

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**APLICAÇÃO DE TÉCNICA ÓPTICA NO ESTUDO DA
DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM MODELOS REDUZIDOS
DE FEIXE DE TORAS E PEÇAS SERRADAS**

JONATHAN GAZZOLA

CAMPINAS

FEVEREIRO DE 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**APLICAÇÃO DE TÉCNICA ÓPTICA NO ESTUDO DA
DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM MODELOS REDUZIDOS
DE FEIXE DE TORAS E PEÇAS SERRADAS**

Dissertação de mestrado submetida à banca examinadora como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração de Máquinas Agrícolas.

JONATHAN GAZZOLA

Orientador: Inácio Maria Dal Fabbro

Co-Orientador: Prof. Dr. Julio Soriano

CAMPINAS

FEVEREIRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

G259a Gazzola, Jonathan
 Aplicação de técnica óptica no estudo da distribuição
 de tensões em modelos reduzidos de feixe de toras e
 peças serradas / Jonathan Gazzola. --Campinas, SP:
 [s.n.], 2011.

 Orientadores: Inácio Maria Dal Fabbro, Julio Soriano.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

 1. Fotoelasticidade. 2. Método de Moiré. 3. Toras de
 madeira. 4. Eucalipto. I. Dal Fabbro, Inácio Maria. II.
 Soriano, Julio. III. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Use of optical techniques applied on stress distribution study
of reduced bundle log models and sawn pieces

Palavras-chave em Inglês: Photoelasticity, Moiré method, Wood logs,
Eucalyptus

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Antonio Carlos Loureiro Lino, Mauro Augusto Demarzo

Data da defesa: 25/02/2011

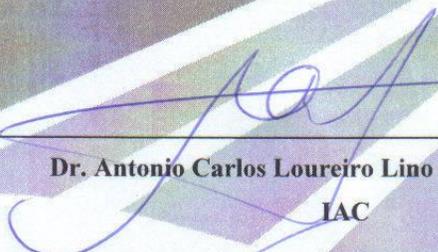
Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Jonathan Gazzola**, aprovado pela Comissão Julgadora em 25 de fevereiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI



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



Dr. Antonio Carlos Loureiro Lino - Membro Titular
IAC

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp



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

Ao Deus de amor,
às pessoas que confiaram
na capacidade de meu trabalho,
aos meus amigos e aos meus pais,
Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Deus de amor que está presente em minha vida em todos os momentos e me orientou a cada etapa deste trabalho de pesquisa com sua sabedoria.

Ao amigo e orientador, Prof. Inácio Maria Dal Fabbro, por seus conselhos, apoio, orientação e acima de tudo a amizade que sempre me acompanha desde a graduação. Sua confiança e dedicação permitiram transpor os desafios deste trabalho de pesquisa e promover pessoal crescimento tanto acadêmico e profissional.

Ao co-orientador Prof. Dr. Julio Soriano, por toda sua dedicação, atenção dispensada e sabedoria dispensada na orientação conjunta deste trabalho de pesquisa, ao qual foi de extrema importância para sua conclusão.

Aos meus pais, Isaldina e Valentim, pelo apoio e carinho sem o qual jamais teria chegado onde estou hoje.

À Comissão 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 expressamente à Profa. Dra. Raquel Gonçalves e aos funcionários Gisleiva dos Santos, José Maria, Agmon Rocha e Jamilson Luz que, de alguma forma, contribuíram diretamente para a realização deste trabalho de pesquisa.

À todos os meus amigos, em primeiro lugar e de forma especial à Luciana G. Moraes que me deu apoio em todos os momentos desta etapa de minha vida. À Danny por sua sincera amizade e companheirismo. Aos amigos que contribuíram diretamente em meu trabalho de pesquisa, Claudia Tamachiro, Eudir A. Affonso, Adílson M. Enes, Fernando Kuninari, Júlio Trinca, Kellen Cardoso e Matheus Zani. E aos amigos que contribuíram indiretamente, Fabiane Fagundes, Cícero Leite, Carlos Caetano, Antônio J. Júnior, Mara Bracale, Maria Regina e Rogério Gomes.

Agradeço às empresas: Serraria Décio Flaiban que gentilmente cedeu os recursos humanos e maquinários necessários para a obtenção dos corpos de prova. À Marcenaria e Carpintaria Campos Verdes (Geraldo) que confeccionou os corpos de prova com qualidade e no tempo exigido.

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

EPÍGRAFE

"O SENHOR é o meu Pastor; nada me faltará".(Salmos 23:1)

"Tudo posso Naquele que me fortalece".(Filipenses 4:13)

"Todos os homens, por natureza, almejam o conhecimento".(Aristóteles)

Resumo

A silvicultura ocupa a segunda posição no agronegócio brasileiro, exibindo grande importância econômica e social para o país. As atividades econômicas associadas ao reflorestamento enfrentam diversos obstáculos internos e externos, os quais se contrapõem ao crescimento desse setor no país. Nesse sentido, o transporte de madeira se torna um fator de grande concentração de custo. Toras de madeira, quando atuam em conjunto em forma de feixes apresentam maior rigidez a esforços do que atuando individualmente. As técnicas fotoelásticas podem determinar tensões e deformações em objetos independente da complexidade de sua geometria. A técnica óptica de *moiré* é considerada como uma técnica fotoelástica viável e de resultados confiáveis. A proposta deste trabalho foi de aplicar a técnica de *moiré* de sombra na determinação qualitativa e quantitativa da distribuição de tensões em modelos reduzidos de feixe de toras, doravante denominados MRFT. Foi utilizado neste trabalho de pesquisa, essência da espécie *Eucalyptus saligna* com corpos de prova divididos em três grupos distintos, de acordo com o diâmetro da tora. Uma simulação computacional, através do programa ABAQUS, foi realizada como forma de comparação dos dados qualitativos com o ensaio fotoelástico. Dados experimentais de tensão, obtidos pelos dados fornecidos por sensores acoplados à prensa eletrônica, foram comparados com os resultados de quantificação de tensão obtida pelo método de *moiré* de sombra. A comparação entre os resultados experimentais do ensaio de carregamento, bem como a simulação computacional associada ao comportamento para vigas atuantes em feixes determinado pela teoria da mecânica dos materiais indicou que a técnica de *moiré* de sombra foi adequada para a determinação de distribuição de tensão no MRFT. Os resultados mostraram inicialmente a possibilidade do uso do feixe de madeiras para otimização de *forwarder*. É concluído pelos resultados de qualificação da distribuição de tensão que os elementos que compunham o MRFT atuaram de forma unida. A análise dos resultados quantitativos mostra que, dadas as imperfeições nas superfícies que podem implicar em não efetividade do contato entre as toras, conclui-se que, as toras atuaram individualmente. Também é concluído que a técnica óptica de *moiré* é adequada para se determinar a distribuição de tensão em peça fletidas.

Palavras-Chave: Fotoelasticidade; Técnicas de *moiré*; Eucalipto Saligna; Peças fletidas.

Abstract

The silviculture figures as the second most important Brazilian agribusiness activity, exhibiting economical and social importance. Economical activities associated to reforestation face several internal and external obstacles which contrast with the development in this economical sector. Analyzing the costs related to wood exploration chain, the transportation figures the highest concentration. Wood logs, acting united as bundle logs, become more resistant to loading when compared with individual elements. Photoelastic techniques are able to determine stress and strain distribution on loaded specimens, independently of their geometrical shapes. *Moiré* optical techniques are considered as capable and reliable photoelastic techniques. This research work objectives the application of shadow *moiré* technique to qualitative and quantitative stress distribution determination reduced bundle log models, named as (RBLM). Wood specimens have been made by *Eucalyptus saligna* specie, and they were classified into three distinct groups, according their log diameter. Computational simulation, using ABAQUS software, has been carried on to compare qualitative results obtained by photoelastic test. Stress experimental dates, obtained through dates provided by electronical pressure machine sensors, have been compared to quantitative results obtained through shadow *moiré* technique. Comparison between loading test dates, as well as computational simulation associated to the supposed results determined by material mechanics theories to beam working in bundles showed that shadow *moiré* techniques were adequate to determine stress distribution on RBLM. Results obtained through shadow *moiré* technique showed a possibility of using bundle logs to forwarder design optimization. It is concluded that the stress distribution qualitative analysis showed individual pieces that composed BLRM worked as united element. Analyzing quantitative results obtained through shadow *moiré* technique, and considering surface imperfections, which is able to imply a not effective contact among wood logs, is concluded that, quantitatively, the logs acted individually. It is also concluded that shadow *moiré* optical technique is adequate to determine qualitative and quantitative stress distribution on bent pieces.

Keywords: Photoelasticity; *Moiré* techniques; *Eucalyptus saligna*; Bent pieces.

Lista de Figuras

Figura 1. Evolução do número de empregos gerados no setor florestal brasileiro.....	7
Figura 2. Evolução do índice de desenvolvimento humano (IDH), educação, longevidade e renda para as cidades de: A) Belo Horizonte – MG e B) Turmalina-MG.....	8
Figura 3. Evolução da balança comercial de produtos de florestas plantadas no Brasil.....	8
Figura 4. Distribuição da perspectiva de investimento das empresas associadas da ABRAF até 2013.....	12
Figura 5. Curvas típicas utilizadas para representar a influência do teor de umidade sobre as propriedades de resistência e rigidez.....	14
Figura 6. Deformação em uma viga em flexão pura: (a) Vista lateral da viga; (b) Seção transversal da viga; (c) Viga deformada; (d) Vista lateral com a distribuição de tensão.....	18
Figura 7. Esquema de formação das ondas de interferência.....	20
Figura 8. Franjas fotoelásticas em uma placa com furos e sujeita a carga axial.....	21
Figura 9. Disposição dos equipamentos para aquisição de imagens em um ensaio de fotoelasticidade clássica.....	22
Figura 10. Disposição dos equipamentos para o arranjo experimental de um ensaio fotoelástico.....	23
Figura 11. Exemplos de distribuição de franjas monocromáticas em amostras fotoelásticas.....	24
Figura 12. Exemplos de distribuição de franjas policromáticas em amostras fotoelásticas.....	24
Figura 13. Moldes fotoelásticos obtidos para a obtenção do modelo fotoelástico.....	25
Figura 14. Arranjo experimental da holografia interferométrica.....	27
Figura 15. Holograma de uma lata pressionada por um elástico ao centro.....	28
Figura 16. Padrão <i>speckle</i> de uma superfície tipicamente iluminada por uma luz laser.....	29

Figura 17. <i>Speckle</i> de objeto não deformado (A), deformado (B) e a superposição dos dois <i>speckles</i> resultando na interferometria final (C).....	30
Figura 18. Sobreposição de grades e a formação de franjas claras e escuras.....	32
Figura 19. Sobreposição de grades e formação de franjas de <i>moiré</i> produzido.....	32
Figura 20. Ilustração de grade com relação a: a) Linha de grade e b) Passo de grade.	34
Figura 21. Grades para a geração das franjas de <i>moiré</i> . a) linhas paralelas; b) pontos equidistantes; c) círculos equidistantes; d) linhas radiais.....	34
Figura 22 Grades do <i>phase-shifting</i> por retículos, deslocadas de 90° entre si.....	37
Figura 23. Grades do <i>phase-shifting</i> sinusoidal, deslocadas de 90° entre si.....	38
Figura 24. Modelo digital de uma pêra, gerado pela técnica do <i>phase-shifting moiré</i> .	39
Figura 25. Representação tridimensional de um tubérculo de batata (<i>Solanum tuberosum</i>) por malhas de contorno.....	40
Figura 26. Representação tridimensional de uma calota por faixas de elevação.....	41
Figura 27. a) Esquema estático e b) análise de tensões em uma viga cilíndrica engastada.....	42
Figura 28. a) Esquema estático e b) mapa de contorno de deslocamento de uma viga e a determinação de seus nós.....	42
Figura 29. Mapa de deslocamento de um disco de borracha sob movimento rotativo.	43
Figura 30. Distribuição de tensão sob esfera metálica.....	43
Figura 31. Pátio de armazenagem da madeireira Flaiban, Itatita, SP.....	45
Figura 32. Toras de madeira selecionadas para corte e obtenção dos corpos de prova.....	45
Figura 33. Região de corte da tora para obtenção dos corpos de prova.....	45
Figura 34. Organograma de obtenção dos corpos de prova na madeira.....	46
Figura 35. Arranjo experimental para o ensaio de compressão.....	47
Figura 36. Arranjo experimental para o ensaio de flexão.....	50
Figura 37. Arranjo experimental para realização do ensaio de <i>moiré</i> de sombra.....	53
Figura 38. Equipamentos utilizados para apoio na flexão do MRFT. a) Viga metálica e distanciamento dos apoios. b) Área de seção da viga metálica para fixação dos apoios.....	54

Figura 39. Vista frontal e lateral do arranjo experimental do feixe de madeiras para ensaio de flexão.....	55
Figura 40. Algoritmo usado para criar a máscara.....	59
Figura 41. a) Projeção de grade sobre o corpo não tensionado. b) Projeção de grade sobre o corpo tensionado. c) Formação e ordenamento de franjas por interferometria óptica a partir das figuras anteriores.....	63
Figura 42. Força de atrito no plano inclinado.....	66
Figura 43. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em elementos do grupo G1.....	73
Figura 44. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em elementos do grupo G2.....	74
Figura 45. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em elementos do grupo G3.....	75
Figura 46. Graduação da régua de cores e suas variações de tensões obtidas através da simulação computacional.....	75
Figura 47. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em MRFT para o grupo G1.....	77
Figura 48. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em MRFT para o grupo G2.....	78
Figura 49. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em MRFT para o grupo G3.....	79
Figura 50. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para elemento individualizado do grupo G1.....	81
Figura 51. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para elemento individualizado do grupo G2.....	81
Figura 52. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para elemento individualizado do grupo G3.....	82
Figura 53. Determinação da superfície neutra e separação da região sob tensões de tração e compressão para o ensaio fotoelástico em elemento individualizado do grupo G1.....	83

Figura 54. Determinação da superfície neutra e separação da região sob tensões de tração e compressão para o ensaio fotoelástico em elemento individualizado do grupo G2.....	83
Figura 55. Determinação da superfície neutra e separação da região sob tensões de tração e compressão para o ensaio fotoelástico em elemento individualizado do grupo G3.....	84
Figura 56. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 01 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	85
Figura 57. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 02 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	86
Figura 58. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 03 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	87
Figura 59. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 04 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	88
Figura 60. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 05 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	89
Figura 61. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 06 do grupo G1 para diferente níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	90
Figura 62. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 01 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	91
Figura 63. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 02 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	92

Figura 64. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 03 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	93
Figura 65. Resultado da distribuição de tensão obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 04 do grupo G2 para níveis de carga: a) 10 N; b) 70 N; c) 200 N; d) 370 N.....	94
Figura 66. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 05 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	95
Figura 67. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 06 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	96
Figura 68. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 01 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	97
Figura 69. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 02 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	98
Figura 70. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 03 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	99
Figura 71. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 04 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	100
Figura 72. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 05 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	101
Figura 73. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de moiré de sombra para o MRFT 06 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.....	102

Figura 74. Ordenamento de franjas para toras simples.....	104
Figura 75. Ilustração das regiões de tração, compressão e linha neutra de acordo com o comportamento determinado pela mecânica dos materiais.....	105

Lista de Tabelas

Tabela 1. Consumo Industrial de Madeiras em Toras no Brasil em 2008.....	9
Tabela 2. Dados de custo da exploração da madeira.....	11
Tabela 3. Módulo de Poisson para o Eucalipto saligna.....	17
Tabela 4. Frequência de linhas para as TM e a sensibilidade de cada.....	34
Tabela 5. Classificação do diâmetro da madeira.....	44
Tabela 6. Nomenclatura adotada para as imagens obtidas durante os ensaios fotoelásticos.....	58
Tabela 7. Valores médios de caracterização das propriedades mecânicas da madeira Eucaliptus saligna utilizados na pesquisa.....	68
Tabela 8. Parâmetros para cálculo do carregamento de ruptura e módulo de carregamento de ruptura do elemento de acordo com seu grupo.....	69
Tabela 9. Módulos de carregamento a ser aplicado na tora para o ensaio fotoelástico.....	70
Tabela 10. Média dos módulos de carregamento aplicado no MRFT para o ensaio fotoelástico.....	70
Tabela 11. Coeficiente fotoelástico de tração e compressão para a madeira do grupo G1.....	105
Tabela 12. Coeficiente fotoelástico de tração e compressão para a madeira do grupo G2.....	106
Tabela 13. Coeficiente fotoelástico de tração e compressão para a madeira do grupo G3.....	106
Tabela 14. Resultados da tensão experimental para seções compostas, simples e pelo método de moiré para madeiras do grupo G1.....	107
Tabela 15. Resultados da tensão experimental para seções compostas, simples e pelo método de moiré para madeiras do grupo G2.....	107
Tabela 16. Resultados da tensão experimental para seções compostas, simples e pelo método de moiré para madeiras do grupo G3.....	108

Tabela 17. Resultados de momento de inércia pleno (I_p e I_0) e efetivo (I_{ef}) para o grupo de madeiras G1.....	108
Tabela 18. Quantificação da tensão efetiva aplicada sob o MRFT do grupo de madeira G1 para rigidez efetiva (I_{ef}).....	109

Lista de Abreviaturas

NBR 7190:1997	Norma para determinação das propriedades das madeiras para projetos de estruturas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
AET	Autorização Especial de Trânsito
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
MRFT	Modelo Reduzido de Feixe de Toras
PBT	Peso Bruto Total
PBTC	Peso Bruto Total Combinado
PIB	Produto Interno Bruto
TM	Técnicas de <i>Moiré</i>
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

Sumário

1. INTRODUCAO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo geral.....	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 Introdução.....	6
3.2 A importância da silvicultura para o Brasil.....	6
3.2.1 Barreiras impostas à silvicultura.....	9
3.3 A legislação brasileira para o transporte de madeiras.....	11
3.4 Propriedades mecânicas da madeira.....	13
3.5 Fundamentos da fotoelasticidade.....	18
3.6 Fotoelasticidade clássica.....	21
3.7 Holografia interferométrica.....	25
3.8 <i>Speckle</i> interferométrico.....	27
3.9 Métodos de <i>moiré</i>	30
3.9.1 Sensibilidade da Técnica de <i>moiré</i>	32
3.9.2 Técnicas de <i>moiré</i> (TM).....	33
3.9.3 Expressões obtidas pelo método de <i>moiré</i>	37
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	42
4.1 Obtenção dos corpos-de-prova.....	42
4.2 Ensaio destrutivo.....	45
4.3 Ensaiofotoelástico.....	49
4.4 Análise das imagens.....	57
4.4.1 Análise qualitativa das imagens.....	58
4.4.2 Análise quantitativa das imagens.....	58
4.5 Simulação computacional.....	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1 Caracterização do lote.....	63

5.2 Ensaio de carregamento.....	64
5.3 Simulação computacional.....	66
5.4 Ensaio fotoelástico.....	73
5.4.1 Qualificação das franjas.....	73
5.4.2 Quantificação das tensões.....	96
6. CONCLUSÕES.....	103
6.1 Sugestões para futuros trabalhos.....	104
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
8. APÊNDICE.....	114

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

No Brasil, a madeira é utilizada com múltiplas finalidades. Como elemento estrutural, o emprego da madeira vem se destacando nas áreas de coberturas (residenciais, comerciais, industriais, construções rurais), cimbramentos (estruturas de concreto armado e protendido), transposição de obstáculos (pontes, viadutos, passarelas de pedestres), armazenamento (silos verticais e horizontais), linhas de transmissão (postes), obras portuárias, entre outros. Apesar de o país ser um dos maiores produtores de madeira do mundo, diversas barreiras deve ser entrepostas para que a exploração da silvicultura seja viável. A constante busca pela otimização da exploração da cultura tende a compensar as barreiras impostas às atividades de reflorestamento. Uma das prioridades de investimento do setor de floresta plantada está concentrada no setor de colheita e transporte. O processo de otimização inclui mudanças no estilo de organização de trabalho, melhorias de equipamentos, gerando diminuição de custos. Vários fatores contribuem para o aumento do custo de transporte, tais como as grandes distâncias da floresta à unidade de processamento, o rigor da fiscalização no cumprimento da legislação sobre transporte de cargas, tão bem como as características específicas do transporte de toras as quais permitem que o caminhão viaje carregado somente em um sentido, aumentando, dessa forma, os custos por unidade de volume transportado. O custo do transporte representa 45% de todo o custo da exploração da madeira. O transporte da madeira pode ser feito por vias fluviais, ferroviárias e rodoviárias. Cerca de 85% da madeira produzida no Brasil é transportada por rodovias. A legislação vigente regulamentadora do transporte em rodovias é baseado na Resolução 012/98 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), a qual limita o Peso Bruto Total (PBT) do caminhão em 45 toneladas. Todo o peso que não faça parte da carga transportada é denominado “peso morto”. As propriedades mecânicas da madeira são bastante peculiares, incluindo a baixa variação da resistência à flexão dinâmica com relação à variação do teor de umidade, pois os feixes de toras apresentam maior rigidez quando solicitados por força fletora, dentre outras. Essas propriedades mecânicas podem ser de grande valia na otimização de meios de transporte de toras.

