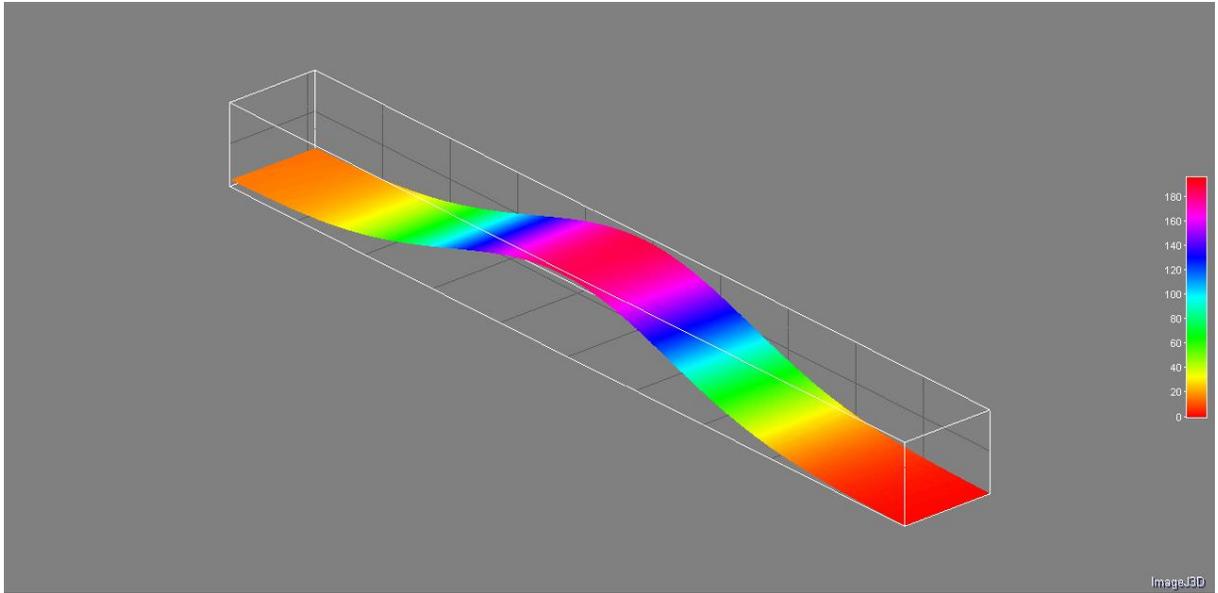


Figura A.23. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 1,5 mm para o corpo de prova 5.

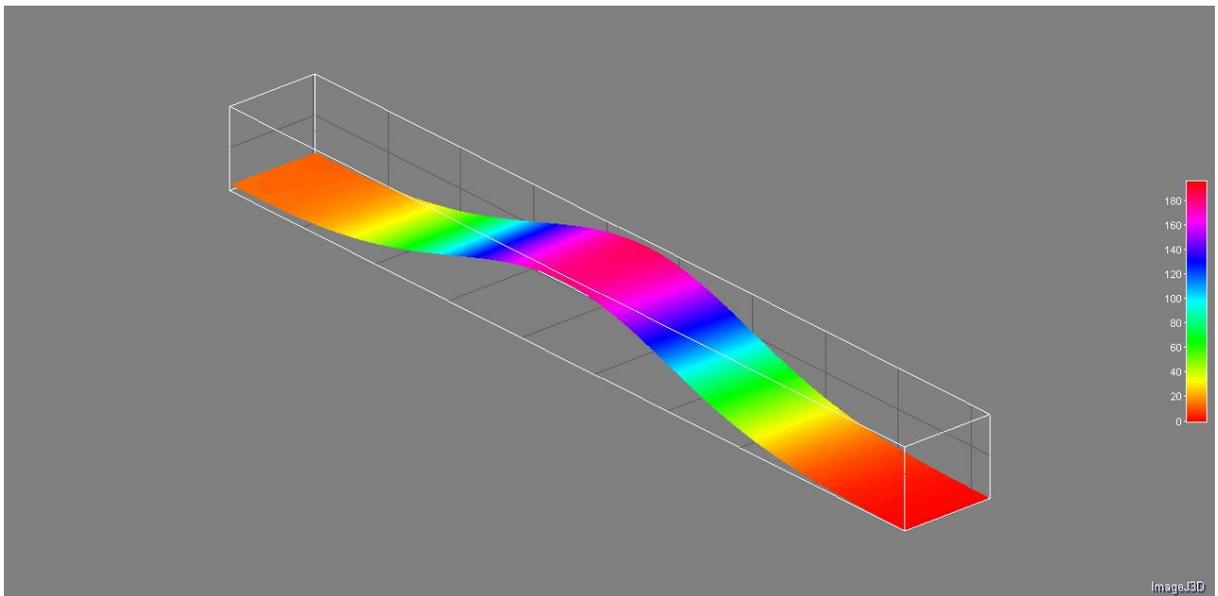


Figura A.24. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,0 mm para o corpo de prova 5.