A necessidade de se determinar a distribuição de tensões e deformações em corpos, bem como em elementos de estrutura, é de freqüente ocorrência na engenharia. O mapeamento

de tensões e deformações está baseado em técnicas amplamente utilizadas em estudos de desenvolvimento e otimização de equipamentos, máquinas e estruturas. Programas computacionais de auxílio à engenharia, métodos matemáticos clássicos, métodos fotoelásticos, estão incluídos nesse contexto. Cada método 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 simétricos e 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 assimétricos ou de geometrias complexas pode ser viabilizada por técnicas numéricas, notadamente pelos métodos de elementos finitos. No entanto, a aplicação de técnicas fotoelásticas vem ganhando espaço na comunidade científica, por permitir a visualização da distribuição de tensões e deformações nos corpos em estudo de maneira rápida e confiável. A literatura pertinente revela uma série de técnicas sob o nome comum de *métodos de moiré* considerados de fácil aplicação, gerando excelentes resultados se comparados com os demais métodos fotoelásticos. As técnicas de *moiré* podem gerar mapas de distribuição de deformações/tensões concomitante com as dimensões espaciais do objeto em estudo. A precisão dos métodos de *moiré*, observada em testes, pode alcançar até 0,5 μm . 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, continuidade ou cor. Os métodos de *moiré*, de uma forma elementar e básica, consistem em sobrepor dois retículos, formando um ângulo entre a direção de suas linhas. Entenda-se, a princípio, que esses retículos sejam constituídos por linhas escuras e paralelas, intercaladas por linhas claras e de mesma largura. Suponha-se que os períodos dessas duas grades ou retículos sejam bem próximos. A difração da luz que passa através desses retículos gera padrões denominados franjas de *moiré* as quais se mostram de cor escura e se movem de acordo com o deslocamento relativo entre os retículos. Considere-se que o primeiro retículo (1) esteja colado à superfície do objeto em estudo e o segundo retículo (2) denominado *retículo de referência* seja mantido imóvel; então, qualquer deformação ocorrida na superfície do objeto irá gerar deslocamento das franjas de *moiré*. A disposição das franjas capturada

antes e após a deformação sofrida pelo corpo poderá gerar o mapa das distribuições de deformações e tensões na superfície em estudo. Ainda que o corpo ensaiado não sofra deformações, as franjas poderão reproduzir a topografia da superfície em pauta. 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. Por exemplo, no caso de *moiré* de sombra, aplica-se apenas um retículo, pois a luz que passa pela grade real projeta sua sombra (grade virtual) sobre o corpo. Essa sombra atua como o retículo (1), porém em ambos os casos um dos retículos acompanha a geometria e a deformação imposta ao corpo, enquanto o segundo retículo permanece inalterado, sendo tomado como referência. A 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 pertinente revela uma série de técnicas sob o nome comum de *métodos de moiré* considerados de fácil aplicação, gerando excelentes resultados se comparados com os demais métodos fotoelásticos. As técnicas de *moiré* podem gerar mapas de distribuição de deformações/tensões tanto quanto as dimensões espaciais do objeto em estudo. 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, independentemente da forma geométrica, continuidade ou cor. Os métodos de *moiré*, de uma forma elementar e básica, consistem em sobrepor dois retículos, formando um ângulo entre a direção de suas linhas.

A proposta deste trabalho foi de analisar o comportamento mecânico de modelos reduzidos de feixes de toras de madeira, agora denominado por MRFT, com o auxílio da técnica de *moiré* de sombra. A determinação qualitativa e quantitativa da distribuição de tensões e deformações em MRFT, aliado à suas propriedades mecânicas, poderá dar suporte a futuros estudos de otimização de equipamentos de transporte.

O presente trabalho se justifica pela oportunidade de se gerar conhecimentos associados às aplicações das técnicas de *moiré* em otimização de projetos e principalmente ao uso do conhecimento gerado sobre o comportamento mecânico de modelos reduzidos de feixes de toras de madeira. Os resultados podem indicar novas possibilidades de pesquisa, propondo a aplicação dos feixes de toras em seu próprio transporte.

Neste trabalho de pesquisa, algumas nomenclaturas foram adotadas. Foi referenciado por tora a madeira retirada do campo e que serviu para obtenção dos espécimes. Espécimes são as peças do primeiro corte da madeira, eliminando-se as costaneiras e a medula, servindo para obter os corpos de prova para ensaio destrutivo e para os elementos do MRFT. Elementos, elementos do feixe ou peças são os corpos de prova de madeira individualizada e de dimensões reduzidas (25 mm x 25 mm x 550 mm). A união de seis elementos, dispostos numa matriz de 3 x 2 (linha x coluna) serviram para compor o Modelo Reduzido de Feixe de Toras e abreviado por MRFT ou também de corpo de prova composto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os resultados da aplicação da técnica óptica de *moiré* em modelo de feixes de toras submetidos à flexão, visando prover subsídios para futuros projetos de otimização de transporte de madeira dispostas em feixes de toras longas no sistema *forwarder*.

2.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, há necessidade de se atingir os seguintes objetivos específicos.

- Adequar a técnica de *moiré* de sombra aos ensaios estáticos para Modelos Reduzidos de Feixes de Tora (MRFT).

- Analisar o comportamento mecânico dos MRFT sob cargas de flexão.

- Qualificar a distribuição de tensões e deformações na superfície do MRFT através do método de *moiré* de sombra.

- Quantificar as tensões e deformações sobre a superfície do MRFT através do método de *moiré* de sombra.

- Comparar os resultados obtidos pela técnica de *moiré* de sombra com os resultados gerados por uma análise de elementos finitos realizado por programa computacional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

O presente capítulo inicialmente aborda tópicos associados à silvicultura no Brasil incluindo legislações pertinentes. Em seguida, resume considerações relevantes sobre as propriedades mecânicas da madeira. A abordagem sobre os fenômenos bem como sobre as técnicas fotoelásticas incluem a fotoelasticidade clássica, holografia interferométrica, *speckle* interferométrico e finalmente os métodos de *moiré* e *moiré* fotoelástico.

3.2 A importância da Silvicultura para o Brasil

O patrimônio florestal brasileiro é constituído de aproximadamente 566 milhões de hectares de florestas, ocupando cerca de 67% da superfície do país. O suporte governamental à pesquisa, bem como às atividades econômicas associadas ao reflorestamento tem propiciado um desenvolvimento significativo desse setor no Brasil. Dados confirmam que no final da década de 1990 a área de reflorestamento correspondia a 4,6 milhões de hectares, a qual, em 2008 foi elevada para 5,6 milhões de hectares. Gonçalves (2008) afirma que a meta estabelecida pelo governo federal em 2010 foi baseada no plantio de um milhão de hectares por ano. Isso reflete a importância da economia florestal e social para o país.

Segundo Murauskas (citado por BAENA, 2005), o agronegócio, de maneira geral, corresponde a 33% do PIB enquanto que o segmento madeireiro é responsável por 2,2% do PIB nacional, sendo superado somente pelo complexo da soja. Somente a atividade florestal plantada arrecadou em 2008, um montante de R\$ 8,82 bilhões em impostos, o que corresponde a 0,83% de todo o tributo arrecadado no país, gerando cerca de 400 mil empregos diretos e 1 milhão de postos indiretos, além de gerar mais 590 mil empregos pelo “efeito-renda”, de acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF, 2009). A Figura 1 mostra a evolução do número de empregos

gerados no setor florestal brasileiro entre os anos de 1999 a 2008. Pelos dados, percebe-se que a atividade de reflorestamento gerou um saldo positivo em cada ano na geração de empregos no país.

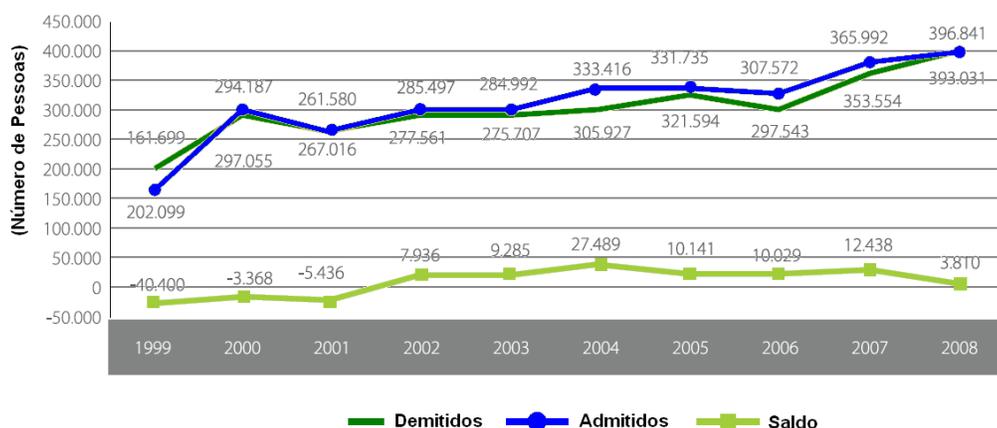
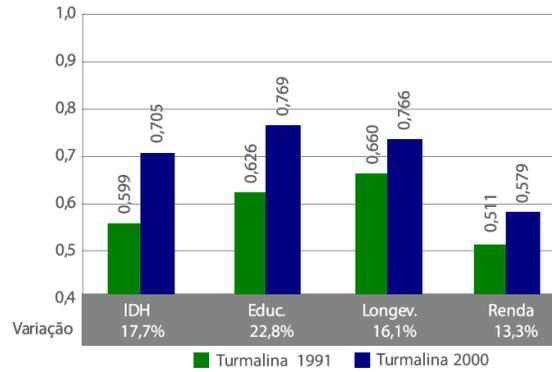
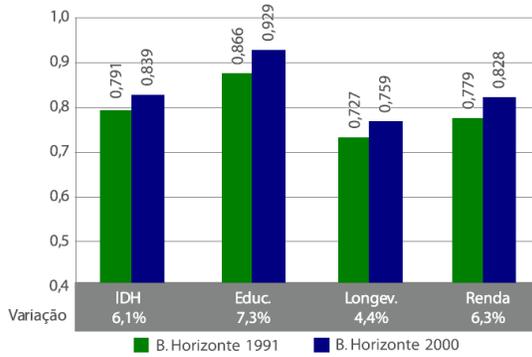


Figura 1. Evolução do número de empregos gerados no setor florestal brasileiro. Fonte: ABRAF, 2009.

A cadeia constituída pelas atividades florestais exibe um impacto positivo significativo, gerando recursos representados por desenvolvimentos econômicos e sociais, tanto em regiões economicamente desenvolvidas, bem como em regiões menos desenvolvidas no país. Dados estatísticos da ABRAF (2009) mostraram o índice de desenvolvimento humano (IDH), educação, longevidade e renda de capitais de Estado com cidades que vivem da silvicultura. Analisando os índices comparativos apresentados na Figura 2 observa-se que para a cidade de Turmalina, a qual é dependente da atividade econômica da silvicultura, esses índices apresentam maiores variações em relação a cidade de Belo Horizonte.



(A)

(B)

Figura 2. Evolução do índice de desenvolvimento humano (IDH), educação, longevidade e renda para as cidades de: A) Belo Horizonte – MG e B) Turmalina-MG. Fonte: ABRAF, 2009.

Valverde et al. (2005) afirmam que as exportações, as quais foram facilitadas por fatores externos ocorridas nos últimos anos (abertura comercial, desvalorização de câmbio, entre outros), contribuíram para o aumento da oferta de emprego, renda, impostos e PIB. A Figura 3 ilustra a evolução da balança comercial de produtos de florestas plantadas no Brasil entre os anos de 1998 a 2008, em milhões de US\$.

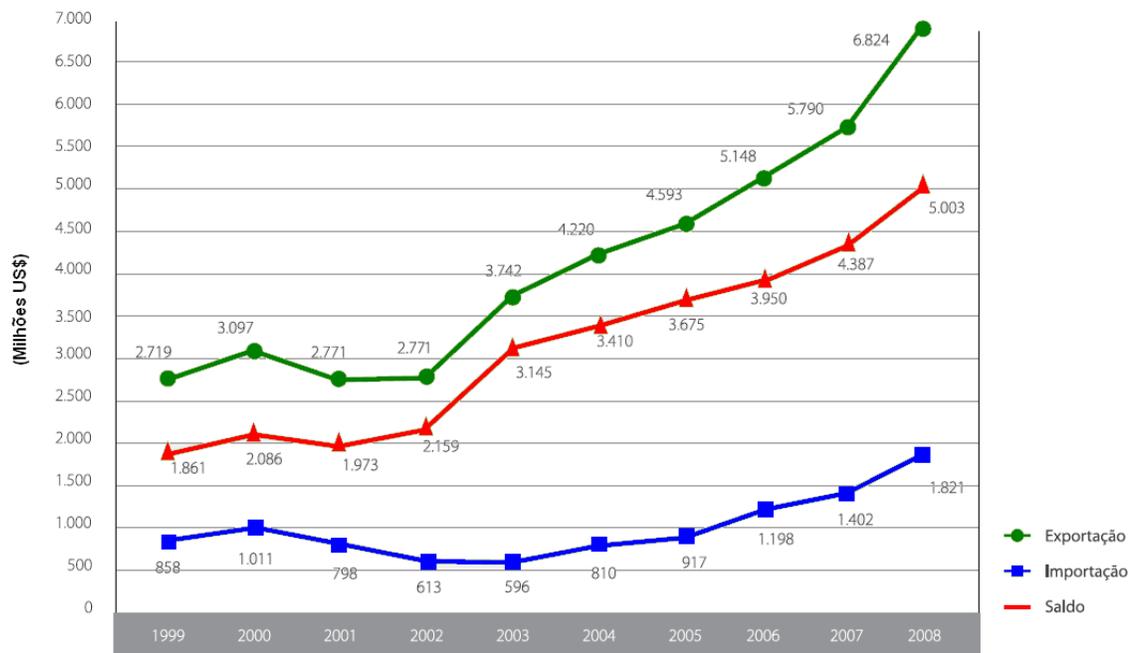


Figura 3. Evolução da balança comercial de produtos de florestas plantadas no Brasil. Fonte: ABRAF, 2009.

Higa et al. (2006) afirmam que a maior parte da madeira produzida atualmente por reflorestamento, abastece mercados menos nobres, tais como celulose, papel e lenha industrial e se essas fossem destinadas a mercados mais nobres, o valor da madeira de reflorestamento poderia atingir valores 3 vezes do anteriormente mencionado. Porém, mercados mais nobres são mais restritos para o consumo da madeira de reflorestamento devido à rejeição por falta de incentivo e divulgação de suas qualidades. A Tabela 1 mostra o consumo em toras de madeiras plantadas no Brasil.

Tabela 1. Consumo Industrial de Madeiras em Toras no Brasil em 2008. Fonte: ABRAF (2009).

Destino/Uso	Volume (10³m³)
Celulose e Papel	57.081
Carvão Vegetal	23.298
Lenha Industrial	39.472
Serrados	34.270
Lâminas e Compensados	6.276
Painéis reconstituídos	5.955
Outros	4.894
Total	171.246

Dentre as culturas florestais mais exploradas no país para reflorestamento, o gênero *Eucalyptus* seguido pelo *Pinus* se destacam mais atualmente. Segundo HIGA et al. (2006), o balanço de reflorestamento no país estimou que nos últimos sete anos a área de eucalipto reflorestado saltou de 2,5 milhões para 3,4 milhões de hectares de árvores plantadas. Gonçalves (2008) relata que as maiores regiões produtoras se encontram no Sudeste e Sul, com destaque para os Estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais.

Higa et al. (2006) afirmam que o eucalipto, o qual é originário da Austrália, envolve mais de 670 espécies que estão adaptadas a diferentes tipos de climas e solos, podendo ser utilizados em diversas finalidades. No Brasil a adaptabilidade do eucalipto é muito grande exibindo cerca de 100 tipos de espécies cultivadas. O *Eucalyptus grandis* é a mais comum, com 55% da área total, seguido pelo *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla* com 17% e 9%, respectivamente. Scarpinella (2002) relata que a maioria das espécies de eucalipto é

conhecida como árvores de floresta alta atingindo alturas que variam de 30 a 50 metros, porém este valor varia muito de espécie para espécie podendo apresentar baixas estaturas com cerca de 10 a 25 metros (espécies arbustivas), como há também espécies que atingem alturas superiores a 100 metros. No Brasil a média de altura do eucalipto cultivado supera os 70 metros, como é o caso do *Eucalyptus grandis* e o *Eucalyptus deglupta*.

3.2.1 Barreiras impostas à silvicultura

Segundo Baena (2005), a produtividade florestal brasileira chega a ser 10 vezes maior que dos outros países concorrentes. Logo, o investimento neste tipo de cultura atrai a atenção de grandes investidores nacionais e estrangeiros, o que alavanca este setor da economia. Mesmo assim, Baena (2005) ainda afirma que, apesar de um cenário tão favorável para o mercado de madeira, o empresariado brasileiro tem que superar diversos obstáculos para manter a viabilidade econômica do agronegócio do reflorestamento, os quais seriam intransponíveis em muitos países. Entre eles estão as altas taxas de juros e a voracidade tributária, sendo ambas campeãs mundiais.

Valverde et al. (2005) verificaram que os principais problemas internos que afetam o melhor desempenho do sistema de exploração madeireira são: custos operacionais elevados, fretes, competição entre empresas e baixo valor comercial da madeira.

Seixas (1984) afirma que em termos de extração do eucalipto, passado sua idade de corte, tem início a segunda fase da atividade florestal, que compreende a etapa de planejamento do sistema de exploração da árvore energética. Este sistema é baseado fundamentalmente na existência de mão de obra barata e abundante, e de transporte para o abastecimento das unidades industriais. Seixas (2005) explica que o custo do transporte de madeiras tende a ser maior nesse do que nos outros setores de transporte de carga, devido às suas características de especificidade de carga e exclusividade do frete. O transporte florestal possibilita ao caminhão viajar carregado somente em um sentido, tornando maiores os custos por unidade de volume. A tabela 2 mostra todos os dados de composição dos custos da atividade exploratória madeireira, seguindo as legislações atuais. O estudo de custo se refere a transporte de madeira para uma distância de até 90 quilômetros entre a região de corte e a

entrada do material na fábrica. Através destes dados nota-se que, no Brasil, aproximadamente 45% do custo total de exploração da madeira é absorvido apenas pelo transporte.

Tabela 2. Dados de custo da exploração da madeira. Fonte: Seixas, 2005.

Operação	Custo (US\$/m ³)
Corte	3,04
Extração	2,71
Transporte (90 km)	5,59
Estradas	0,51
Planejamento e Supervisão	-
Outros custos	0,70
Total	12,55

3.3 A legislação Brasileira para o transporte de madeiras

Silva et al. (2007) explicam que o transporte florestal objetiva a movimentação das toras dos pátios ou das margens das estradas nos talhões até o local de consumo ou pátio das empresas. No Brasil, o transporte de madeira é levado a cabo por via ferroviária, via fluvial, bem como por rodovias, sendo que esta última atende aproximadamente 85% de toda a madeira transportada.

Seixas (2005) relata que o transporte rodoviário atualmente sofre pressão de aumento de custos em virtude da instalação de postos de pedágios nas rodovias, reajustes de preço de combustível e maior rigor na observância da Lei da Balança restringindo assim o peso máximo para que caminhões possam trafegar nas rodovias nacionais.

O transporte de madeiras nas estradas públicas está subordinado a uma série de normas legais. Essas normas se aplicam a todo tipo de carga transportada, uma vez que não existe legislação específica para os veículos que transportam produtos florestais. Machado et al. (2003) detalham a legislação do transporte de cargas em rodovias. Atualmente, as normas de trânsito em vigor no país são ditadas pela Lei N° 9.503, de 23 de Dezembro de 1.997, a qual instituiu o novo Código Nacional de Trânsito. Todavia é importante saber que as leis de trânsito são dinâmicas e podem sofrer alterações a qualquer momento. As normas que limitam

as dimensões e os pesos dos veículos, Autorização Especial de Trânsito (AET), e as dimensões dos pneus são as mais importantes para o transporte rodoviário florestal, pois normalmente são utilizados, nessa atividade, veículos pesados e extra pesados. A legislação em vigor sobre dimensões, número de unidades e pesos de veículos é normatizada pela Resolução 012/98 do CONTRAN. Essa legislação determina que os comprimentos máximos da carreta sejam de 14 metros para veículos simples, 18,15 metros para veículos articulados e 19,80 metros para veículos com reboques, com largura máxima de 2,60 metros e altura máxima de 4,40 metros. Quanto ao número de unidades, é proibido até o momento, trafegar com veículos com mais de duas unidades, incluída a unidade tratora. Casos como combinações do tipo *rodotrem*, *bitrem* e *tritrem* só podem circular com a AET. E, por fim, a legislação limita o Peso Bruto Total (PBT) ou o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) a um peso máximo de 45 toneladas. Para trafegar acima do peso limite é necessário portar uma AET.

Higa et al (2006) relatam que a existência de mercados distantes para o setor madeireiro não é um fator positivo porque o custo de transporte representa um componente de muito peso no custo da madeira posto-fábrica. Silva et al. (2007) afirmam que estudos buscando maior eficiência no transporte rodoviário florestal são muito importantes. As empresas têm investido no transporte de madeiras. Segundo a ABRAF (2009), a previsão é de que o setor deve investir até 2013 um montante de R\$ 4 bilhões no setor de colheita e transporte, o que corresponde a 23% do total investido em todas as cadeias do segmento considerados na análise como de exploração, produção e P&D, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4. Distribuição da perspectiva de investimento das empresas associadas da ABRAF até 2013. Fonte: ABRAF (2009).

Para contornar os problemas gerados pelo custo do transporte, diversas pesquisas vêm tentando buscar essa otimização tendo nas características da madeira, uma forma de reduzir os custos totais dessa cadeia da economia. Em assim sendo, Machado e Lopes (2000) relatam um levantamento muito importante relacionando o comprimento das toras cortadas com o custo do transporte. Machado e Lopes (2000) concluíram que o aumento do custo de colheita e transporte são maiores para toras de até 2,5 metros e também permitiu indicar que a colheita de toras de até 6 metros de comprimento apresentou os melhores rendimentos operacionais e menores custos de operação de extração e transporte de madeira. Foi também concluído que o comprimento da tora da madeira influencia significativamente a produtividade e o custo de extração bem como o transporte florestal. A mudança no comprimento de corte do fuste de 5 para 6 metros promove uma redução de 11,1% no custo de transporte ($\text{R}\$.\text{t}^{-1}.\text{km}^{-1}$) e um aumento de 10% no desempenho dos veículos ($\text{t}.\text{km}^{-1}.\text{litro}^{-1}$).

3.4 Propriedades mecânicas da madeira

A qualidade da madeira é influenciada por fatores internos e externos. Silva et al. (2005) relatam um estudo da influência da idade pela sua posição no sentido da seção radial na flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis*. Ao final do estudo, Silva et al. (2005) concluíram que o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) foram influenciados pela idade e pela posição na seção transversal do fuste das árvores. Para o módulo de elasticidade, a idade teve mais influência que a posição da seção radial, porém situação inversa foi observada no que tange o módulo de ruptura. Os módulos de elasticidade e de ruptura apresentam uma mesma tendência de crescimento em relação à idade e à posição radial, no sentido medula-casca. Os maiores valores de módulo de elasticidade e de ruptura foram observados nas madeiras de idade mais elevada.

Evans et al. (2000) explicam que a densidade figura como outra importante propriedade mecânica da madeira, a qual é calculada através de sua densidade básica. Lobão et al. (2004) afirmam que a densidade influencia bastante a resistência mecânica da madeira. O teor de umidade influencia na resistência da madeira. Logsdon e Calil Jr. (2002) explicam que “para teores de umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF), a resistência se mantém

praticamente constante para teores de umidade acima do ponto de saturação das fibras a resistência se mantém praticamente constante. Para teores de umidade abaixo deste ponto a resistência aumenta com o decréscimo do teor de umidade, em geral através de uma exponencial muito suave que pode ser associada, para intervalos limitados de umidade, a linha retas (ver Figura 5, alíneas a e c). Para teores de umidade mais baixos, em alguns casos, a relação resistência-umidade pode atingir um ponto de máximo, e em seguida decrescer com o decréscimo do teor de umidade (Figura 5, alínea c). Para a rigidez relações semelhantes são observadas. Em alguns casos particulares não existe influência do teor de umidade sobre a propriedade de resistência (Figura 5, alínea d), como por exemplo na flexão dinâmica”.

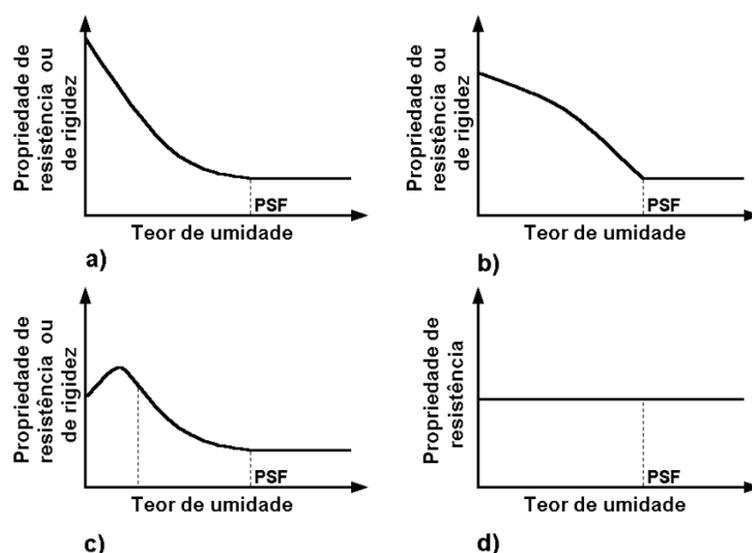


Figura 5. Curvas típicas utilizadas para representar a influência do teor de umidade sobre as propriedades de resistência e rigidez. Fonte Logsdon e Calil Jr., 2002.

Magnanin Filho (2000) afirma que os materiais de fibras longas são considerados de um ponto de vista macro mecânico, como sendo meios contínuos, homogêneos e anisótipos. Além disso, além do arranjo das fibras dentro da matriz de rigidez, esses passam a apresentar planos de simetria elástica, o que reduz seu grau de anisotropia. Esse arranjo obedece, normalmente, a uma disposição simétrica em relação a algum eixo. Devido à existência dessas simetrias, o material deixa de ser completamente anisótropo e a matriz de rigidez [C] assume forma mais simples, quando referenciadas a essas direções, podendo se assumir então como um corpo ortótropico. A ortotropia apresenta três planos de simetrias ortogonais e com

propriedades diferentes a cada plano. A matriz de rigidez da madeira para o caso de ortotropia é uma equação matricial dado em Bodig e Jaine (1993), ao qual é formada por 12 constantes. A relação constitutiva das propriedades mecânicas é expressa, na forma matricial, pela equação (01).

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\nu_{LR} & -\nu_{LT} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_L \\ \gamma_R \\ \gamma_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} \quad (01)$$

Onde:

σ_L = Tensão Longitudinal [MPa].

σ_R = Tensão Radial [MPa].

σ_T = Tensão Tangencial [MPa].

E_L = Módulo de Elasticidade Longitudinal [MPa].

E_R = Módulo de Elasticidade Radial [MPa].

E_T = Módulo de Elasticidade Tangencial [MPa].

G_{LT} = Módulo de Rigidez Longitudinal-Tangencial [MPa].

G_{LR} = Módulo de Rigidez Longitudinal-Radial [MPa].

G_{RT} = Módulo de Rigidez Radial-Tangencial [MPa].

γ_L = Deformação Específica Longitudinal.

γ_T = Deformação Específica Tangencial.

γ_R = Deformação Específica Radial.

γ_{LT} = Deformação Específica Longitudinal-Tangencial.

γ_{LR} = Deformação Específica Longitudinal-Radial.

γ_{RT} = Deformação Específica Radial-Tangencial.

Furlani (1.995) afirma também que a matriz de rigidez [C] ainda pode ser reduzida a nove constantes, devido à simetria existente entre alguns coeficientes tensores, como segue abaixo na equação (02).

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (02)$$

Onde:

ν_{ij} = Coeficiente de Poisson nas direções i e j.

ν_{ji} = Coeficiente de Poisson nas direções j e i.

E_i = Módulo de Elasticidade na direção i [MPa].

E_j = Módulo de Elasticidade na direção j [MPa].

Logo, a equação (01) se resume na equação (03). Ballarin e Nogueira (2003) explicam que os termos da matriz de rigidez [C] podem ser determinados experimentalmente por medições realizadas por ensaios destrutivos ou não destrutivos.

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \gamma_L \\ \gamma_R \\ \gamma_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} \quad (03)$$

(Simétrico)

Para se obter todas as constantes elásticas para se determinar a matriz de rigidez não foi necessário realizar ensaios destrutivos para as direções radial, longitudinal e transversal. Algumas destas constantes elásticas podem ser obtidas através de relações matemáticas diretas. Bodig e Jaine (1.993) sugerem as seguintes relações diretas entre as constantes elásticas da madeira:

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1 \quad (04)$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1 \quad (05)$$

$$E_L : G_{LR} \approx 14 : 1 \quad (06)$$

Das constantes elásticas da matriz, destaca-se a complexidade de serem estabelecidas correlações para os coeficientes de Poisson, bem como as variações encontradas de uma espécie para outra. Gonçalves et al. (2011) fornecem dados de módulo de Poisson para as mais diversas direções em espécimes de madeira. A tabela 3.3 mostra os dados de módulo de Poisson para a espécie *Eucalyptus saligna* selecionada para este trabalho de pesquisa

Tabela 3. Módulo de Poisson para o *Eucalypto saligna*. Fonte: Gonçalves et al., 2010.

Módulo de Poisson		
ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}
1,112	0,817	0,369

A Figura 6 ilustra a tensão disposta em barras e feixes submetidos à flexão. Beer e Johnston Jr. (1996) explicam que em qualquer ponto de uma barra esbelta, submetido à flexão pura, tem-se um estado uniaxial de tensões e que a deformação específica ϵ_{xx} e a tensão σ_{xx} são negativas na parte superior da barra (compressão) e positivas na parte inferior (tração). Beer e Johnston Jr. (1996) ainda afirmam que deve haver ainda uma superfície paralela à face superior e à face inferior da barra, onde ϵ_{xx} e σ_{xx} se tornam nulas, a qual é denominada superfície neutra. Calil Jr. et al. (2003) afirmam que, quando a madeira é solicitada em flexão simples, ocorrem tensões de compressão e tração paralelas às fibras, além de cisalhamento horizontal nas regiões dos apoios e compressão normal às fibras. Estabelece-se, então, uma propriedade interessante e inerente ao trabalho de pesquisa ao qual é apresentada por Timoshenko (citado por SEIXAS, 1984) o qual afirma que a madeira, quando atua unida em feixes, apresenta resistência diferente quando comparada com vigas isoladas. Timoshenko (citado por SEIXAS, 1984) enfatiza que, em um feixe de toras, o atrito existente entre as mesmas fará com que a flexão de uma seja dependente da outra, resistindo ao deslizamento

das peças e tornando o feixe muito mais rijo e forte do que as toras individuais. Góes e Dias (2005) afirmam que, pela teoria, a composição de uma viga por feixes deveria ser uma seção transversal equivalente à soma de todas as outras seções transversais individuais; contudo, pode ocorrer o deslizamento entre as peças, gerando esforços internos que diferem consideravelmente daqueles correspondentes às ligações rígidas e apresentando momento de inércia e módulo de resistência como sendo uma fração das peças maciças. Portanto, de acordo com o que foi exposto acima, optou-se, neste trabalho de pesquisa, levar a cabo ensaios de carregamento de flexão simples, visto serem as solicitações de esforço mais atuantes no transporte de madeiras.

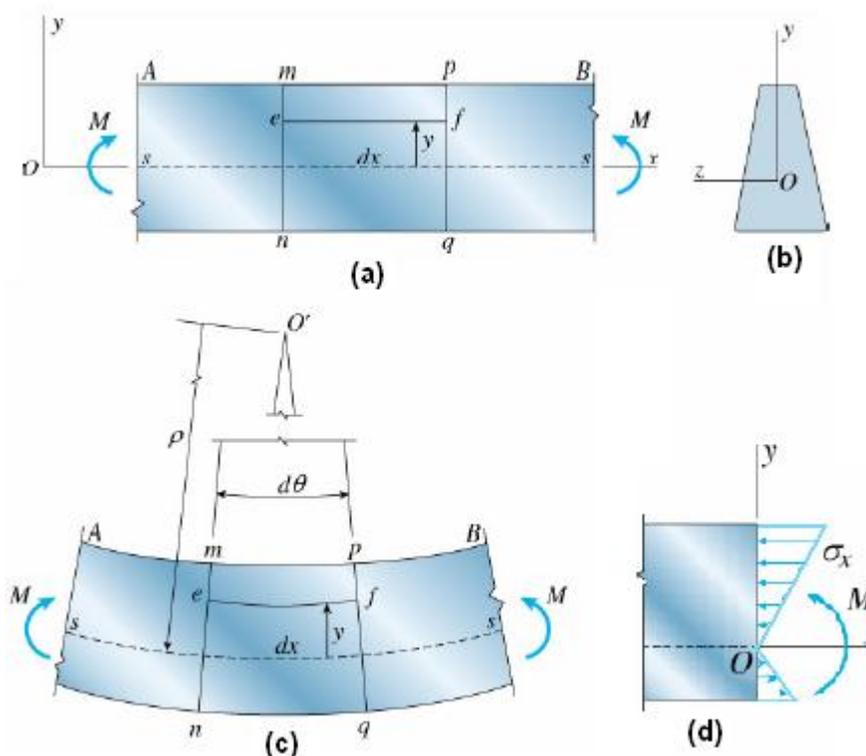


Figura 6. Deformação em uma viga em flexão pura: (a) Vista lateral da viga; (b) Seção transversal da viga; (c) Viga deformada; (d) Vista lateral com a distribuição de tensão. Fonte: Buffoni, 2.004.

Conforme foi explicitado acima, a motivação do setor empresarial e a importância da busca de desenvolvimento de tecnologia para diminuir custo de transporte da madeira, justificam este trabalho de pesquisa, o qual visa estudar o comportamento mecânico de feixes

de madeira, dando suporte científico ao emprego de feixes como parte integrante da estrutura de um *forwarder*, otimizando-o, de maneira a diminuir o peso morto da carreta e permitir um transporte em volume maior pelo mesmo custo.

As propriedades mecânicas da madeira oferecem a possibilidade de otimizar equipamentos de transporte. Porém, para analisar a possibilidade deste tipo de otimização, é necessário entender o mecanismo de distribuição de tensão de um feixe de toras. Mazzeti Filho (2004) afirma que ensaios dinâmicos utilizando métodos convencionais de instrumentação e análise dos dados é uma tarefa particularmente complexa. Métodos numéricos possuem o inconveniente de serem pouco didáticos e não apresentar uma relação visível com o fenômeno físico em estudo. Nesta lacuna encaixam-se os métodos fotoelásticos, os quais não diferem do formato geométrico, isto é, permite a análise de distribuição de tensão independente da geometria do corpo de prova. Ao mesmo tempo fornece dados de distribuição de tensão sob corpos de prova considerando todas as variáveis exibidas por este, tais como descontinuidades, anisotropia, entre outros.

3.5 Fundamentos da fotoelasticidade

Segundo Myiake et al. (2004), a fotoelasticidade reúne um grupo de métodos experimentais para análise de tensões e de deformações, empregados nas diversas áreas da engenharia para avaliar o estado de tensões em peças estruturais. Callister Jr. (2006) explica que o fundamento teórico da fotoelasticidade está baseado na ocorrência de deformações elásticas de um corpo enquanto que as propriedades ópticas desse se tornam anisotrópicas. Quando isso ocorre, franjas de interferência são geradas, permitindo-se deduzir a distribuição de tensões no interior da amostra. Entende-se como dedução a determinação das direções e intensidade das tensões. Myiake et al. (2004) afirmam que, as direções e intensidade de tensões são obtidas através da análise das franjas isóclinas e isocromáticas, respectivamente. Portanto, para entender o fenômeno de formação de franjas em um corpo quando carregado, deve-se compreender dois tipos de fenomenologia, a birrefringência dos materiais e a interferência de ondas. No entanto, para analisar o comportamento mecânico de um corpo carregado, deve-se compreender o significado das franjas isóclinas e isocromáticas.

Quinan (2005) explica que muitos materiais não cristalinos e transparentes, os quais são opticamente isotrópicos quando livre de tensões, se tornam opticamente anisotrópicos, apresentando características semelhantes aos cristais quando são submetidos a ações. Essas características persistem enquanto o carregamento é mantido e desaparecem quando as cargas são removidas. Esse comportamento é conhecido como birrefringência (refração dupla) temporária. Spinelli (2003) afirma que um material é dito birrefringente quando ao ser atravessado por um raio de luz ocorre dois índices refrativos, os quais dependem do material e da espessura da peça.

Segundo Silva e Muramatsu (2007), a interferência é um fenômeno que depende da coerência da luz, uma vez que essa mostra a superposição de duas ondas formando as franjas. A superposição coerente de ondas originadas em pontos distintos da superfície dá origem a um padrão de interferência cujas intensidades também variam ao acaso. Nos pontos de interferência construtiva ou destrutiva ocorre a formação de grãos claros e escuros, respectivamente. Na Figura 7 pode-se observar um esquema básico de formação dessas raias por meio da interferência de duas ondas provenientes de uma mesma fonte coerente.

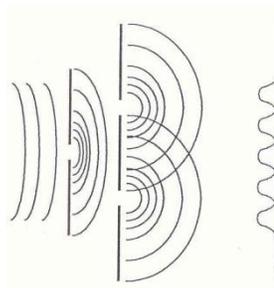


Figura 7. Esquema de formação das ondas de interferência. Fonte: LINO, 2001.

Portanto, Spinelli (2003) relata que uma explicação para o fenômeno da fotoelasticidade pode ser baseada num modelo mecânico esquematizado por uma rede de átomos ligados entre si através de uma nuvem de elétrons. Essa nuvem pode ser representada por “molas” com diferentes constantes de rigidez. Uma perturbação eletromagnética, como por exemplo, uma luz polarizada incidindo sobre esta nuvem de elétrons, se propagaria com diferentes velocidades dependendo de sua orientação através dessa nuvem. Essa orientação

diferenciada seria responsável pelo aparecimento de uma gama de cores as quais representam as tensões ou deformações sofridas pelo modelo mecânico.

Quinan (2005) explica que a análise do comportamento mecânico de um corpo pela fotoelasticidade baseia-se na aquisição e tratamento de imagens de modelos fotoelásticos visando obter as ordens de franjas de modelos submetidos a um campo de tensões. Materiais birrefringentes quando submetidos a ações exibem o campo de tensões/deformações na forma de faixas coloridas denominadas franjas isocromáticas. Esse padrão de franja é linearmente proporcional às diferenças entre as tensões/deformações principais, isto é, franjas de mesma cor apresentam mesma intensidade de tensão e deslocamento. Já a direção da tensão pode ser obtida valendo-se da propriedade das isóclinas, sendo que essa representa o local geométrico ao longo do qual as direções das tensões principais são as mesmas em todos os seus pontos. Santos et al. (2010) complementa a análise, afirmando que outra informação importante sobre as franjas formadas sobre o corpo está relacionada como distanciamento entre si. O autor explica que as franjas podem indicar a concentração de tensões através de sua proximidade, isto é, quanto maior a proximidade das franjas, maior será a concentração de tensão neste local. A Figura 8 ilustra o resultado de uma análise de tensões por fotoelasticidade clássica.

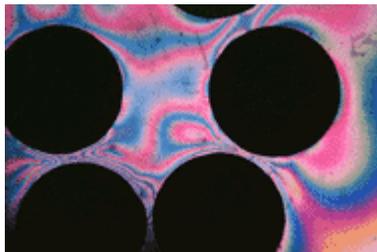


Figura 8. Franjas fotoelásticas em uma placa com furos e sujeita a carga axial. Fonte: Caputo, 2008.

Caputo et al. (2008) descrevem a análise das franjas fotoelásticas mostradas na Figura 8. A análise da figura mostra que o carregamento na placa não é muito grande, pois não há uma grande quantidade de linhas; porém, pode-se notar que próximo aos pontos de descontinuidade, ou seja, dos orifícios, a concentração de tensões é maior, o que é indicado pela menor distância entre as franjas. Gazzola et al. (2010b) explicam que o significado da diferença de concentração de tensão no corpo pode ser interpretado como um ponto em que possa haver uma falha no material, ou um ponto de descontinuidade.