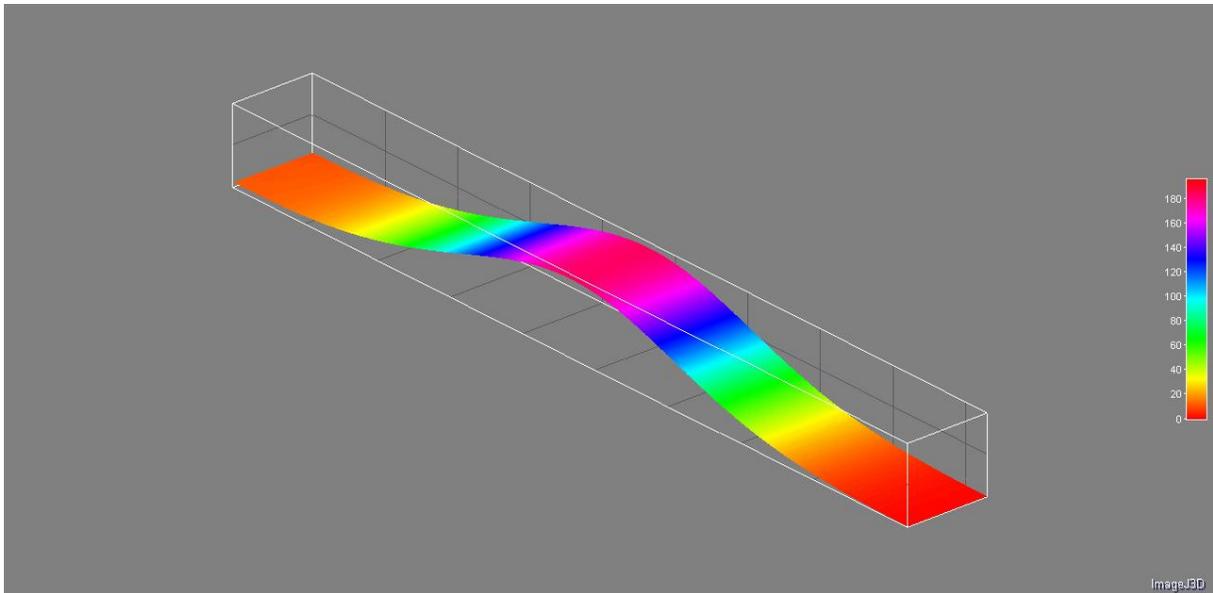


Figura A.25. Mapa qualitativo tri-dimensional obtido pela técnica de *moiré* para deslocamento de 2,5 mm para o corpo de prova 5.

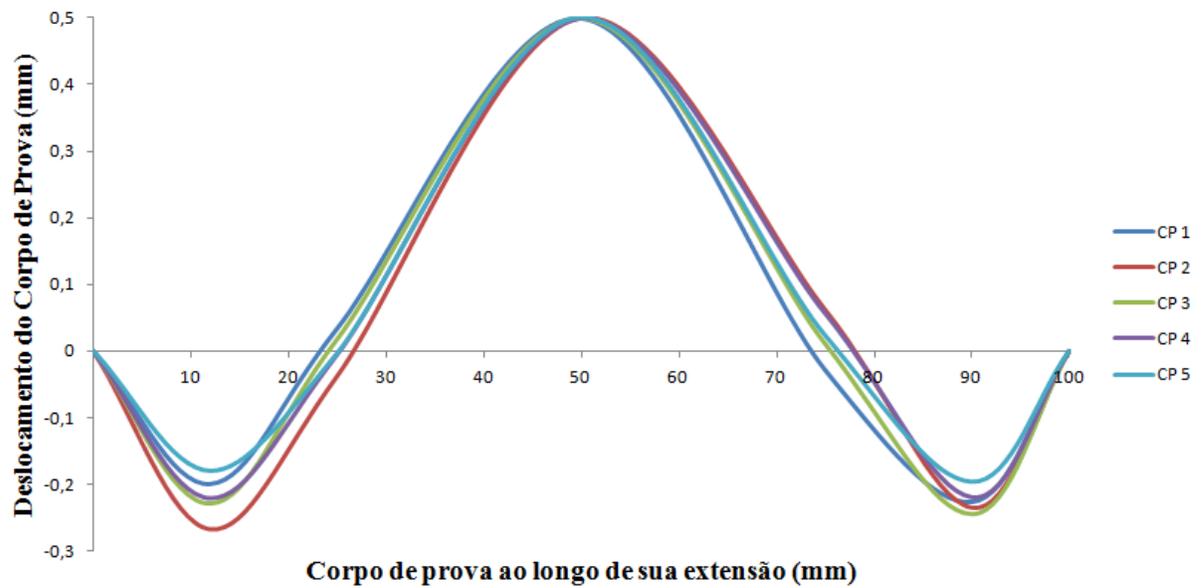


Gráfico A.1. Curva de deslocamento do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 0,5 mm.