Das técnicas de formação de franjas, bem como o tipo de fonte de luz utilizada, derivam os diversos métodos fotoelásticos atualmente conhecidos. Costa (2.006) afirma que os métodos fotoelásticos mais conhecidos são: a fotoelasticidade clássica, a fotoelasticidade holográfica, o *speckle* interferométrico e as técnicas de *moiré*.

3.6 Fotoelasticidade clássica

A fotoelasticidade clássica foi o primeiro método óptico utilizado para determinar o comportamento mecânico de um corpo sob carregamento. Oliveira (1988) relata que esta técnica 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 a amostra é carregada, 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.

Quinan (2005) cita que o arranjo experimental consiste em um sistema composto por uma luz polarizada, um sistema de aquisição de imagens e material fotoelástico. A Figura 9 ilustra a disposição dos equipamentos para aquisição de imagens, enquanto que a Figura 10 exhibe a disposição dos equipamentos para o arranjo experimental de um ensaio fotoelástico clássico.

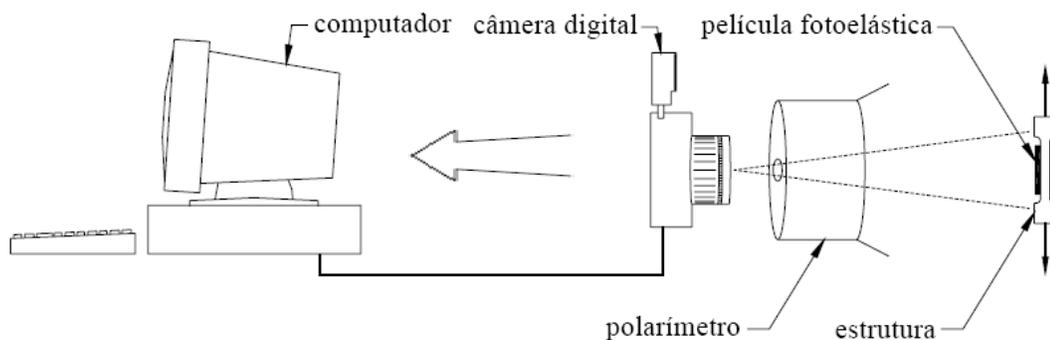


Figura 9. Disposição dos equipamentos para aquisição de imagens em um ensaio de fotoelasticidade clássica.

Fonte: Myiake, 2.004.

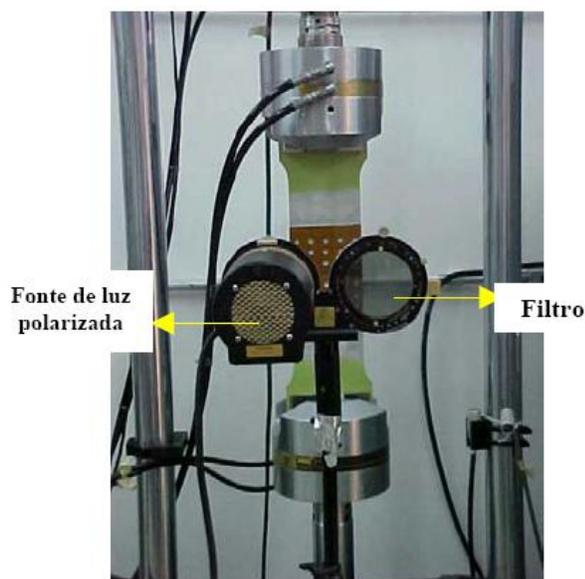


Figura 10. Disposição dos equipamentos para o arranjo experimental de um ensaio fotoelástico. Fonte: Spinelli, 2.003.

Segundo Myiake (2004), o sistema de aquisição de imagem consiste de uma câmera digital acoplada ao polarímetro de reflexão (filtro) e ao computador, além de uma camada fotoelástica colada ao corpo de prova, iluminado, em seguida, por uma fonte de luz polarizada e analisado por um polarioscópio. A interação da luz polarizada com os modelos de tensão produz padrões característicos de cores, conhecidos como “padrões de tensões” ou franjas, as quais contêm informações empregadas na análise das tensões no elemento mecânico. Spinelli (2003) explica que as cores das franjas são dependentes do tipo de luz polarizada incidente sob o corpo de prova. Se a fonte de luz é monocromática, então surgirão franjas claras e escuras, e, se a luz incidente for branca, serão observadas franjas coloridas. As Figuras 11 e 12 mostram as franjas produzidas por dois ensaios fotoelásticos, no qual se obtiveram franjas monocromáticas e policromáticas, respectivamente.

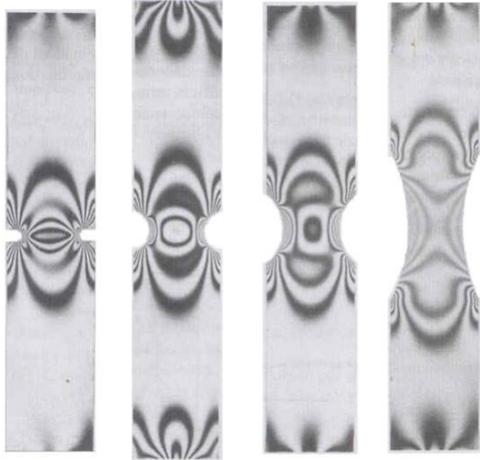


Figura 11. Exemplos de distribuição de franjas monocromáticas em amostras fotoelásticas.
Fonte: Callister Jr. 2006.

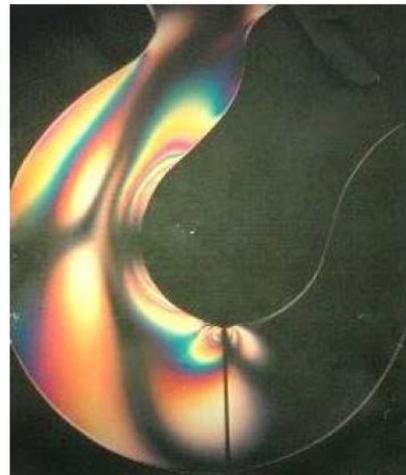


Figura 12. Exemplos de distribuição de franjas policromáticas em amostras fotoelásticas. Fonte: Spinelli, 2003.

Oliveira (1988) afirma que o material fotoelástico adequado a ser utilizado deve apresentar determinadas propriedades como: constante óptica (K) com alto valor para maximizar o número de franjas por unidade de deformação; baixo módulo de elasticidade (E^c) para minimizar o efeito de reforço; alta resistência à relaxação óptica e mecânica, para garantir uma estabilidade das medidas com o tempo; alto limite de proporcionalidade com relação à deformação, para maximizar a faixa de utilização do material quanto à solicitação; fácil colagem para garantir uma perfeita transmissão das deformações na interface corpo de prova/camada; transparência; facilidade de usinagem; não apresentar manchas ópticas; livre de tensões residuais; e possibilidade de utilização em superfícies irregulares.

As técnicas de fotoelasticidade clássica mais comum são: transmissão, reflexão e congelamento. Willemann (2002) diz que, a fotoelasticidade por transmissão consiste na análise de um modelo fotoelástico com geometria semelhante ao objeto de estudo, feito por um polímero transparente. Os polímeros possuem propriedades ópticas especiais (de birrefringência) as quais se modificam de acordo com o estado de tensões. Oliveira (1988) relata que a fotoelasticidade de transmissão é bastante precisa e fornece uma visão geral do campo de tensões, mas depende da confecção de modelos que, muitas vezes a torna complexa, limitando seu emprego. A Figura 13 mostra um molde de corpo de prova fotoelástico empregado pela técnica de fotoelasticidade de transmissão.

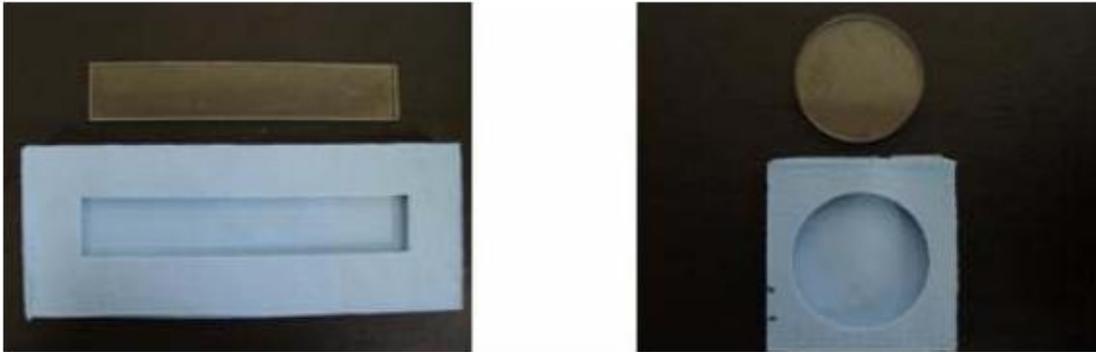


Figura 13. Moldes fotoelásticos obtidos para a obtenção do modelo fotoelástico. Fonte: Souza e Araújo, 2.007.

Oliveira (1988) ainda afirma que, a técnica da fotoelasticidade de reflexão consiste em colar uma camada de material fotoelástico sobre a superfície do corpo de prova com cola apropriada que produza uma superfície reflexiva na interface corpo de prova/camada. É uma técnica relativamente precisa, fornece uma visão global do campo de tensão/deformação e não requer a confecção de modelos. A obtenção dos parâmetros pode ser feita diretamente na estrutura ou componente mecânico, quando esses se encontram submetidos a carregamentos reais.

Há uma terceira maneira, e pouco explorada, denominado de fotoelasticidade por congelamento. Vaz et al. (1999) explicam que o método consiste em cobrir o corpo com um material fotoelástico, na sequência uma carga é aplicada uma carga e depois o corpo é submetido a um congelamento das franjas fotoelásticas obtidas pelo material fotoelástico para posterior análise. O congelamento das franjas fotoelásticas nas réplicas é obtido levando o corpo de prova ao forno e elevando-se a temperatura para 127° C. Após resfriamento para a temperatura ambiente, as franjas fotoelásticas ficam registradas ou "congeladas" em seu interior. As réplicas são cortadas transversalmente na linha mediana, de modo a permitir uma leitura mais adequada das franjas fotoelásticas. O corpo de prova é fixado no interior do polariscópio de transmissão em posição perpendicular ao feixe de luz polarizada, permitindo a observação das franjas coloridas que correspondem à distribuição tridimensional das tensões internas.

Willeman (2002) cita as vantagens da fotoelasticidade como: (1) as tensões podem ser determinadas em modelos de formato complexo, (2) determinação de tensões resultantes

de carregamentos complexos, ou seja, em diversas direções, (3) e a determinação da localização e magnitude de concentração de tensões. Porém, Oliveira (1988) alerta para algumas desvantagens dessa classe de métodos: (1) a preparação dos corpos de prova fotoelástico acabam incorporando tensões residuais, (2) os resultados são altamente influenciados pelas condições ambientais de umidade e temperatura e (3) o alto custo para obtenção da resina fotoelástica.

3.7 Holografia interferométrica

Maschio (2008) afirma que, a holografia é uma técnica óptica baseada em métodos interferométricos, caracterizado pela alta eficiência no registro fiel de objetos tridimensionais. Amplamente empregada na indústria, essa técnica permite analisar elementos ópticos holográficos (redes de difração, filtros, etc.), testes não destrutivos, estudo de fotoelasticidade, processamento óptico de informação, análise de deformações por interferometria holográfica, etc..

Fantin (2003) explica os princípios da holografia clássica. O processo holográfico pode ser dividido em duas etapas: (a) gravar e (b) reconstruir a intensidade e a fase de uma onda de luz coerente. Nessa técnica, um feixe de luz coerente, geralmente originário de um laser, é dividido em dois: o feixe-referência e o feixe-objeto. O feixe-objeto é direcionado ao objeto cujo holograma será gravado. A onda luminosa refletida pelo objeto incide sobre uma superfície sensível à luz que também é simultaneamente iluminada pelo feixe-referência. Essa superfície, após o processamento fotográfico é denominada holograma.

Monteiro et al. (1997) afirmam que a combinação de holografia interferométrica e os conceitos da fotoelasticidade permitem obter um completo mapeamento de uma área tensionada. A subtração dos dois interferogramas é apresentada como um padrão de ondas interferométricas o qual descreve a distribuição de deslocamento que o objeto sofre entre as duas exposições.

Willemann (2002) ressalta que, para extrair informações sobre tensões utilizando a holografia interferométrica, é recomendado o uso da técnica de dupla exposição. Essa técnica consiste em iluminar a superfície a ser medida com feixes de laser vindos de duas direções diferentes. O padrão de *speckle*, formado pela iluminação com luz coerente, muda quando a

superfície é deformada. Os padrões de *speckle* antes e depois da deformação são gravados por uma câmera CCD. Técnicas de comparação entre as imagens permitem o registro de deslocamentos com resolução submicrométrica. A análise das franjas de interferência permite o cálculo dos campos de deslocamentos, deformações e tensões.

Os equipamentos empregados para os ensaios de holografia interferométrica utilizam luz laser, câmera CCD, lentes, espelhos e um divisor de feixes. O arranjo experimental básico é mostrado na Figura 14.

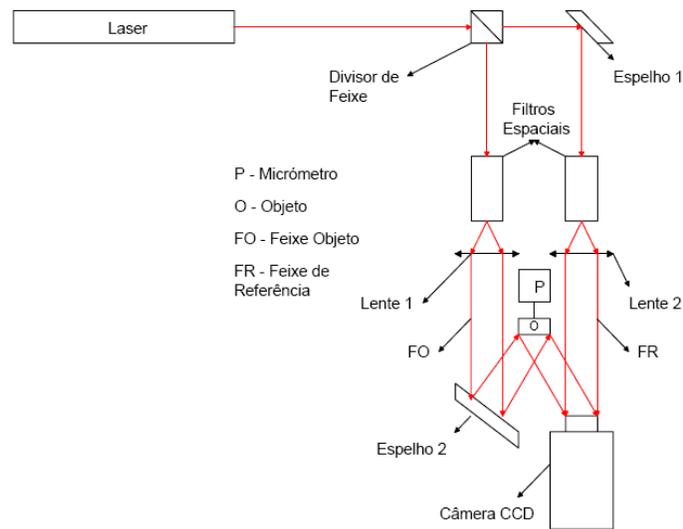


Figura 14. Arranjo experimental da holografia interferométrica. Fonte: Rivera et al. 2008.

Diferentemente do *speckle* interferométrico, o qual será abordado mais adiante, Willemann (2002) explica que a holografia interferométrica analisa o deslocamento puro, ou deslocamento de superfície. A Figura 15 mostra um holograma de deslocamento sobre uma lata comprimida por uma banda elástica em sua meia altura.

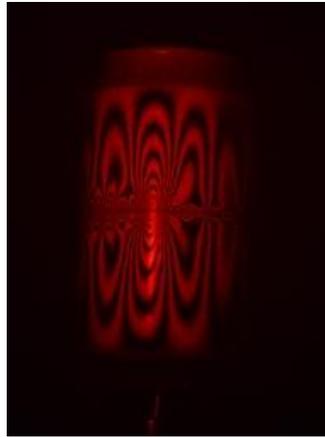


Figura 15. Holograma de uma lata pressionada por um elástico ao centro. Fonte: Crespo et al. (citado por GAZZOLA et al. 2010b).

Oliveira et al (2008) completam afirmando que, assim como na fotoelasticidade, a holografia interferométrica produz ondas senoidais que permitem determinar a distribuição de tensão através da análise da distância entre as franjas, bem como a quantidade de ondas indicam a concentração de tensões e o carregamento aplicado sobre o material em teste. A diferença entre a fotoelasticidade e a holografia reside na acurácia da holografia, a qual é maior que na fotoelasticidade clássica, além de a holografia apresentar resultados em tempo real, o que permite melhor compreensão da dinâmica do fenômeno. Outra vantagem da holografia simultânea está em controlar continuamente os deslocamentos (ou deformações) de uma superfície rugosa sem tocá-la ou marcá-la.

Wickert (1978) comenta sobre algumas desvantagens da holografia. O autor menciona que a holografia interferométrica simultânea é dificultada por vários fatores: (1) a posição do objeto e sua iluminação no momento em que o holograma é recolocado, a qual deve ser idêntica àquela da tomada. Isto implica que o objeto e os elementos ópticos referidos para formar o holograma devem manter-se fixos durante um bom tempo ou devem poder ser recolocados com excepcional precisão, pois o erro não pode ultrapassar uma fração de franja. (2) O encolhimento da emulsão fotográfica durante a revelação é outro problema a ser enfrentado, o qual causa distorções na frente da onda reconstituída afetando o formato e a disposição das franjas.

3.8 *Speckle* Interferométrico

Suterio (2005) menciona que a imagem de uma peça iluminada pela luz laser aparenta ter uma textura granular composta por pontos claros e escuros denominados grãos de *speckle*. O *speckle* resulta da interferência de ondas construtivas e destrutivas das múltiplas frentes de onda que são aleatoriamente refletidas por uma superfície opticamente rugosa. A luz que forma cada *speckle* é totalmente coerente, de forma que padrões de interferência podem ser observados, possuindo além de intensidade luminosa mensurável, também uma fase bem definida, que é diferente dos *speckles* vizinhos.

Pires et al. (2002) completam explicando que, o fenômeno resultante da interação de uma iluminação coerente com uma superfície opticamente rugosa é denominado efeito “*speckle*”. Por efeito *speckle* entende-se como o fenômeno de interferência de ondas mutuamente coerentes com uma variação ao acaso de fase. O resultado deste tipo de interferência é uma distribuição de máximos e mínimos na intensidade da luz que é estacionária no tempo, mas aleatória no espaço. Os picos individuais de intensidade representando pequenas manchas claras ou escuras são chamados de *speckle*. O agrupamento desses *speckles* é usualmente chamado de padrão de *speckle*. A Figura 16 mostra o padrão *speckle* de uma superfície tipicamente iluminada por uma luz laser.

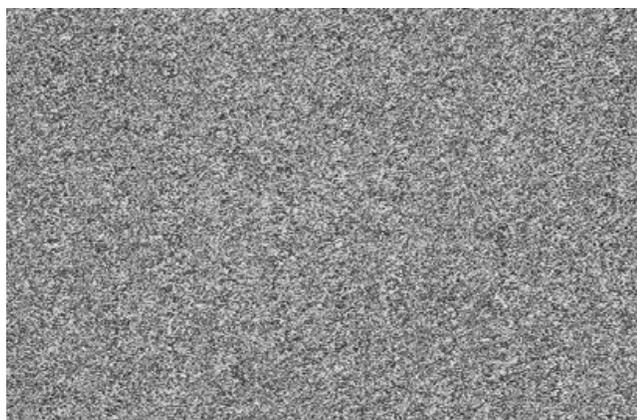


Figura 16. Padrão *speckle* de uma superfície tipicamente iluminada por uma luz laser. Fonte: Suterio, 2005.

A holografia e o *speckle* interferométrico estão intimamente ligados. Arranjos experimentais, formação de grânulos e terminologias são comuns para as duas técnicas. De

fato, isto não é mera coincidência. Silva e Muramatsu (2007) explicam que, toda a imagem iluminada por luz laser geralmente apresenta uma superfície granular onde o fenômeno *speckle* pode ser considerado apenas como sendo um ruído indesejável resultante de processos holográficos.

Suterio (2005) afirma que o padrão de franjas associado ao campo de deslocamentos é originado pela superposição óptica de dois padrões de *speckles* distintos (por exemplo: objeto em repouso e objeto deformado), os quais interferem entre si dando origem a um novo padrão de *speckle*. Esse novo padrão se modifica em função do campo de deslocamentos da superfície medida. Essa nova imagem gerada representa um padrão de ordem de franjas que está correlacionado com o deslocamento relativo sofrido pelo objeto. Willemann (2002) completa dizendo que os resultados são obtidos em formas de padrão de franjas, e cada franja corresponde a pontos que tem o mesmo deslocamento na direção de sensibilidade do vetor. Diferentemente da holografia, as franjas produzidas na interferometria *speckle* permite calcular as derivadas do deslocamento (ou gradiente de deslocamento) ao invés do deslocamento puro (total) ou deslocamento de superfície. A Figura 17 mostra as imagens obtidas do *speckle* interferométrico de um corpo sem carga, com carga e o resultado final da superposição de imagens.

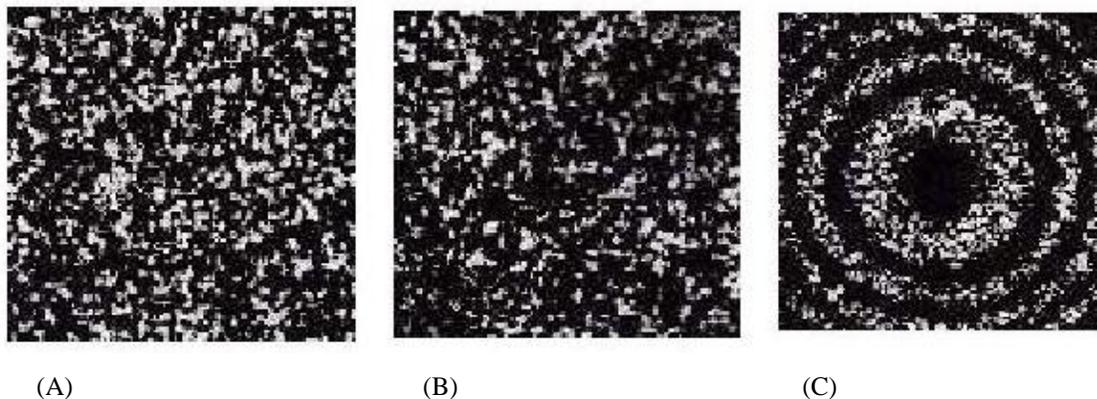


Figura 17. *Speckle* de objeto não deformado (A), deformado (B) e a superposição dos dois *speckles* resultando na interferometria final (C). Fonte: Pires et al. 2002.

Nota-se que o padrão das imagens obtidas são vistos como grânulos, resultantes da reflexão da luz laser, porém a soma das imagens resulta em um corpo com franjas formando ondas senoidais. Quanto maior o carregamento, menor será a granulação na imagem e o

resultado final será um *speckle* de franjas mais nítidas e próximas entre si. A análise das imagens produzidas pela técnica do *speckle* interferométrico não é diferenciada da técnica da holografia interferométrica devido ao primeiro ser derivado do segundo, respectivamente.

Diversos autores comentam as vantagens do *speckle* interferométrico sobre a holografia. Simões et al. (1998) afirmam que uma das vantagens do *speckle* interferométrico é sua alta sensibilidade nos resultados de deslocamento. Essa técnica, segundo Willemann (2002) sofre menos influência dos deslocamentos de corpo rígido. Pires et al. (2002) completa dizendo que a técnica do *speckle* é considerada mais versátil que a holografia, uma vez que a faixa de variação das direções e magnitudes de sensibilidade é muito mais ampla e a exigência quanto à resolução do meio de gravação é muito menos severa.

Porém, Muramatsu e Rodrigues (1995) atenta para o fato da produção de franjas pela técnica do *speckle* ser considerada de menor qualidade quando comparadas com a técnica da holografia. Porém, para uma análise qualitativa, a qualidade das franjas obtidas é comparável com as técnicas holográficas, mas sem as restrições mecânicas e térmicas impostas por essas.

Para obter esta alta sensibilidade, o *speckle* interferométrico, bem como o método holográfico, necessitam de equipamentos de alta resolução também, o que onera demasiadamente a montagem do arranjo experimental quando comparados com métodos fotoelásticos clássicos. Além disso, o ambiente experimental tem de estar o mais livre possível de ruídos. Entende-se como ruídos as vibrações externas e internas ao arranjo do experimento. Essas vibrações acabam interferindo sobremaneira nos resultados finais, tanto para a holografia quanto para o *speckle*. O fato das franjas se formarem após o processamento da imagem vai exigir um maior grau de habilidade e experiência do operador para conseguir melhores resultados.

3.9 Métodos de *Moiré*

Chiang (1979) define a palavra *moiré*, através dos dicionários, como molhado ou como padrão ondular, mas atualmente esta palavra também é utilizada para denotar a interferência de franjas criada pela superposição de dois ou mais padrões geométricos. Chiang (1979) ainda define que para este comportamento é dado o nome de fenomenologia *moiré*. Sciamarella (citado por LINO & DAL FABRO, 2004) explica que 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 franja 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 produziram o fenômeno. Este terceiro grupo de faixas é denominado “padrões” ou “franjas de *moiré*” e variam da cor escura (opaca) provocada por ondas de interferência destrutiva até a cor clara total provocada por ondas de interferência construtivas. A Figura 18 ilustra a fenomenologia *moiré* e a formação de franjas quando as grades são sobrepostas.

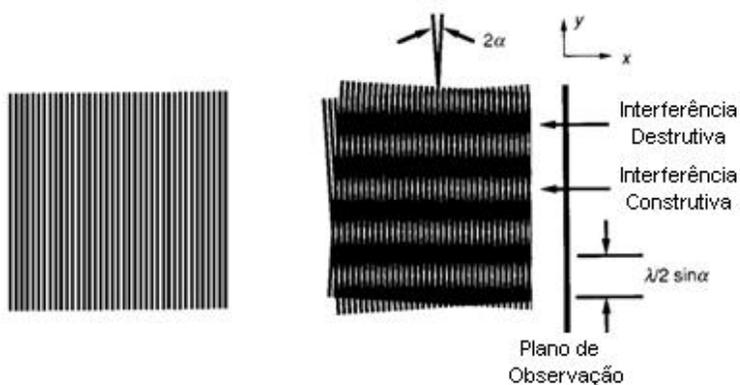


Figura 18. Sobreposição de grades e a formação de franjas claras e escuras. Fonte:Buytaert e Dirckx, 2008.

Lino (2002) 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 produção de franjas. A Figura 19 mostra o esquema de sobreposição de duas grades e o comportamento da formação das franjas.

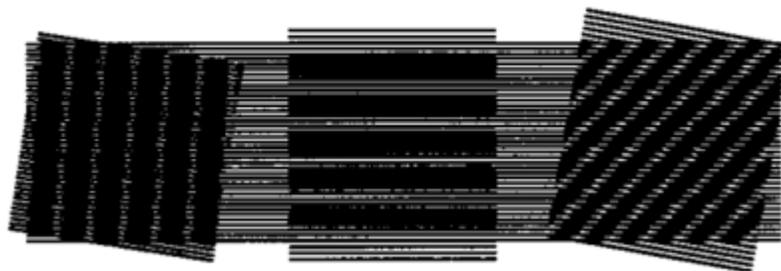


Figura 19. Sobreposição de grades e formação de franjas de *moiré* produzido. Fonte:Buytaert e Dirckx, 2008.

Porém, na técnica de *moiré*, nem sempre é necessária a superposição de duas grades em contato direto para ocorrer a formação de franjas. Chiang (1.979) 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, este fenômeno pode ser tratado como caso de interferência óptica. Post (1994) completa 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.

Post (1994) caracteriza a interferometria de *moiré* por uma lista de excelentes qualidades, incluindo: Técnica de medida em tempo real, isto é, o campo de deslocamento pode ser visto de acordo com a taxa de carregamento aplicado; Alta resolução espacial, ou seja, as medidas podem ser feitas em zonas minúsculas; Alto sinal para taxas de ruídos, ou seja, as franjas apresentam alto contraste e excelente visibilidade; Alta sensibilidade para deslocamentos no plano e fora do plano.

3.9.1 Sensibilidade da Técnica de *Moiré*

A sensibilidade das técnicas de *moiré* (TM) depende principalmente do período do retículo. Quanto menor o período, maior será a sensibilidade. Os retículos são compostos de faixas claras e escuras alternadas entre si, paralelas e equidistantes. 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, e a distância entre os centros de linha de grade de duas faixas escuras (ou claras) contíguas são chamado de 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 20 ilustra: a) a linha de uma grade e; b) o passo de uma grade. A Tabela 4 mostra a sensibilidade da técnica de *moiré* de acordo com a frequência das linhas.



Figura 20. Ilustração de grade com relação a: a) Linha de grade e b) Passo de grade.

Tabela 4. Frequência de linhas para as TM e a sensibilidade de cada uma. Fonte: Lino, 2.002.

Técnica de Moiré (TM)	Frequência (Linhas/mm)	Sensibilidade (μm)
Sombra	<20	100
Geométrico Plano	20 – 40	20
Interferométrico	1000 - 2000	0,5

Há diversos modos de disposição das faixas das grades (Figura 21) para a geração das franjas de *moiré*.

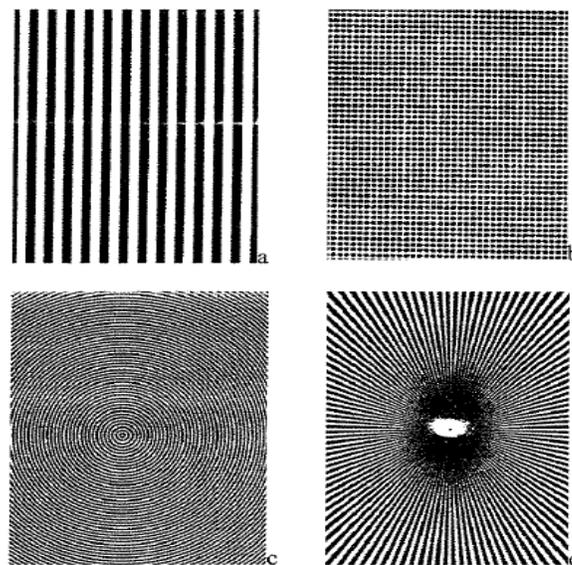


Figura 21. Grades para a geração das franjas de *moiré*. a) linhas paralelas; b) pontos equidistantes; c) círculos equidistantes; d) linhas radiais. Fonte: Durelli e Parks (1970, Citado por MAZZETI Filho, 2004).

Hertz et al. (2005) atentam que a sensibilidade da técnica é altamente afetada pela qualidade do equipamento utilizado nos ensaios e a precisão dos resultados está relacionado ao

diâmetro e a espessura das linhas que geram o padrão no material (vidro ou acrílico), juntamente com a qualidade e o número de fontes de luz, que focadas no objetivo revelam as franjas de *moiré* para análise dos dados.

3.9.2 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 produção e/ou projeção das franjas 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 feita por Ajovalasit (1998) adota como parâmetros a deformação. Este parâmetro classifica as TM em cinco grupos, tal como se seguem.

***Moiré* geométrico plano** – Fornece deslocamento bidimensional do objeto. Esse método é considerado de baixa sensibilidade.

***Moiré* interferométrico** – Fornece o deslocamento bi dimensional do objeto. Post (1994) afirma que o *moiré* interferométrico combina os conceitos de *moiré* geométrico com óptica interferométrica; por isso, essa TM é capaz de obter medidas de deslocamento no plano com alta sensibilidade. Logo, o *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 que a iluminação do objeto pode ser feita com uma fonte de luz (iluminação simples) ou duas fontes (iluminação dupla).

Para métodos de deslocamento utilizando o *moiré* holográfico, Sciamarella (1982) recomenda a iluminação dupla. Este arranjo experimental fornece a interação de duas ondas de *speckle* independentes uma da outra. Os padrões gerados se interceptam e formam um terceiro padrão, diferentes das demais, visualizado apenas pela câmera de TV. Com a deformação do objeto, os padrões *speckle* sofrem uma defasagem devido à alteração do caminho óptico percorrido pelos feixes, alterando a intensidade luminosa captada pela câmera CCD.

Uma das vantagens da holografia está associada a alta sensibilidade, a análise em tempo real, sujeito ou não à deformação. Porém, como já foi abordado, o laser está mais susceptível a erros provocados por ruídos (vibrações, variação de temperatura, etc).

Moiré por reflexão – Aplicado para testes de torção, onde as grades fornecem os ângulos de rotação bidimensional no eixo X (ΦX) e no eixo Y (ΦY).

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, 2.002).

Costa (2006) afirma que, há várias maneiras de se reproduzir a fenomenologia *moiré*. O efeito *moiré* pode ser obtido de várias formas podendo se destacar a técnica de *moiré* de sombra e a técnica *moiré* de projeção. 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, além dos equipamentos citados acima, ainda é necessário o uso de 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, interage com a grade de projeção formando o fenômeno. O método de *moiré* de sombra utiliza apenas uma grade com retículo de referencia, perpendicular à máquina fotográfica e oblíqua à fonte de luz. Hertz et al., (2005) atenta para o

fato de produzir uma imagem definida, necessitando o uso de um ambiente escuro, com o objetivo de diminuir qualquer reflexo do meio. Coelho e Tavares (2003) completam dizendo 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 exatidão 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°, e as projetam 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 22 e 23 mostram as grades usadas em testes *moiré* de *phase-shifting* por retículo e por grades sinusoidais.

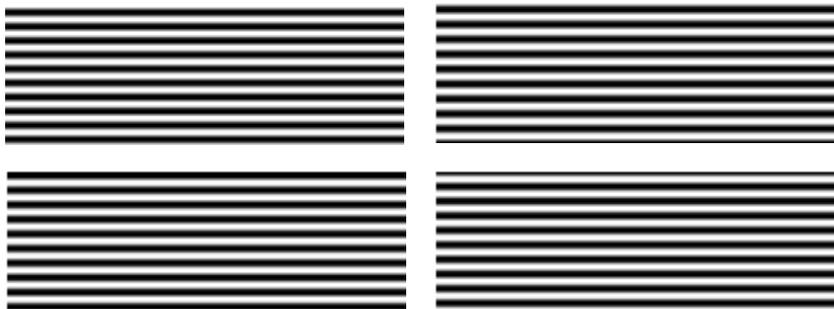


Figura 22 Grades do *phase-shifting* por retículos, deslocadas de 90° entre si. Lino, 2008

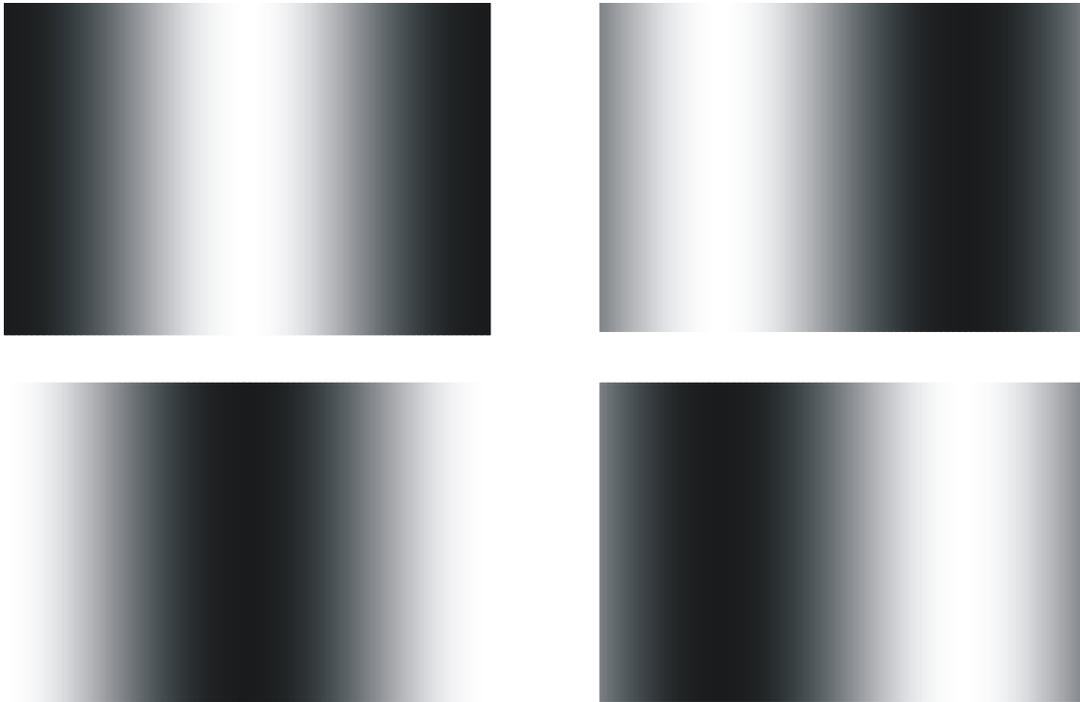


Figura 23. Grades do *phase-shifting* sinusoidal, deslocadas de 90° entre si. Fonte: Gazzola et al., 2008b.

Lino (2008) explica que a técnica de *phase-shifting* do retículo 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. Gazzola et al. (2008a) explicam que a técnica de *phase-shifting* por 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), claras (branca) e seus intermediários.

Costa (2006) analisou a deformação em madeiras através da técnica de *moiré* por projeção. Os resultados mostraram que a técnica de *moiré* tem viabilidade, permitindo o cálculo de profundidade de deformação. Os resultados não foram tão satisfatórios, devido a superfície da madeira apresentar problemas de homogeneidade e lisura. Ao final do estudo, Costa (2006) recomenda o estudo da aplicação e teste da técnica de *moiré* de sombra para

realizar análises de deformação sobre um corpo, uma vez que as deformações são muito pequenas e a defasagem das franjas provocadas por esta técnica não será fator limitante.

3.9.3 Expressões obtidas pelo método de moiré

A flexibilidade das técnicas de formação de franjas bem como a diversidade de *softwares* aplicáveis para o processamento de imagem amplia o leque de expressões em forma de imagem geradas pelas técnicas de *moiré* obtidas para posterior análise. LINO (2002) enfatiza que as técnicas de *moiré* trazem muitas informações contidas entre duas franjas vizinhas. Chiang (1.979) afirma ainda que, dependendo de como e de qual tipo de padrão geométrico, as franjas de *moiré* geradas no corpo assumem diferentes significados físicos. Segundo Assundi e Yung (citado por LINO, 2.008), as técnicas de *moiré* podem fornecer informações de deformação no plano e fora do plano, contornos topográficos, inclinação, curvatura e forma dos objetos. A seguir serão apresentados alguns casos de expressões obtidas por técnicas de *moiré*. A Figura 24 mostra o modelo digital topográfico de uma pêra através de curvas de nível. Cada isóclina, indicada pelo eixo X_3 situa-se a uma determinada altura. As linhas de contorno no plano bidimensional tornam-se variáveis para cada linha de contorno, formando assim o desenho do objeto em três dimensões.

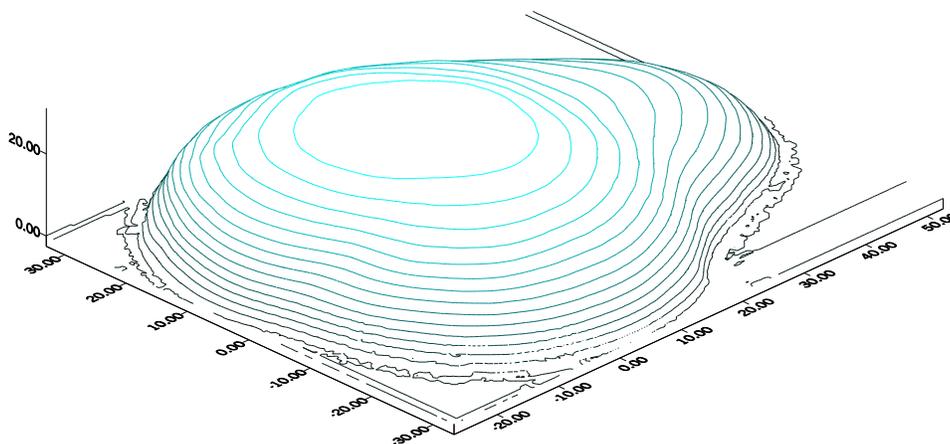


Figura 24. Modelo digital de uma pêra, gerado pela técnica do *phase-shifting moiré*. Fonte: Lino, 2008.

LINO (2.008) apresenta uma série de modelos digitais topográficos (MDT). Esses MDTs foram obtidos, segundo o autor, através da técnica de *moiréphase-shifting*. A Figura 25 mostra um tubérculo de batata (*Solanum tuberosum*) com seu MDT descrito por malhas de contorno. Nota-se que a descrição topográfica feita por malhas de contorno apresenta uma sensibilidade capaz de descrever irregularidades em sua superfície.

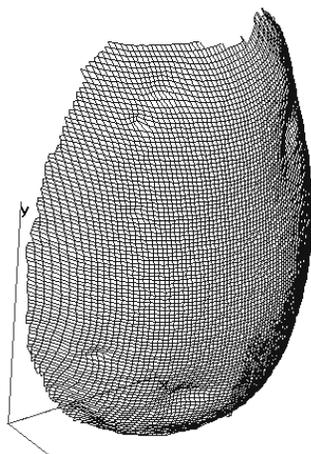


Figura 25. Representação tridimensional de um tubérculo de batata (*Solanum tuberosum*) por malhas de contorno. Fonte: Lino, 2008.

A Figura 26 mostra uma calota descrita em três dimensões. Lino (2008) mostrou que a técnica de *moiré de phase-shifting* apresenta grande sensibilidade a ponto de reconhecer uma pequena saliência na superfície da calota. A imagem final obtida como resultado relaciona as linhas isocromáticas, obtidas no processamento da imagem, com um mapa colorido composto por faixas de elevação de altura do objeto.