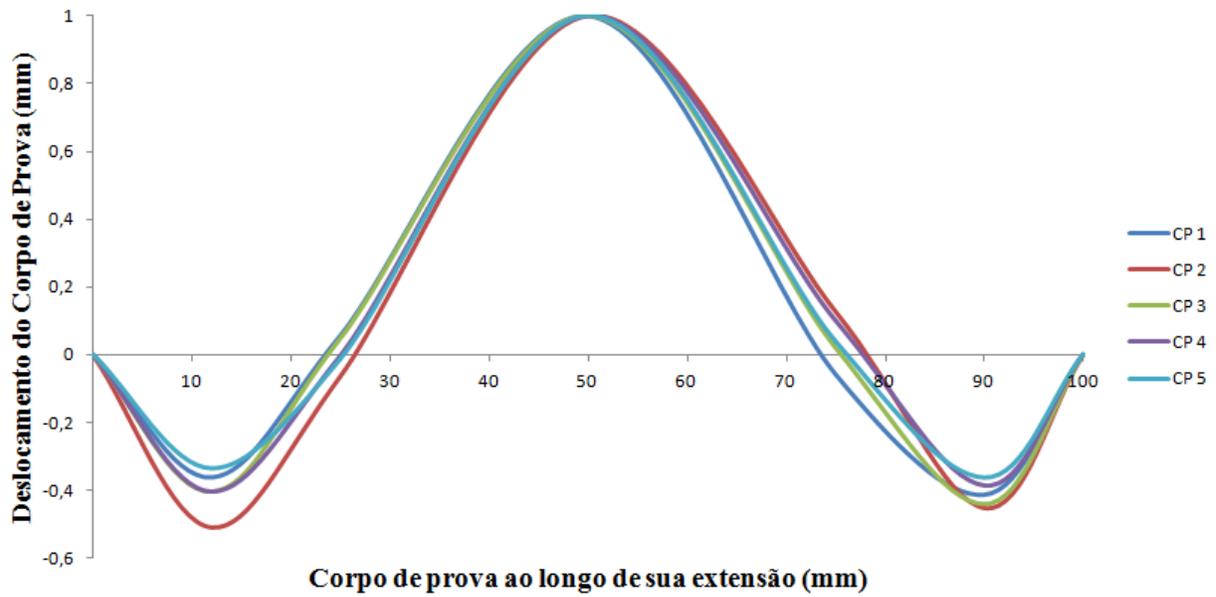


Gráfico A.2. Curva de deslocamento do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.

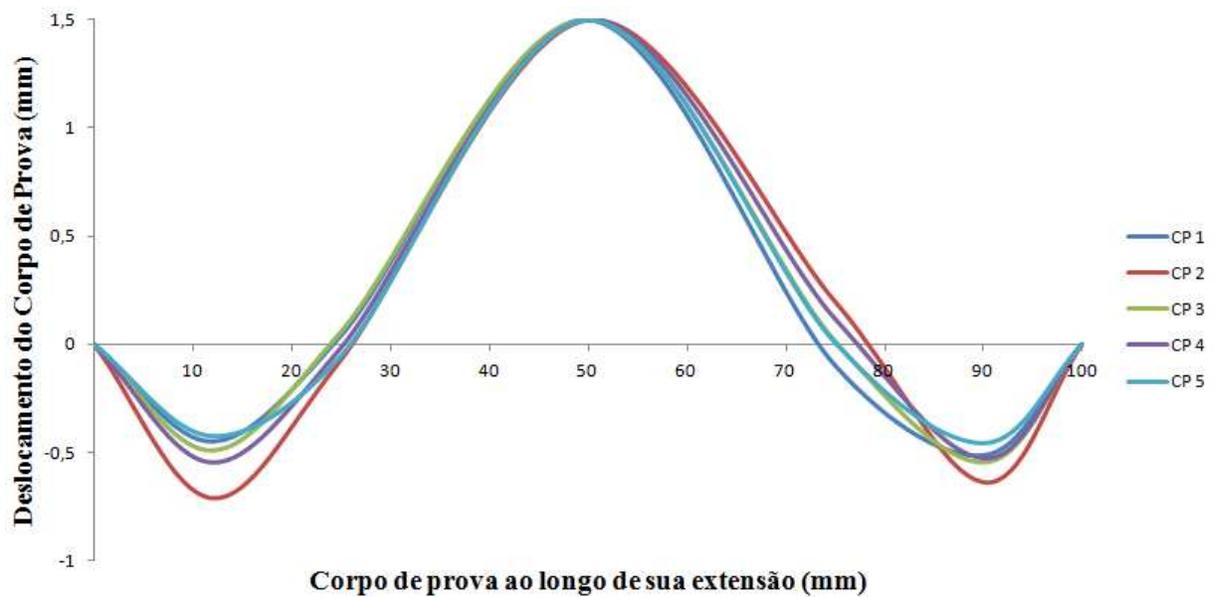


Gráfico A.3. Curva de deslocamento do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,5 mm.

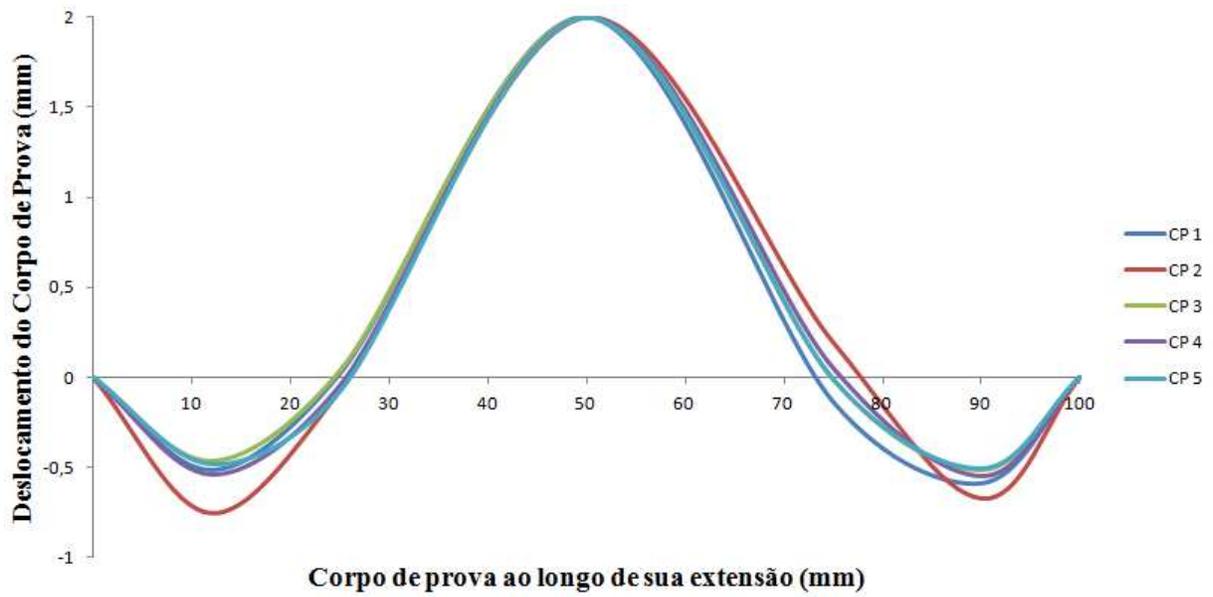


Gráfico A.4. Curva de deslocamento do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 2,0 mm.