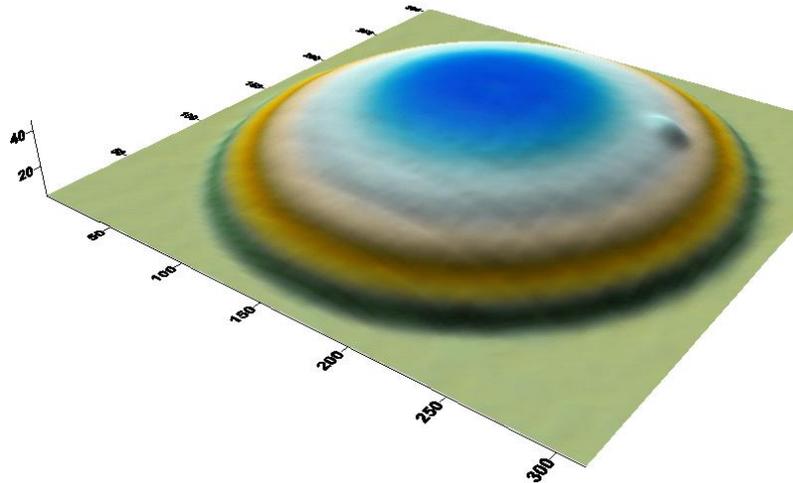


Figura 26. Representação tridimensional de uma calota por faixas de elevação. Fonte: LINO, 2008.

No campo do estudo de mecânica dos sólidos, o método de *moiré* também permite estudo de tensão e deformação de objetos. Gazzola et. al (2008a) verificaram ainda que a diferença de cotas entre o relevo de um objeto livre de força e o mesmo objeto sob a ação de uma força pode gerar mapas de deformações e associado aos conceitos da fotoelasticidade é possível qualificar e quantificar a distribuição de tensões sob toda a extensão de um corpo em um plano bidimensional. A Figura 27 mostra uma viga engastada na extremidade esquerda sujeita a uma torção. Gazzola et al. (2010b) qualificaram a imagem obtida, o qual mostra um mapa com suas linhas isocromáticas. O gradiente de cores formado na imagem permite relacionar tensões ponto a ponto ao longo da viga. Percebe-se que na extremidade da direita, onde a coloração dos pixels é mais intensa e variante entre vermelho e azul, estão concentradas as tensões provocadas pelo momento torsor. Essa variação entre vermelho e azul indica o sentido oposto das tensões ocorrentes em uma barra sujeita à torção. Na extremidade esquerda encontra uma região de coloração mais fraca, com o tom amarelo sendo mais dominante. Gazzola et al. (2010b) verificaram através da análise da escala de cores que, essa região está sujeita a uma tensão nula. Essas condições estão de acordo com o que rege as teorias de mecânica de sólidos para viga engastada.

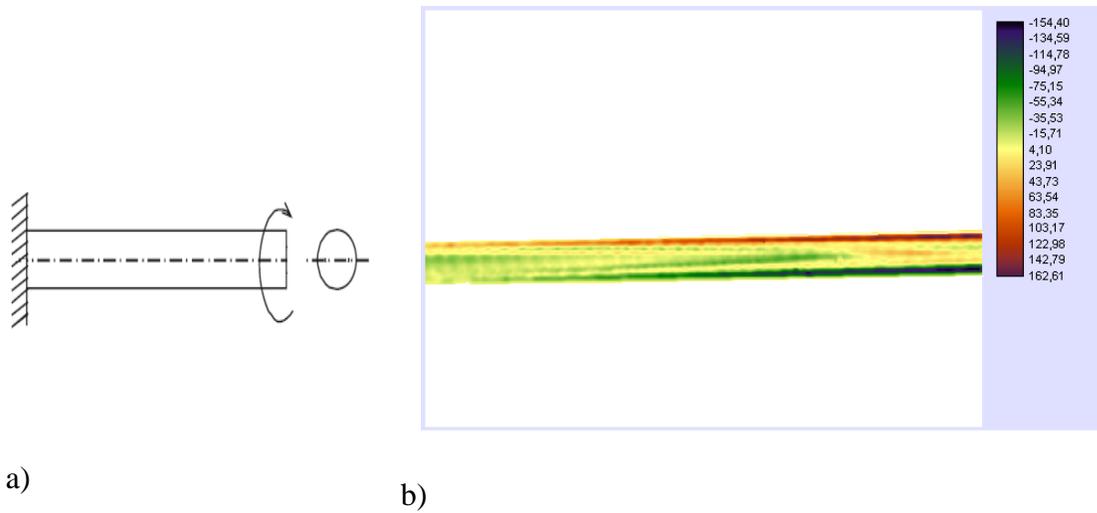


Figura 27. a) Esquema estático e b) análise de tensões em uma viga cilíndrica engastada. Fonte: Gazzola et al. 2010b.

VIEIRA (2004) aplicou a técnica de *moiré* de sombra para obter a formação dos nós delimitantes dos modos de vibração em uma viga engastada na base e aplicado uma deformação por movimento oscilatório de vibração, conforme exhibe a Figura 28. O processamento da imagem forneceu todo o mapeamento de deslocamento da viga, bem como os pontos de nós, representado por linhas isóclinas.

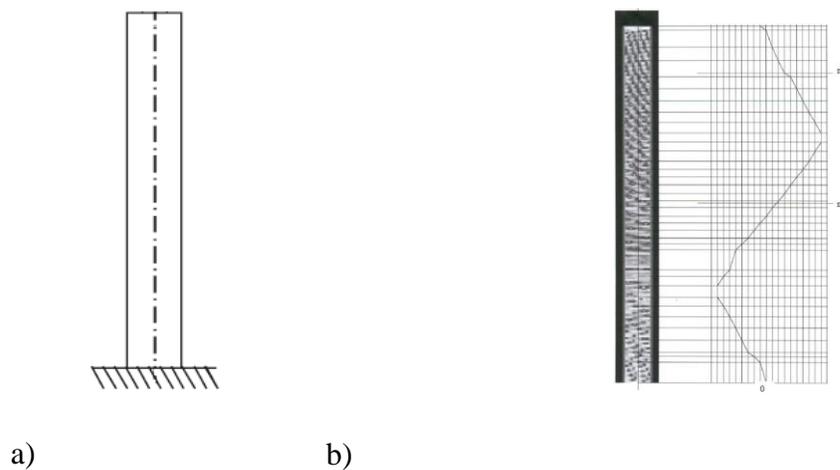


Figura 28. a) Esquema estático e b) mapa de contorno de deslocamento de uma viga e a determinação de seus nós. Fonte: Vieira, 2004.

Mazzetti Filho (2004) aplicou com grande êxito a técnica de *moiré* de sombra para obter a deformação de discos de borracha. A Figura 29 mostra o mapeamento do deslocamento do disco sujeito à uma força externa, sob rotação. A análise do mapa é dada através de uma escala de cores que relaciona a cor com uma faixa de deslocamento na cor do pixel representado na figura. Relações diretas de tensão e deformação, quando determinados o módulo de elasticidade E , podem ser configuradas na imagem através de *softwares* de processamento, como o MATLAB.

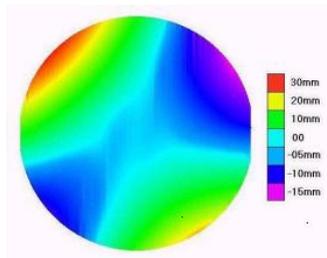


Figura 29. Mapa de deslocamento de um disco de borracha sob movimento rotativo Fonte: Mazzetti Filho, 2004.

Recentemente, Gazzola et al. (2010c) obtiveram expressões de franjas que se assemelham aos resultados obtidos pela fotoelasticidade clássica para vigas de madeira. Esse resultado aproxima TM fotoelasticidade com a TM.

Essa aproximação permite a quantificação de tensão do corpo de prova sob ação de um esforço aplicado. A Figura 30 ilustra um trabalho de pesquisa feito por Cardoso e Dal Fabbro (2010), na qual fizeram um estudo que mostra o mapa de distribuição de tensão sob uma esfera metálica comprimida em sua extremidade através da análise de linhas isóclinas e isocromáticas.

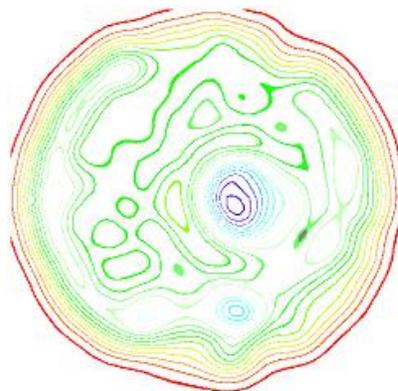


Figura 30. Distribuição de tensão sob esfera metálica. Fonte: Cardoso e Dal Fabbro, 2010.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para a realização dos ensaios experimentais, incluindo as dimensões dos feixes de madeira, os carregamentos de flexão impostos ao espécime, os elementos associados ao ensaio fotoelástico, bem como o processo de quantificação e qualificação da distribuição de deformação e tensão no MRFT.

Os ensaios foram divididos em três partes distintas: (1) a primeira parte inclui os ensaios destrutivos, (2) a segunda parte descreve os ensaios de *moiré* fotoelástico, e (3) finalmente a terceira parte aborda a simulação virtual do ensaio não destrutivo.

Os ensaios foram levados a cabo no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

4.1 Obtenção dos corpos-de-prova

A madeira da espécie *Eucalyptus saligna* foi escolhida para este trabalho de pesquisa devido à sua disponibilidade em madeiras da região de campinas. Para o desenvolvimento do estudo, dividiu-se a toras de madeira em três grupos distintos, de acordo com o diâmetro. A Tabela 5 mostra a classificação adotada neste trabalho, a qual foi baseada na variação dos diâmetros das toras selecionadas para o desdobro e obtenção das peças ensaiadas.

Tabela 5. Classificação do diâmetro da madeira.

Classificação	Tora Pequena (G1)	Tora Média (G2)	Tora Grande (G3)
Diâmetro (d) (cm)	$d < 40$	$40 < d < 60$	$d > 60$

Os corpos de prova foram obtidos na madeireira Flaiban, localizado na cidade de Itatiba, SP. Foram selecionadas as toras de árvores recentemente abatidas estando, portanto, as peças com elevado teor de umidade em condição de madeira saturada, ou seja, com teor de umidade próximo a do momento da colheita no campo. A Figura 31 mostra as madeiras dispostas no pátio da madeireira, sendo que, as toras do lote selecionadas para a obtenção dos corpos de prova. Com critérios de diâmetro, menor presença de nós e linearidade, foram separadas oito toras de madeira desse lote, sendo três dessas pertencentes ao grupo G1, três do

grupo G2 e outras duas do grupo G3. A Figura 32 mostra, no momento do desdobro, as madeiras selecionadas para a obtenção dos corpos de prova. Os corpos de prova foram retirados sempre da parte mais externa da seção transversal do fuste, isto é, do primeiro corte após a retirada das costaneiras excluindo-se, assim, para todos os casos, a região medular, conforme ilustra a Figura 33. A Figura 34 ilustra o organograma para a extração dos corpos de prova das toras. Após o término do corte para obtenção dos corpos de prova, esses foram imediatamente embalados em lonas plásticas de cor preta e amarrados por uma fita adesiva a fim de evitar sua perda de umidade.



Figura 31. Pátio de armazenagem da madeireira Flaiban, Itatita, SP.



Figura 32. Toras de madeira selecionadas para corte e obtenção dos corpos de prova.



Figura 33. Região de corte da tora para obtenção dos corpos de prova.



Figura 34. Organograma de obtenção dos corpos de prova na madeira.

Das oito toras, selecionadas do pátio, foram retiradas um total de 160 unidades da madeira com área de seção de 6 x 8 e comprimento de 130 mm. Esta quantidade de vigas foram suficientemente necessárias para atender a demanda de confecção dos corpos de prova para ensaio destrutivo de caracterização, bem como confecção dos elementos para a realização dos ensaios fotoelásticos. Posteriormente esses espécimes de madeira foram processados em marcenaria para as respectivas dimensões finais de corpo de prova.

4.2 Ensaio Destrutivos

Os ensaios destrutivos tiveram por finalidade caracterização do lote de madeira empregada nos testes, cujas propriedades mecânicas determinaram os parâmetros de esforços aplicados nos ensaios fotoelásticos, bem como prover dados aplicados à simulação computacional.

Os ensaios destrutivos foram conduzidos de acordo com as prescrições do anexo B da NBR 7190:1997 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Essa etapa do trabalho incluiu os testes de flexão, compressão paralela às fibras, determinação de densidade básica e umidade dos corpos de prova. Foram levadas a cabo, no mínimo, seis repetições para cada grupo de madeira, conforme procedimento para caracterização simplificada.

Os testes destrutivos de compressão e flexão foram realizados no laboratório de ensaio de estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola, em máquina universal EMIC DL-30000 com capacidade máxima de carregamento de 300 kN.

Os corpos de prova para os ensaios de compressão paralela às fibras foram preparados com as dimensões de área de seção de $5 \times 5 \text{ cm}^2$ e comprimento de 15 cm. Na lateral do corpo de prova foi acoplado extensômetros responsáveis por medir o deslocamento provocado na madeira pelo esforço aplicado. Um carregamento com velocidade constante de $4,3 \times 10^{-5} \text{ mm.s}^{-1}$ foi aplicado na área de seção superior do corpo de prova até a ruptura. Os dados de força obtidos pela célula de carga e a deformação obtida pelo extensômetro foram registrados em computador, gerando uma tabela contendo dados de força (N), tempo (s) e deformação (mm) através do *software* Tesc, o qual fazia a interface entre os dados sensoriais da prensa e o computador. A Figura 35 ilustra o arranjo experimental para o ensaio de compressão.

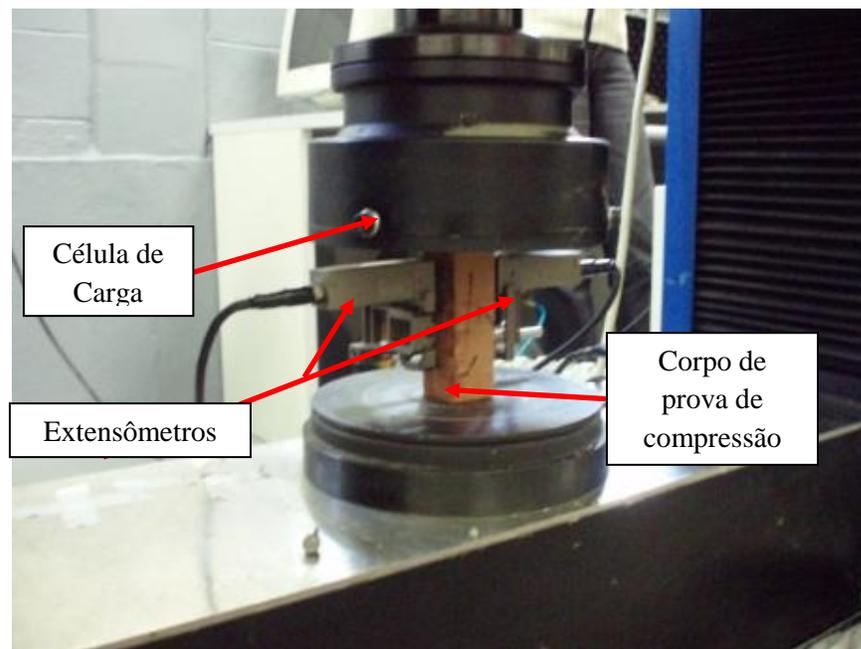


Figura 35. Arranjo experimental para o ensaio de compressão.

Os dados de força aplicada (F) x deslocamentos registrados no computador foram salvos em arquivos TXT e posteriormente convertidos para serem trabalhados em planilha Excel. Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal foi necessário a conversão

dos dados obtidos na prensa para dados de tensão (σ_{11}) e deformação específica (ε_{11}). Para tanto, foram utilizadas as equações (07) e (08).

$$\sigma_{11} = \frac{F_{11}}{A} \quad (07)$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (08)$$

Onde:

σ_{11} = Tensão principal [MPa].

F_{11} = Carga aplicada [N].

A = Área de aplicação da carga [mm^2].

ε_{11} = Deformação específica.

l = Comprimento final do corpo de prova quando carregado [mm].

l_0 = Comprimento final do corpo de prova não carregado [mm].

Com os valores de tensão e deformação específica foram geradas curvas $\sigma \times \varepsilon$ para cada corpo de prova. Os pontos amostrais para a formação da curva característica ficaram situados entre a tensão inicial, ocorrida no momento do toque da célula de carga no corpo até a tensão máxima ocorrida no momento da ruptura (σ_{ruptura}). A tensão de ruptura foi calculada no instante em que a força aplicada ($F_{\text{máxima}}$) no corpo, registrado pela célula de carga, decresceu em relação à força aplicada no instante anterior. O cálculo da rigidez da madeira foi determinado através do módulo de elasticidade de compressão às fibras para o ensaio de compressão. Os valores necessários para o cálculo do módulo de elasticidade foram obtidos diretamente na planilha de cálculos de tensão e deformação específica. As tensões de $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$ foram determinadas como 50% e 10% do módulo de tensão de ruptura (Equação 09).

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (09)$$

Onde:

E_{c0} = Módulo de elasticidade linear de compressão paralela [MPa].

A deformação específica de $\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ em cada ensaio, foi obtido diretamente na tabela de cálculos de tensão x deformação específica de acordo com as tensões $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$, respectivamente.

O ensaio de compressão também determinou a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), dado pela equação (10).

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (10)$$

Onde:

f_{c0} = Tensão de resistência à compressão paralela às fibras [MPa].

$F_{c0,Max}$ = Tensão de resistência à compressão paralela às fibras máxima [MPa].

Para os ensaios de flexão, os corpos de prova apresentaram dimensões de 5 cm x 5 cm x 115 cm. Sendo o vão livre de 105 cm, conforme estabelecido pela NBR 7190:1997. Um carregamento com taxa de deformação constante de $9,4 \times 10^{-2}$ mm/s foi aplicado na face superior do meio do vão da viga. No mesmo ponto de aplicação da carga, porém na face inferior da viga, foi acoplado um deflectômetro para medir a flecha correspondente. Os dados obtidos pela célula de carga e pelo extensômetro foram registrados no computador em uma tabela de dados de força (N), tempo (s) e deslocamento (mm) gerado instantaneamente pelo *software* Tesc. A Figura 36 ilustra o arranjo experimental para o ensaio de flexão realizado em laboratório.

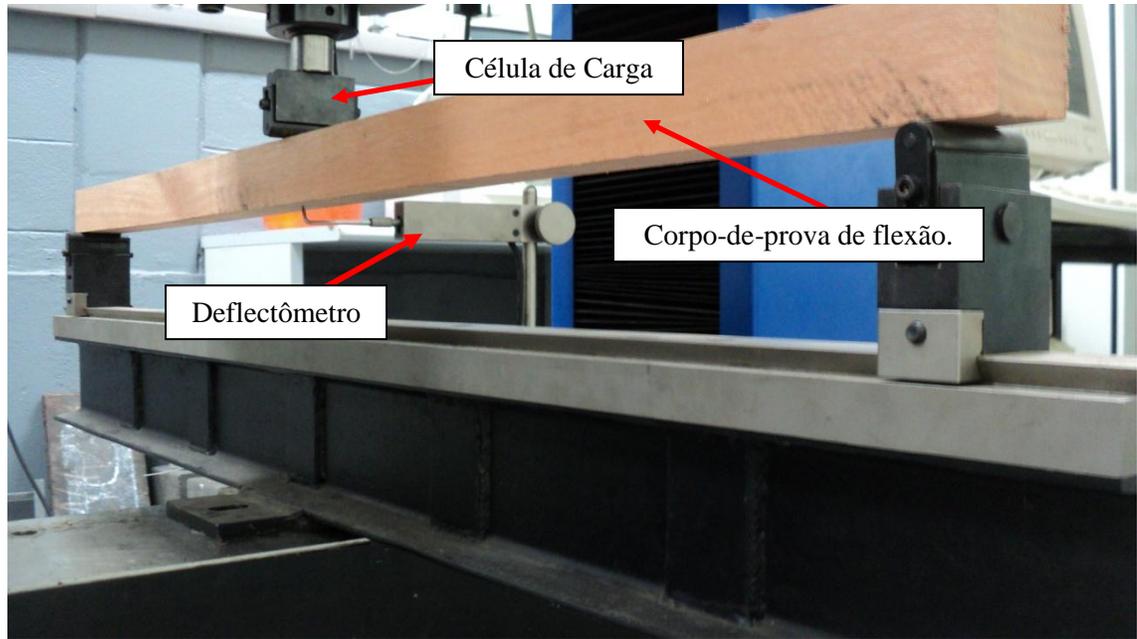


Figura 36. Arranjo experimental para o ensaio de flexão.

O cálculo do módulo de elasticidade linear (E_{m0}) para o ensaio de flexão foi determinado pela equação (11). Os valores necessários para o cálculo do módulo de elasticidade foram obtidos através da planilha de dados gerados pelo *software* TESC e pelos dados da área de seção do corpo de prova, obtidos por paquímetro.

$$E_{m0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%})L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})4bh^3} \quad (11)$$

Onde:

E_{m0} = Módulo de elasticidade linear à flexão [MPa].

L = Vão útil do corpo de prova para flexão [mm].

b = Base do corpo de prova [mm].

h = Altura do corpo de prova [mm].

As cargas $F_{M,50\%}$ e $F_{M,10\%}$ foram determinadas como 50% e 10% do módulo de força aplicada no momento da ruptura. Os deslocamentos no meio do vão $v_{50\%}$ e $v_{10\%}$ foram obtidos diretamente na tabela de dados, de acordo com a tensão $F_{M,50\%}$ e $F_{M,10\%}$, respectivamente. O ensaio de flexão determinou também a resistência da madeira à flexão (f_M), dado pela equação

(12). O momento máximo e o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova são calculados através da equação (13) e (14) respectivamente.

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} \quad (12)$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{FL}{4} \quad (13)$$

$$W_e = \frac{bh^2}{6} \quad (14)$$

Onde:

f_M = Resistência da madeira à flexão [MPa].

$M_{m\acute{a}x}$ = Momento fletor máximo [N.mm].

W_e = Módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova [mm³].

Como parte da caracterização da madeira do lote da madeira determinou-se seu teor de umidade para cada um dos grupos, levado a cabo no Laboratório de Tecnologia Pós Colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP/SP, seguindo os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7190:1997. O corpo de prova, de acordo com a norma, foi configurado como um retângulo prismático com dimensão próximas de 2 cm x 3 cm x 5 cm e tolerância de $\pm 0,1$ cm. Foram retirados 6 corpos de prova para cada grupo de madeira, totalizando 18 repetições. Inicialmente o corpo de prova foi pesado em uma balança de quatro casas decimais determinando assim a massa inicial (m_i). Em seguida, o espécime foi colocado em uma câmara de secagem com temperatura máxima de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. O corpo de prova foi pesado a cada 6 horas, até que a variação entre duas medidas consecutivas fosse menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Essa massa foi então considerada como massa seca (m_s). Determinou-se então a umidade à base seca através da equação (15). Também foi determinada a densidade básica do material através da equação (16).

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (15)$$

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (16)$$

Onde:

$U_{(\%)}$ = Teor de umidade da madeira (em porcentagem).

m_i = Massa inicial do corpo de prova [g].

m_s = Massa seca do corpo de prova [g].

ρ_{bas} = Densidade básica [kg/m^3].

V_{sat} = Volume saturado [m^3].

O valor de cada parâmetro analisado para cada grupo de madeira foi obtido pelo cálculo da média. Dos ensaios destrutivos foram obtidos valores médios de módulo de elasticidade à compressão e flexão (E_{c0} e E_{m0}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência da madeira à flexão (f_M), umidade ($U_{(\%)}$) e densidade (ρ_{bas}). A média desses valores permitiu a determinação de parâmetros para os ensaios fotoelásticos, bem como algumas constantes associadas à simulação computacional.

4.3 Ensaio Fotoelástico

A técnica *moiré* de sombra foi selecionada dentre as outras anteriormente mencionadas, dado os fatores associados à simplicidade, custo, rapidez e confiabilidade, dentre outros. Essa técnica consiste basicamente em se projetar uma grade sobre a superfície do corpo em estudo sob deformação por meio de uma fonte de luz e concomitantemente fazer a captação de imagens por uma câmera digital para posterior processamento.

O arranjo experimental selecionado incluiu uma câmera digital Samsung 6.4 Mega Pixels com controle remoto para evitar qualquer tipo de movimentação. Também foi utilizada grade Ronchi de período 0,4 mm e dimensões de 10 cm x 60 cm, confeccionada por fotolito em *bureau* de impressão especializado. A grade Ronchi foi posicionada na vertical e presa num suporte metálico para evitar qualquer movimentação no decorrer do experimento e colocada à frente do corpo cobrindo toda a área do MRFT. Um projetor de multimídia marca

Epson foi acoplado a um PC, atuando como fonte de luz branca, através de uma tela branca gerada pelo *software* PowerPoint.

A face do MRFT utilizada para projeção da grade foi pintada com tinta *spray* branco fosco, a fim de melhorar o contraste das franjas formadas sobre o corpo e evitar o reflexo da luz sobre a câmera. O ambiente, onde foi levado a cabo o ensaio, foi escurecido, evitando a penetração de luz no recinto. Durante a realização dos experimentos, as luzes da sala estiveram apagadas, atuando apenas a luz proveniente do projetor. O corpo de prova foi então posicionado na prensa hidráulica atrás do retículo e fotografado durante o ensaio de carregamento. A Figura 37 ilustra o posicionamento dos equipamentos.

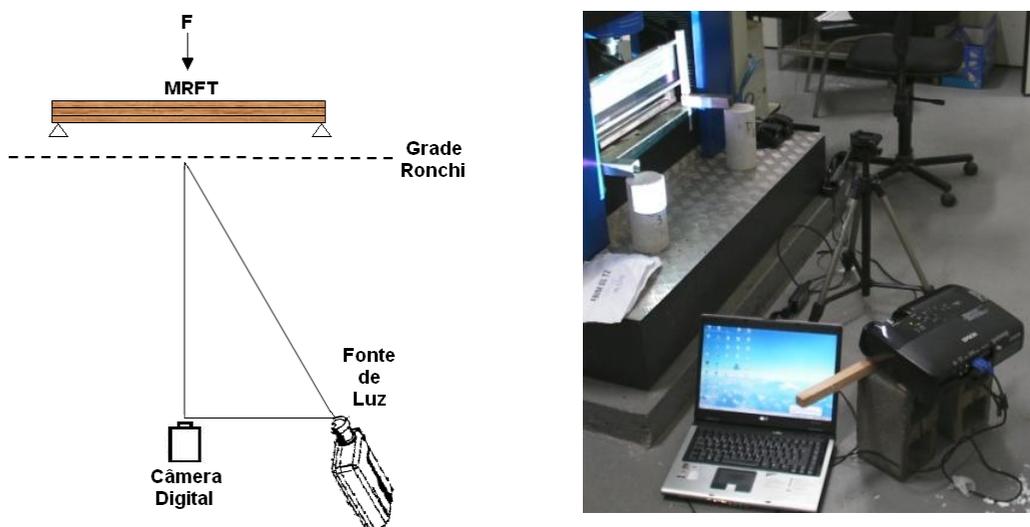


Figura 37. Arranjo experimental para realização do ensaio de *moiré* de sombra.

Para que o MRFT coubesse no vão da prensa e em frente à câmera digital, as dimensões do corpo de prova foram alteradas em relação ao que é estabelecido pela norma NBR 7190/97, porém sem alterar sua funcionabilidade.

A prensa EMIC possui um vão livre de 65 cm, a partir do qual o comprimento do corpo de prova foi alterado. Para esse ensaio, os corpos de prova foram preparados com um comprimento máximo de 59 cm. Os vínculos (pontos de apoio) que serviram de apoio para o MRFT foram fixados a uma distância de 55 cm entre si e 2 cm além do ponto de apoio em cada lateral. Portanto, o comprimento útil do MRFT adotado (L_{reduzido}) para os testes e

determinação de sua altura foi de 55 cm e o comprimento total, 59 cm. Para manter esse vão fixo, o apoio foi preso por meio de uma viga metálica servindo de base, com 60 cm de comprimento. A área de seção da viga metálica foi confeccionada de forma a fixar os apoios e não permitir qualquer tipo de movimentação. A Figura 38 mostra os equipamentos para apoio do MRFT. A norma NBR 7190/97 estabelece que, para ensaios de flexão, o comprimento (L_{reduzido}) do corpo de prova deve ser no mínimo 21 vezes maior que a altura da seção transversal. Com o comprimento do elemento individualizado definido, a altura da seção foi calculada diretamente através da relação estabelecida pela norma. Logo, a altura (h') e a largura (b') do corpo de prova foram fixadas em 2,5 cm, mantendo-se a relação entre dimensão da seção quadrada e o vão semelhante à da norma. O MRFT foi formado pelos elementos de dimensões modificadas, conforme explicado acima.



a)



b)

Figura 38. Equipamentos utilizados para apoio na flexão do MRFT. a) Viga metálica e distanciamento dos apoios. b) Área de seção da viga metálica para fixação dos apoios.

O ensaio fotoelástico determinou as tensões em um plano bi-dimensional, ou seja, utilizando apenas uma face do MRFT. Os feixes foram formados por seis elementos dispostos de acordo com a Figura 39.

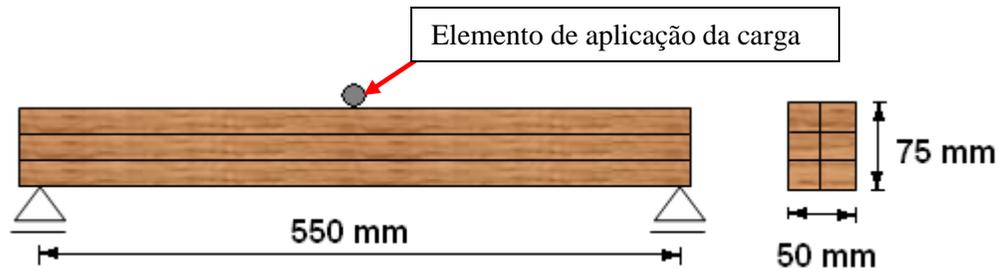


Figura 39. Vista frontal e lateral do arranjo experimental do feixe de madeiras para ensaio de flexão.

Para simular a condição de transporte de toras, aplicou-se carga gerada por um cilindro de 1,5 cm de diâmetro e 9 cm de comprimento. Esta configuração caracteriza carga de contato. Note-se que os seis elementos dispostos verticalmente formam duas colunas de três elementos cada, as quais exerceram força de atrito entre si. Os elementos medianos sofreram carregamento transmitido pelo elemento superior devido à ação de contato entre ambas. O elemento mediano, que transmite um carregamento para o elemento inferior, também sofreu um segundo carregamento devido à reação de contato com o elemento inferior, simulando assim o comportamento mecânico das toras que estão em contato duplo entre as outras. E, conseqüentemente, o elemento inferior, o qual sofreu carregamento através do contato com o elemento mediano, simulou então o carregamento sofrido pelas toras inferiores durante o transporte. O carregamento, o qual foi aplicado no MRFT durante o ensaio fotoelástico, foi determinado através dos dados de ensaio destrutivo de flexão para cada grupo de madeira. O carregamento de ruptura calculado para o elemento individualizado foi determinado utilizando-se as equações (17), (18) e (19).

$$W_{e,reduzido} = \frac{b' \cdot h'^2}{6} \quad (17)$$

$$M_{máx,teste} = W_{e,reduzido} \cdot f_M \quad (18)$$

$$F_{11(rr)} = \frac{4.M_{\text{máx, teste}}}{L_{\text{reduzido}}} \quad (19)$$

Onde:

$W_{e,\text{reduzido}}$ = Módulo de resistência elástica da seção transversal reduzida do elemento [mm³].

b' = Base do elemento reduzido [mm].

h' = Altura do elemento reduzido [mm].

$M_{\text{máx, teste}}$ = Momento máximo para o elemento reduzido [N.mm].

$F_{11(rr)}$ = Força de ruptura para o elemento reduzido [N].

L_{reduzido} = Comprimento para o elemento reduzido [mm].

O carregamento determinado pela equação (19) corresponde a um carregamento necessário para ocorrer a ruptura para o elemento individualizado. O carregamento a ser aplicado poderia ser calculado com base em uma área da seção do MRFT atuando como uma peça única. Porém, testes preliminares demonstraram que não são necessários impor cargas de grande ordem para gerar as franjas, pois, além do método ser bastante sensível para carregamentos de baixo módulo, a aplicação de um carregamento elevado implica em um deslocamento exagerado por parte do corpo de prova e conseqüentemente dos pixels da imagem correspondente ao corpo de prova, em detrimento da análise das imagens.

Para o ensaio fotoelástico foram empregados os módulos intermediários de carregamento para flexão na ordem de $F_{11(10\%)}$, $F_{11(20\%)}$, $F_{11(30\%)}$, $F_{11(40\%)}$ e $F_{11(50\%)}$, cujas forças foram determinadas pela equação (20). O carregamento consistiu em uma carga concentrada aplicada no meio do vão do feixe a uma taxa de 10 MPa/min. Para cada grupo de madeiras, foram realizadas 6 repetições com MRFT e mais um ensaio com elemento individualizado a fim de determinar o coeficiente fotoelástico, totalizando 21 ensaios de carregamento envolvendo os três grupos estabelecidos.

$$F_{11(n\%)} = \frac{n}{100} \times F_{11(rr)} \quad (20)$$

A realização do ensaio fotoelástico exigiu que a prensa EMIC fosse programada para a aplicação do carregamento e obtenção de imagens. Essa programação incluiu uma pausa de cinco segundos na taxa de aplicação de carga sob o MRFT quando esta atingisse um determinado módulo de carregamento desejado para que pudesse ser obtida a imagem através da câmera digital. Esse algoritmo foi programado pela própria empresa responsável pela manutenção da prensa. Vale ressaltar que neste trabalho de pesquisa que, o intuito do ensaio fotoelástico experimento seria de se obter imagens para um carregamento pré-estabelecido. Porém, uma característica importante da máquina universal EMIC 300 kN utilizada para esse ensaio está associada ao fato de que essa não permite ajuste de condução de ensaio baseado na taxa de carregamento a partir da carga aplicada, mas sim de acordo com o deslocamento da célula de carga. Portanto, para que pudesse atingir o carregamento desejado, os cálculos foram feitos com base no possível deslocamento da célula de carga a fim de se atingir a carga pré-estabelecida. Para montar o algoritmo do ensaio fotoelástico, foi necessário estimar um deslocamento teórico para a obtenção da tensão desejada e com a taxa de carregamento determinada pela NBR 7190/97. Essas condições podem gerar uma diferença no módulo de carregamento teórico determinado por cálculo em relação ao módulo do carregamento obtido em experimento durante o ensaio fotoelástico. Mesmo existindo a possibilidade desse problema de carregamento vir a ocorrer, isso não interfere no desenvolvimento do trabalho de pesquisa, pois o intuito do uso das condições estabelecidas pela norma NBR 7190/97 não está em atingir o módulo de carregamento, mas sim em ter um parâmetro de condução de ensaio de modo a aplicar e analisar uma carga, de acordo com suas condições de contorno.

A preocupação maior do ensaio foi a de evitar diferenças de carregamento entre cada módulo intermediário do grupo específico de madeira, isto é, as cargas de $F_{10\%}$, para madeiras do grupo G1, por exemplo, não devem ser muito diferentes entre si, pois isso alteraria as condições de contorno para a análise quantitativa. Para evitar essa diferença de módulos de carregamentos misturaram-se todos os corpos de prova e montou-se os MRFT de forma aleatória com elementos advindos dentro de seu próprio grupo. Dessa forma, o MRFT pôde apresentar um módulo de elasticidade do conjunto, mais próximo possível ao módulo de elasticidade médio calculado, e a flecha entre as repetições de cada intervalo de carregamento não apresentasse variações significativas entre si.

As imagens foram geradas tal como se segue. (1) Primeiramente uma foto da grade projetada sobre o corpo de prova sem carregamento. (2) Posteriormente aplicaram-se as cinco cargas-teste correspondentes ao ensaio e obteve-se uma imagem para cada situação de carregamento. Para cada ensaio foi obtido um bloco de seis imagens para posterior tratamento. As imagens foram nomeadas de acordo com o carregamento aplicado, conforme está mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Nomenclatura adotada para as imagens obtidas durante os ensaios fotoelásticos.

Carregamento aplicado	$F_{11} (0\%)$	$F_{11} (10\%)$	$F_{11} (20\%)$	$F_{11} (30\%)$	$F_{11} (40\%)$	$F_{11} (50\%)$
Nomenclatura da imagem	$I_{0\%}(x,y)$	$I_{10\%}(x,y)$	$I_{20\%}(x,y)$	$I_{30\%}(x,y)$	$I_{40\%}(x,y)$	$I_{50\%}(x,y)$

A máquina universal EMIC foi programada para ter pausas de 5 segundos. Este tempo foi suficiente para a obtenção das imagens. Conjuntamente, os valores de deslocamento da prensa e a força aplicada foram anotadas à parte.

As imagens foram transferidas da câmera digital para o computador em arquivos de extensão BMP para que a qualidade fosse preservada, além de ser uma extensão de arquivo hábil de ser trabalhado nos *softwares* de processamento de imagens adotados neste trabalho de pesquisa.

O processamento das imagens foi dividido em duas partes. A primeira parte consistiu no processamento mútuo e igualitário de todas as imagens. Na segunda parte o conjunto de imagens foi processado de acordo com suas características, sendo assim diferenciados entre si. Cada etapa de processamento da imagem é detalhadamente descrita abaixo.

Na primeira parte, o processamento foi levado a cabo apenas por meio do *software* ImageJ. Para tal as etapas foram seguidas conforme descrito: (1) A imagem $F_{0\%}$ foi aberta pelo *software* ImageJ. (2) O comando **Record** foi aberto para gerar uma rotina, e registrando assim, todos os comandos executados no processamento da imagem não carregada ($I_{0\%}(x,y)$) para ser repetido para as outras imagens carregadas. (3) A imagem $I_{0\%}(x,y)$ foi convertida de imagem RGB (colorida) para imagem em tons de cinza (8 bits). (4) Selecionou-se a área de estudo através do comando **Polygon selections** contornando a área do corpo de prova desejado para o estudo. Essa área compreendeu a distância entre os apoios do MRFT. (4) A partir disso,

iniciou-se o processo de formação da máscara. Com a área selecionada anteriormente e através do comando **Create Mask** uma imagem vetorial secundária denominada de “Máscara” foi gerada, composta por duas áreas distintas. A primeira, apresentada pela cor negra (Módulo do vetor = 225) e correspondente à área selecionada para estudo, e uma segunda área de cor branca (módulo do vetor = 0) e correspondente aos pixels não selecionados. (5) A máscara foi então convertida em uma imagem binária contendo valores de módulo zero (0) e um (1), através do comando **Math**. Para este passo, foi requerido o uso da operação matemática **Divide**, dividindo todos os pixels da imagem por 225. A Figura 40 mostra o algoritmo usado para criar a “Máscara”.

$$\left[\begin{array}{l} I_{0\%}(x,y) \qquad \qquad \qquad Máscara \\ \text{Módulo do vetor} = 225 \rightarrow \text{Módulo do vetor } 1 \\ \text{Módulo do vetor} = 0 \quad \rightarrow \text{Módulo do vetor } 0 \end{array} \right]$$

Figura 40. Algoritmo usado para criar a máscara.

(6) A área correspondente à área de estudo foi separada do plano de fundo através do comando **Image Calculator** utilizando a equação (21). Nessa parte do processo, muitos ruídos foram removidos da imagem. A imagem obtida foi nomeada $I_{2-0\%}(x,y)$.

$$I_{2-0\%}(x,y) = I_{0\%}(x,y) \times Máscara \quad (21)$$

(7) Finalmente, a imagem $I_{2-0\%}(x,y)$ foi então filtrada aplicando-se o filtro “Gaussian Blur” com intensidade de 2.0, melhorando assim o contraste das franjas formadas sobre o corpo.

Terminado esse processo assim descrito, a rotina foi gravada em arquivo de extensão TXT e chamada de “Macro”. A imagem resultante foi gravada em arquivo de extensão BMP e nomeado como $I_{T0\%}(x,y)$.

O procedimento acima foi repetido individualmente de forma automatizada e por ordem crescente de incremento de carga para todas as imagens obtidas no ensaio fotoelástico. Inicialmente o arquivo “Macro” foi aberto pelo bloco de notas e teve seu algoritmo alterado. Essa alteração foi executada apenas para mudar o nome do arquivo correspondente à imagem a ser tratada naquele passo, isto é, como o arquivo gravou o procedimento sobre o passo

executado na imagem não carregada, foi necessária a alteração da troca de nome do arquivo da imagem carregada a ser tratada. Após essa alteração, o arquivo foi salvo, sem alterar seu nome. Através do *software* ImageJ, a imagem a ser tratada foi aberta e o algoritmo “Macro” foi colocado para rodar através do comando **Run**. O procedimento foi repetido para cada imagem dos ensaios carregados. As imagens foram gravadas em arquivo de extensão BMP e nomeado como $I_{Tn\%}(x,y)$, com **n** variando de acordo com a taxa de carregamento (10, 20, 30, 40 e 50).