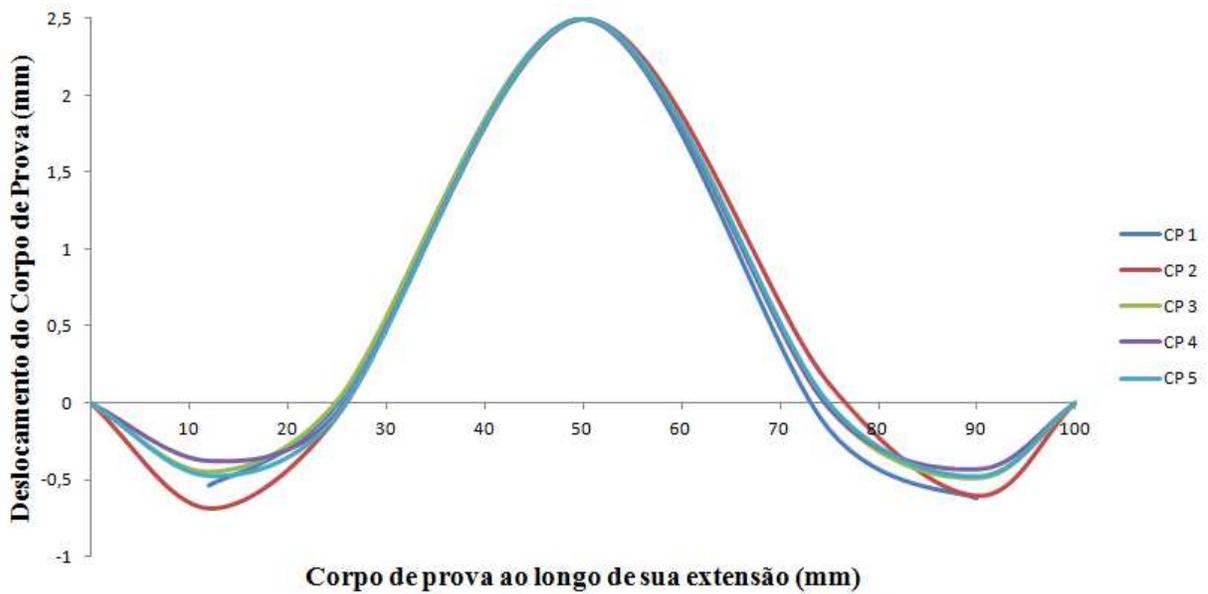


Gráfico A.5. Curva de deslocamento do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 2,5 mm.

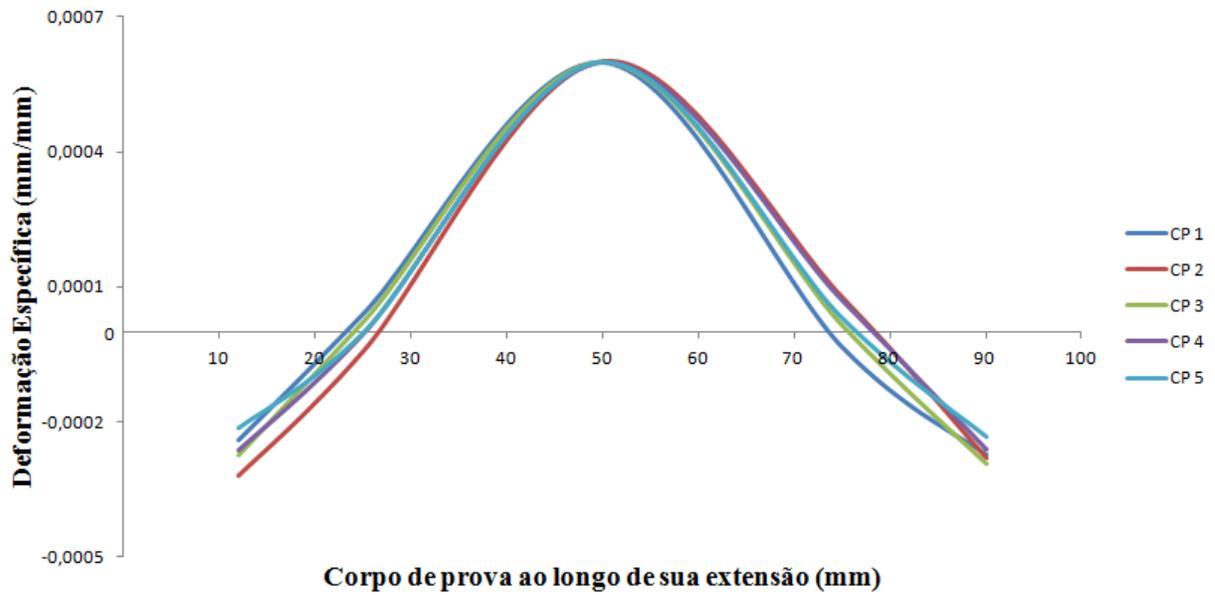


Gráfico A.6. Curva de deformação específica do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 0,5 mm.

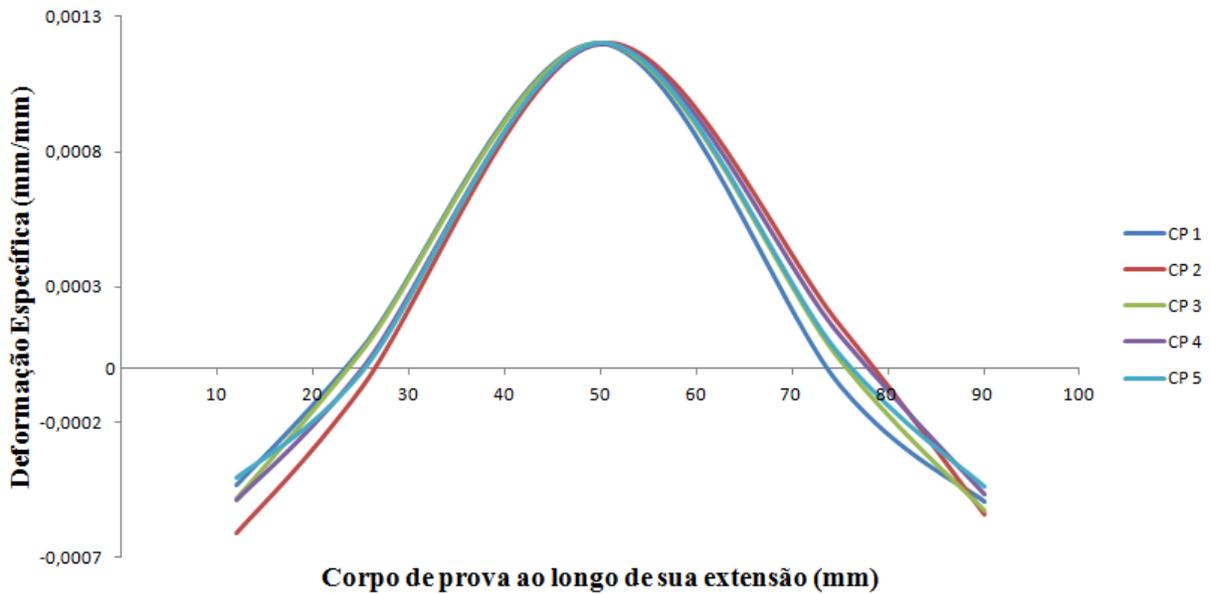


Gráfico A.7. Curva de deformação específica do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.

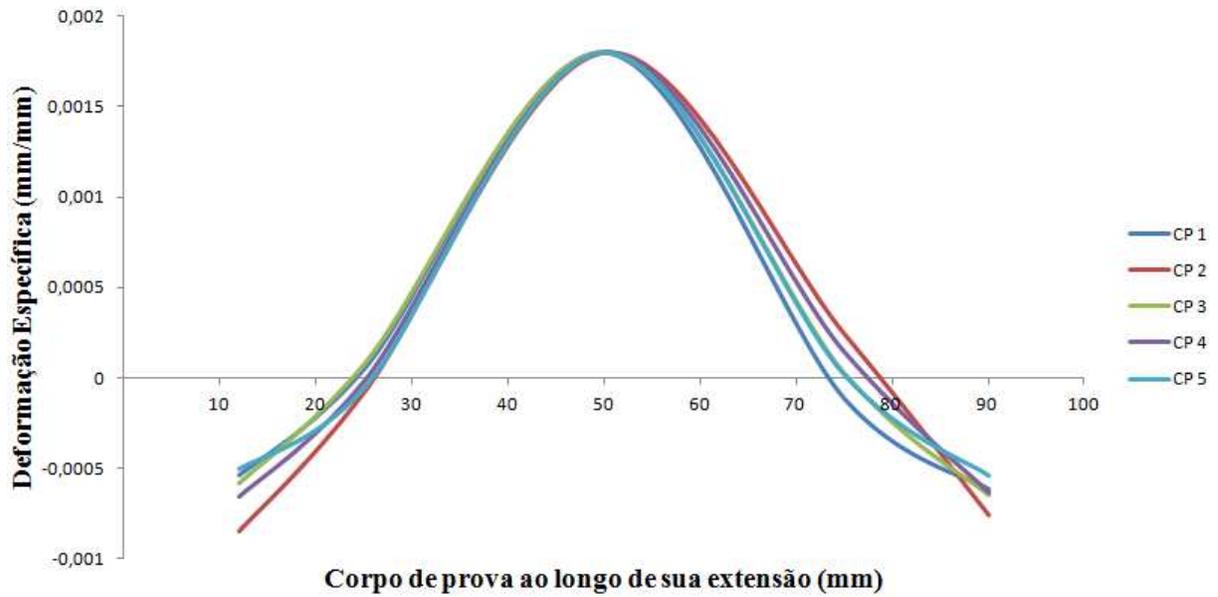


Gráfico A.8. Curva de deformação específica do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,5 mm.

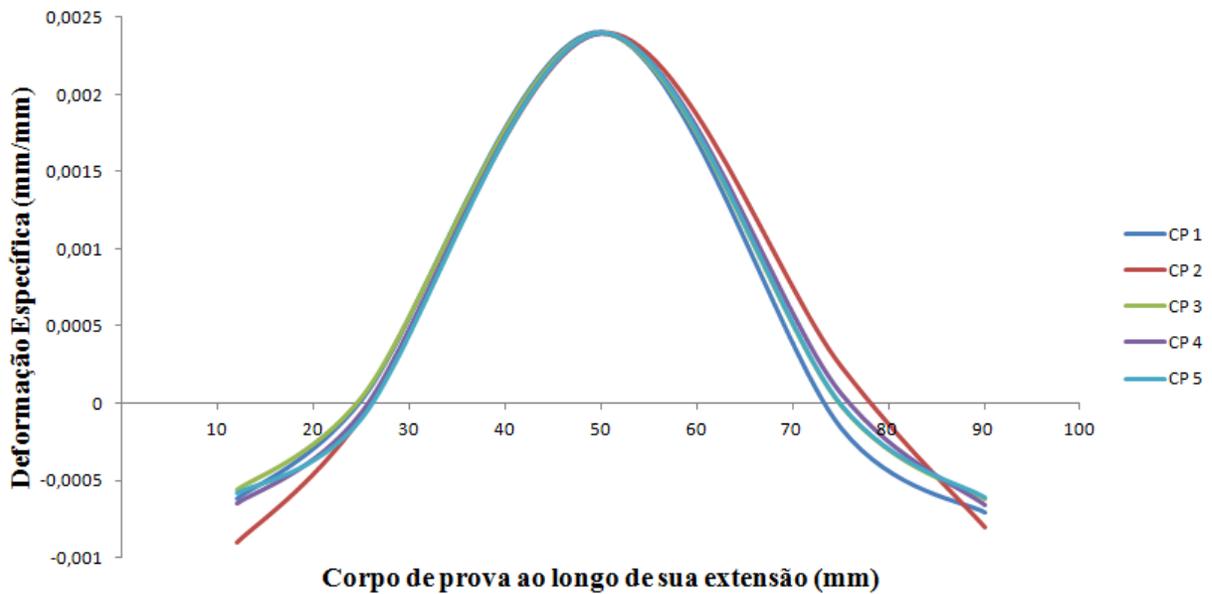


Gráfico A.9. Curva de deformação específica do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 2,0 mm.

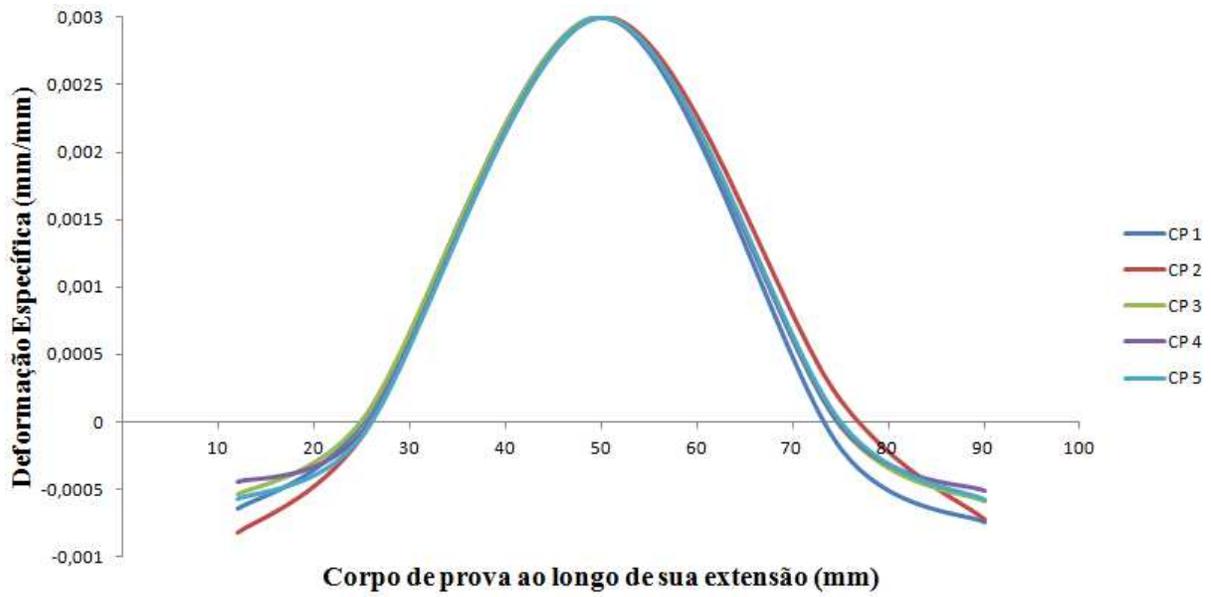


Gráfico A.10. Curva de deformação específica do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 2,5 mm.

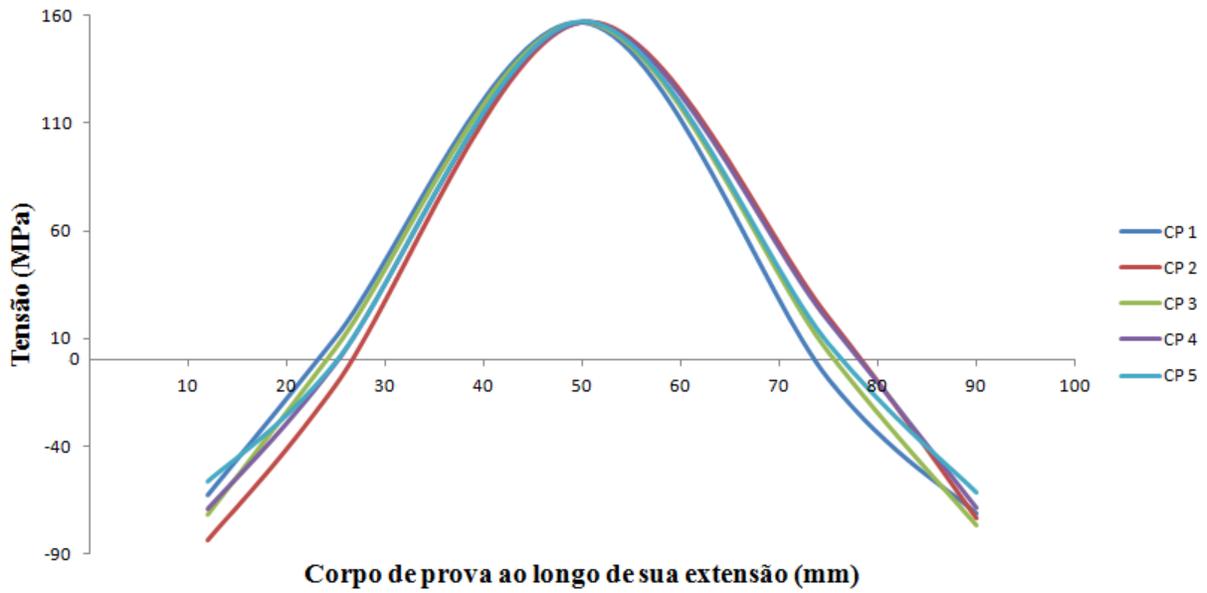


Gráfico A.11. Curva de tensão do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 0,5 mm.

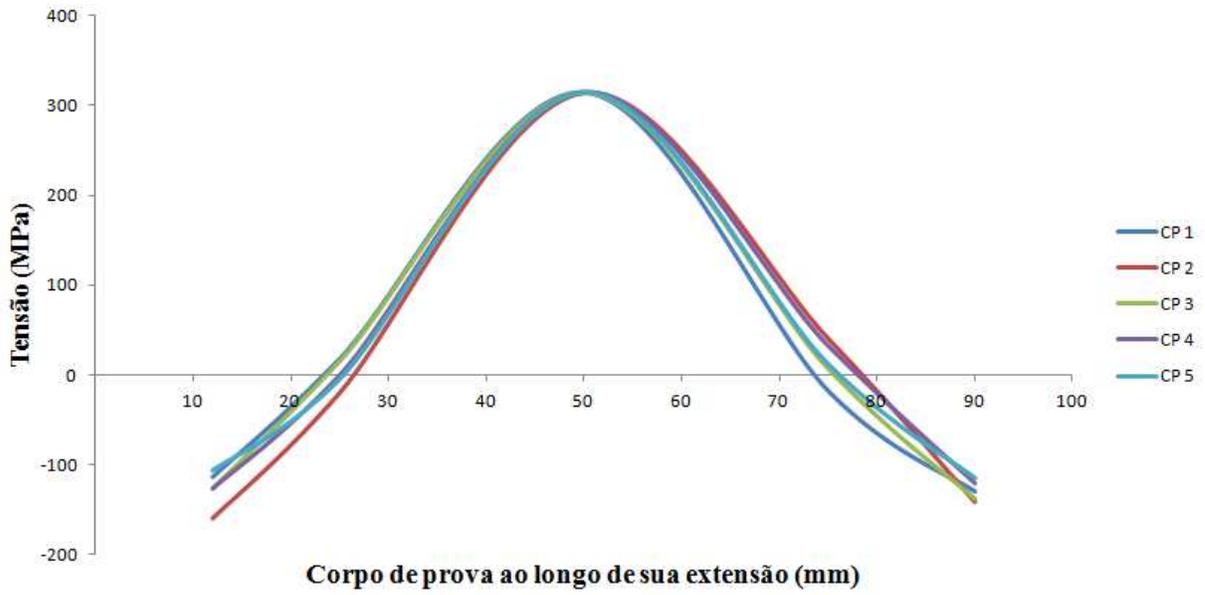


Gráfico A.12. Curva de tensão do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,0 mm.

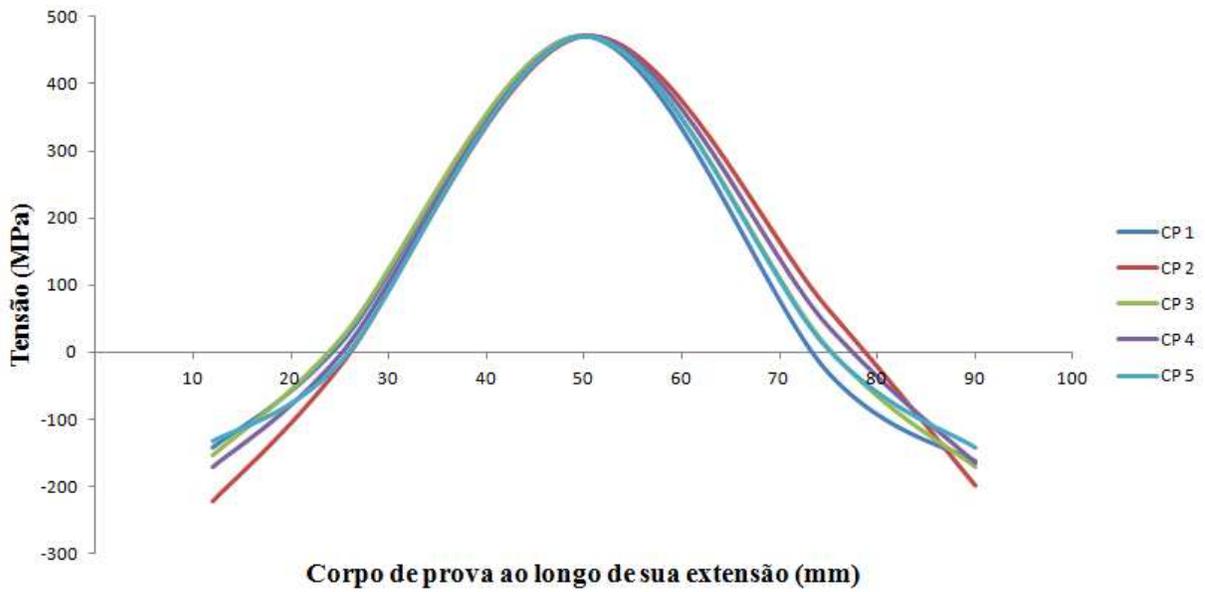


Gráfico A.13. Curva de tensão do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 1,5 mm.

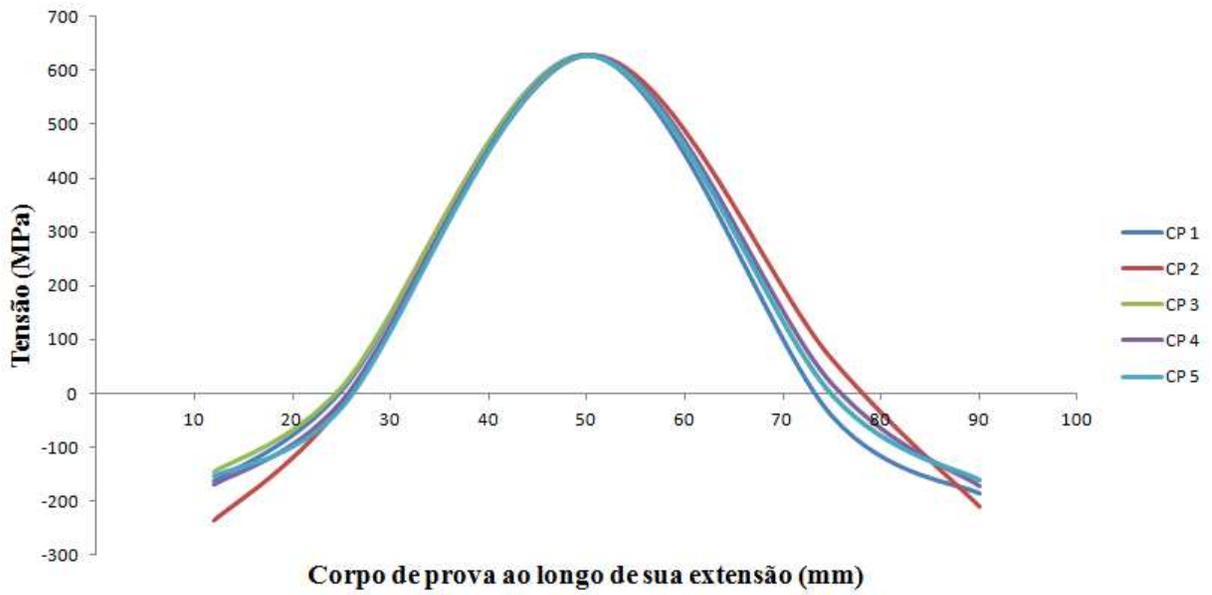


Gráfico A.14. Curva de tensão do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 2,0 mm.

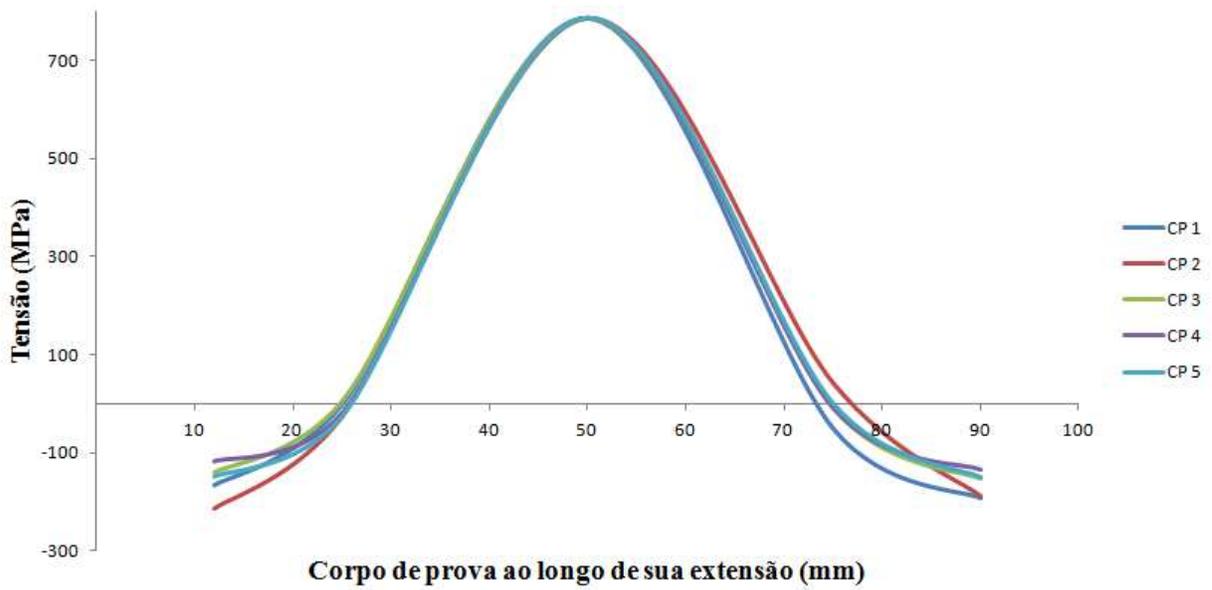


Gráfico A.15. Curva de tensão do corpo de prova obtida pela técnica de extensometria elétrica para deslocamento de 2,5 mm.