Iniciou-se então a segunda etapa do processamento de imagens, responsável por gerar as linhas isóclinas e isocromáticas, objeto do estudo em questão. Nessa segunda etapa, foram empregados os *softwares* Idrisi Kilimanjaro, PaintBrush e ImageJ. Esta etapa foi realizada conforme descrito a seguir: (1) Inicialmente, o bloco de imagens foi transferido para o *software* Idrisi Kilimanjaro e através do comando **Image Calculator** e utilizando a equação (22) foi obtido um mapa de intensidade pontual de tensão, ou seja, o mapeamento isocromático. Este mapa permite analisar a intensidade relativa de tensão ponto a ponto ao longo do corpo de prova. (2) A imagem é salva em arquivo BMP e nomeado como $I_{Kn\%}(x,y)$ com **n** variando de acordo com a taxa de carregamento (10, 20, 30, 40 e 50).

$$I_{Kn\%}(x,y) = I_{Tn\%}(x,y) - I_{T0\%}(x,y) \quad (22)$$

(3) As imagens obtidas pelo *software* Idrisi Kilimanjaro foram transferidas para o programa PaintBrush, selecionando-se apenas a área contendo as linhas isocromáticas, e, posteriormente, as imagens foram salvas em arquivo BMP e nomeadas como $I_{Pn\%}(x,y)$, com **n** variando de acordo com a taxa de carregamento (10, 20, 30, 40 e 50).

(4) As imagens foram transferidas para o *software* ImageJ e através do comando **Interactive 3D Surface Plot**, foi gerado o mapeamento das isóclinas. A distribuição das isóclinas depende do ajuste de determinados parâmetros dentro do programa ImageJ. Esses parâmetros são: o **Size Grid, Smoothing, Perspective, Lighting, Scale, Z-Scale, Max e Min**. Estes parâmetros foram ajustados apenas uma vez e fixados para todas as outras repetições levadas a cabo. Esta medida foi tomada a fim de se ter uma distribuição de linhas variáveis de acordo com as condições de carregamento e pelas propriedades de cada grupo de madeira e não por diferenças de ajuste no programa ImageJ. (5) O arquivo foi salvo em extensão BMP e

nomeado como $I_{Jn\%}(x,y)$, com n variando de acordo com a taxa de carregamento (10, 20, 30, 40 e 50).

Um último processamento de imagem permitiu unir as isóclinas com o contorno do MRFT e permitir a análise da distribuição de tensão para cada elemento presente no feixe. (6) As imagens $I_{Jn\%}(x,y)$ foram abertas individualmente no PaintBrush, e seu fundo, inicialmente cinza, foi alterado para branco, selecionando-se apenas a área contendo as isóclinas. (7) O arquivo foi salvo em extensão BMP e nomeado como $I_{ISOcn\%}(x,y)$, com n variando de acordo com a taxa de carregamento (10, 20, 30, 40 e 50). (7) Uma segunda máscara foi montada utilizando-se a imagem $I_{P10\%}(x,y)$ e com uma linha de cor preta, o contorno de cada elemento frontal do MRFT foi montado. Posteriormente as linhas isocromáticas foram removidas, mantendo-se apenas as linhas divisórias. (8) O arquivo foi salvo em extensão BMP e nomeado como “Máscara2”.

(9) A união das linhas isóclinas com a “Máscara2” foi feito através do *software* ImageJ utilizando-se do comando **Image Calculator** com a operação vetorial **AND**. (10) A imagem foi então salva em arquivo BMP e nomeado como $I_{Fn\%}$ com n variando de acordo com cada carregamento analisado (10, 20, 30, 40 e 50).

4.4 Análise das imagens

Segundo Post (1994), no campo da fotoelasticidade, a interferometria de *moiré* apresenta-se viável para medida de deslocamentos no plano, exibindo alta sensibilidade, indicando campos de deslocamento na superfície do corpo. Pelo método de *moiré* fotoelástico, gera-se uma interação interferométrica entre o *specimen* deformado e o corpo não deformado. Tal tratamento dá suporte à uma construção visual do evento óptico, permitindo uma interpretação que relaciona a deformação do corpo ao padrão *moiré*.

Sciamarella (1.982) afirma que para definir o campo de tensão, as leis ópticas de interferometria de *moiré* devem estar em consonância com as leis ópticas da fotoelasticidade, ou seja, um completo paralelo entre ambos deve ser estabelecido. A lei óptica da fotoelasticidade, por exemplo, relaciona as tensões principais, enquanto que a lei óptica de *moiré* relaciona o campo de deslocamento. Gazzola et al. (2010c) afirmam que o *moiré*

interferométrico dá suporte à técnicas fotoelásticas similares, permitindo aplicações tal qual os métodos convencionais, oferecendo alta precisão e confiabilidade.

4.4.1 Análise qualitativa das imagens

A análise qualitativa das ondas foi elaborada de acordo com os fundamentos da fotoelasticidade, apresentados anteriormente. As linhas isocromáticas definiram os campos sob ação de tração e compressão, ao passo que as isóclinas indicaram a direção da tensão, e o distanciamento das ondas indicaram a distribuição das tensões ao longo da peça fletida.

4.4.2 Análise quantitativa das imagens

A expressão que determina a tensão em um corpo pelo método da fotoelasticidade é dada pela equação (23).

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = k_{\sigma} \cdot N \quad (23)$$

Onde:

k_{σ} = Coeficiente fotoelástico para tensão [MPa/linha].

N = Ordem das franjas.

A expressão acima indica que a determinação de tensão sobre um corpo pela fotoelasticidade exige a determinação da ordem das franjas (N) e do coeficiente fotoelástico (k_{σ}).

A determinação das franjas pela técnica de *moiré* se fez pelo método do “Linear Mismatch” apresentado por Chiang (1979). Esse método ordena as franjas de acordo com as condições de contorno impostas ao elemento carregado. Em geral, o ordenamento das franjas é complexo, a não ser que as franjas individuais sejam visíveis ou quando a situação de carregamento ou condições de contorno são tais que um ponto zero de deslocamento exista e possa ser identificado. Depois da determinação do sinal de uma das franjas, as que se seguem podem ser determinadas facilmente, pois só há um caminho para se determinar todo o campo

das franjas padrão. Esse método de determinação de sinal é mais convenientemente aplicado quando as franjas padrão são formadas pela diferença de imagens (CHIANG, 1979). A Figura 41.a ilustra a projeção de uma grade sobre o corpo de prova não solicitado, enquanto que a Figura 41.b ilustra a projeção de uma grade sobre o corpo tensionado, e a Figura 41.c ilustra a formação de franjas por interferometria óptica e o ordenamento das franjas feito pelo método “Linear Mismatch”.

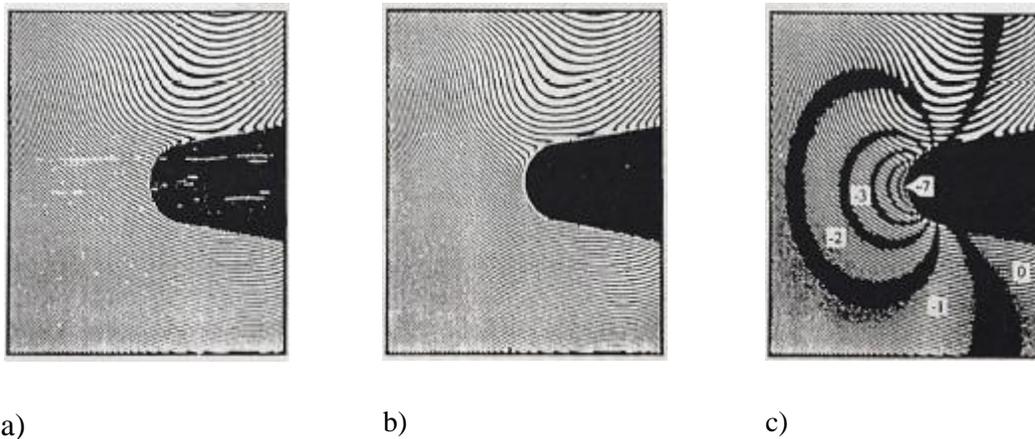


Figura 41. a) Projeção de grade sobre o corpo não tensionado. b) Projeção de grade sobre o corpo tensionado. c) Formação e ordenamento de franjas por interferometria óptica a partir das figuras anteriores. Fonte: Post (1.994)

Oliveira (1988) afirma que o coeficiente fotoelástico tem de ser determinado todas as vezes que um novo ensaio fotoelástico for realizado para que possa ser feito, de forma análoga, uma calibração do sistema fotoelástico, além de se conhecer as propriedades ópticas do material. A constante fotoelástica indica quantas franjas são formadas para cada valor unitário de carga aplicada sob o material. Almeida e Martinez (1996) explicam que a determinação da constante fotoelástica de tensão pode ser feita a partir do método de flexão pura, onde, neste ensaio σ_{22} é nulo resumindo a equação (23) na equação (24). Ou seja, o coeficiente fotoelástico é obtido através de um ensaio de flexão simples, sendo feita uma relação direta entre carregamento e quantidade de franjas formadas, para posteriormente ser aplicado a corpos de geometria de maior complexidade.

$$\sigma_{11} = N \cdot k_{\sigma} \quad (24)$$

Os módulos de tensão obtidos pelo método de *moiré* foram comparados com os módulos de tensão obtidos para uma rigidez plena (I_p) quando o MRFT apresenta cálculo baseado em uma seção de 50 x 75 mm e também para uma rigidez individual (I_0), considerando seção de 25 x 25 mm. Estas situações são consideradas para a hipótese de não haver o deslizamento entre os elementos individualizados. As equações 25 à 27 foram utilizadas para o cálculo da tensão no MRFT provocada por uma força fletora.

$$\sigma_{11} = \frac{M \cdot y}{I_{th}} \quad (25)$$

$$M = \frac{P_{11} \cdot L_{reduzido}}{4} \quad (26)$$

$$I_{th} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (27)$$

Onde:

M = Momento fletor [N.mm].

y = Altura da linha neutra [mm].

P_{11} = Carregamento fletor [N].

$L_{reduzido}$ = Vão útil do elemento reduzido [mm]

I_{th} = Momento de inércia teórico para elemento reduzido [mm⁴]

Também foram calculadas as tensões para o caso de deslizamento entre os elementos utilizando a fração da rigidez, representado por um momento de inércia efetivo (I_{ef}). As equações 28 à 30 foram utilizadas para o cálculo da tensão no MRFT provocada por uma força fletora. Para as estruturas composta, cujas partes sofrem deslizamento, conforme discutido por Soriano (2001), o momento de inércia efetivo I_{ef} é uma grandeza que deve considerar os efeitos do deslizamento para o comportamento estrutural.

$$\sigma_{11} = \frac{M.y}{I_{ef}} \quad (28)$$

$$M = \frac{P_{11}.L_{reduzido}}{4} \quad (29)$$

$$I_{ef} = \frac{P_{11}.L_{reduzido}^3}{48.v.E_{m0}} \quad (30)$$

Onde:

v = Flecha da viga [mm].

I_{ef} = Momento de inércia efetivo [mm⁴]

4.5 Simulação Computacional

Para se comparar os resultados com um padrão de comportamento de distribuição de tensão no MRFT, foi realizada uma simulação virtual, através por meio de um *software* do método de elementos finitos, denominado ABAQUS.

Com a simulação computacional, buscou-se criar modelos mais próximos possível às condições reais dos ensaios fotoelásticos. Os MRFT foram desenhados no computador de acordo com as medidas individuais de cada elemento, segundo o que foi determinado nos ensaios destrutivos, porém tendo apenas o seu comprimento determinado pelo seu vão livre.

O módulo de carregamento aplicado pela prensa no MRFT no momento da captura da imagem foi substituído por dados de entrada como sendo uma pressão. Para esse cálculo foram anotados os valores de deslocamento da célula, bem como o valor do carregamento aplicado no momento da obtenção da imagem para análise, e, com o uso do paquímetro, também foi obtida a largura da área de aplicação de carga durante a condução do ensaio fotoelástico. O cálculo da área foi feito através do produto da média da largura da área de contato pela largura do MRFT.

A área de contato da carga aplicada foi determinada experimentalmente colocando-se uma tira papel carbono e uma folha de papel em branco entre o MRFT e a célula de carregamento. Foi obtida uma área média para cada um dos grupos de madeira.

O ensaio virtual exigiu a determinação de algumas constantes, tais como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, entre outros, para caracterizar o material utilizado através da matriz de rigidez. Para essa etapa do trabalho, considerou-se a madeira como um material ortotrópico. Outra constante necessária para a realização do ensaio virtual foi a determinação do coeficiente de atrito entre as peças de madeira. O coeficiente de atrito foi determinado posicionando um elemento sobre o outro, elevando-se a extremidade da peça inferior até a eminência do movimento. O ângulo de elevação foi medido através de um transferidor. As forças atuantes no corpo são esquematizadas na Figura 42.

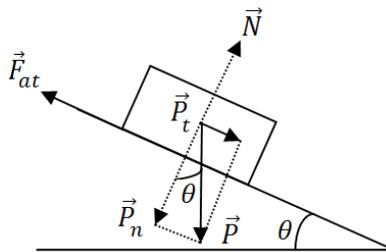


Figura 42. Força de atrito no plano inclinado.

Considerando somente as forças em módulo, têm-se as equações 31 e 32:

$$\vec{F}_{at} = \vec{P}_t = \vec{P} \cdot \text{sen}\theta \quad (31)$$

$$\vec{N} = \vec{P} \cdot \text{cos}\theta \quad (32)$$

Onde:

F_{at} = Força de atrito [N].

P_t = Peso tangencial do corpo de prova [N].

P = Peso gravitacional do corpo de prova [N].

N = Força Normal [N].

A força de atrito é definida pela equação 33.

$$\vec{F}_{at} = \mu \cdot \vec{N} \rightarrow \vec{N} = \frac{\vec{F}_{at}}{\mu} \quad (33)$$

Substituindo a equação 33 em 32, obtêm a equação 34.

$$\frac{\vec{F}_{at}}{\mu} = \vec{P} \cdot \cos\theta \rightarrow \vec{F}_{at} = \mu \cdot \vec{P} \cdot \cos\theta \quad (34)$$

Onde:

μ = Coeficiente de atrito.

θ = ângulo de elevação [°].

Igualando as equações 31 e 34, tem-se que o coeficiente de atrito pode ser determinado pela equação 35:

$$\vec{P} \cdot \sin\theta = \mu \cdot \vec{P} \cdot \cos\theta \rightarrow \mu = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \operatorname{tg}\theta \quad (35)$$

Foram realizadas 30 repetições de determinação do coeficiente de atrito para cada grupo de madeira e, então calculou-se a média, sendo adotado esse valor como o coeficiente de atrito.

Cinco simulações computacionais foram realizadas para cada grupo de madeira, correspondente às taxas de carregamento F_{11} (10%), F_{11} (20%), F_{11} (30%), F_{11} (40%) e F_{11} (50%) respectivamente, totalizando assim 15 simulações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do lote

Inicialmente são apresentadas as médias das constantes elásticas da madeira obtidas a partir dos resultados dos ensaios do corpo de prova extraído do lote de madeira utilizado na presente pesquisa, enquanto que os resultados individuais de cada repetição estão dispostos no apêndice A. As tabelas apresentadas neste capítulo mostram os valores médios calculados, os quais serviram de base para reger os ensaios fotoelásticos, bem como os ensaios virtuais. A Tabela 7 mostra os valores característicos obtidos para os grupos de madeira G1, G2 e G3. Para o cálculo do módulo de elasticidade à flexão no ensaio destrutivo, o vão (L) foi fixado em 1,05 metros. Os ensaios para determinação das propriedades mecânicas (E_{co} , E_{m0} , f_M , ρ_{bas} e $U_{(%)}$) foram realizadas conforme procedimento da NBR 7190/1997. O coeficiente de atrito μ foi obtido conforme procedimento apresentado no item 4.

Tabela 7. Valores médios de caracterização das propriedades mecânicas da madeira *Eucalyptus saligna* utilizados na pesquisa.

Grupo	E_{co} (MPa)	E_M (MPa)	f_M (MPa)	Umidade (%)	ρ_{bas} (kg/m ³)	μ
G1	28.288,6	15.673,20	69,99	67,43	556,91	0,55
G2	22.187,3	15.599,36	78,66	56,80	597,38	0,60
G3	11.046,8	9.522,77	62,42	48,11	762,26	0,76

Analisando os valores de propriedades mecânicas médias para cada grupo de madeira, percebe-se que o módulo de elasticidade decresceu à medida que o diâmetro da tora aumentou. Este comportamento não está em acordo com o esperado, pois na base da madeira é onde se encontra uma quantidade maior de células adultas e conseqüentemente a madeira deveria ser mais resistente. Outros fatores possam ter influenciado nos resultados, supondo, por exemplo, a presença de defeitos na madeira. A norma determina que, para ensaios de caracterização de um lote de madeira, os corpos de prova devem estar isentos de defeito.

Porém, a presença de nós e fibras retorcidas é uma situação real no transporte de toras e que não devem ser desprezadas. Portanto, para este trabalho de pesquisa, a suposta presença de defeitos foi incluída como forma de aproximar o estudo em questão, o mais próximo possível da situação real de trabalho. Com relação ao módulo de resistência à flexão, há uma tendência de aumento à medida que o diâmetro da madeira aumenta, isto é, onde o número de células adultas estiver mais concentrado. Isto é observado quando se compara o módulo de resistência à flexão dos grupos G1 e G2. Porém, devido à uma suposta presença de defeitos notam-se que o módulo de resistência à flexão (f_M) foi menor no grupo G3.

5.2 Ensaio de carregamento

As cargas aplicadas nos MRFTs foram calculados, baseados nos valores médios dos resultados dos ensaios destrutivos apresentados na Tabela 7. A Tabela 8 mostra os valores utilizados para calcular os esforços necessários para romper o elemento de madeira, de acordo com o grupo no qual se insere, enquanto que a tabela 9 mostra os valores calculados dos esforços intermediários a serem aplicados, os quais foram utilizados para conduzir os ensaios fotoelásticos. Os valores apresentados na Tabela 9 estão aproximados devido à precisão da máquina universal de ensaios EMIC cuja programação é baseada no deslocamento da célula de carga durante o ensaio.

Tabela 8. Parâmetros para cálculo do carregamento de ruptura e módulo de carregamento de ruptura do elemento de acordo com seu grupo.

Grupo de madeira	b' (m)	h' (m)	$W_{e, \text{reduzido}}$ (m^3)	$M_{\text{máx, teste}}$ (N.m)	L_{reduzido} (m)	$F_{\text{rup, reduzido}}$ (N)
G1	0,025	0,025	$2,6 \times 10^{-6}$	182,26	0,55	1.325,56
G2	0,025	0,025	$2,6 \times 10^{-6}$	204,84	0,55	1.489,72
G3	0,025	0,025	$2,6 \times 10^{-6}$	162,54	0,55	1.182,11

Tabela 9. Módulos de carregamento a ser aplicado na tora para o ensaio fotoelástico.

Grupo de madeira	F_{11} (10%) (N)	F_{11} (20%) (N)	F_{11} (30%) (N)	F_{11} (40%) (N)	F_{11} (50%) (N)
G1	130	260	390	520	650
G2	150	300	450	600	750
G3	120	240	360	480	600

Vale lembrar que $F_{Cn\%}$ representa o percentual de carga aplicado em relação à carga de ruptura baseado na propriedade mecânica da madeira, obtido por ensaio destrutivo. A tabela 10 mostra a média dos módulos de carregamento aplicado no MRFT durante o ensaio fotoelástico para cada grupo de madeira. As cargas aplicadas em cada teste são apresentadas nas tabelas 8.13 e 8.14 do Apêndice A. Por conveniência, os intervalos de carga aplicada pela prensa foram nomeados como $F_{Tn\%}$ (com n variando de 10 a 50). A área média de contato da célula de carga com o corpo de prova para a aplicação da carga foi de 125 mm².

Tabela 10. Média dos módulos de carregamento aplicado no MRFT para o ensaio fotoelástico.

Grupo de madeira	$F_{T0\%}$ (N)	$F_{T10\%}$ (N)	$F_{T20\%}$ (N)	$F_{T30\%}$ (N)	$F_{T40\%}$ (N)	$F_{T50\%}$ (N)
G1	10	30	80	150	310	-
G2	10	30	90	210	370	-
G3	10	30	60	150	270	-

O ensaio fotoelástico apresentou algumas particularidades, abaixo descritas. Os valores apresentados na tabela 9 representam as cargas que deveriam ter sido aplicadas no MRFT. Porém, como explicado acima, que a programação da máquina universal EMIC é baseada no deslocamento da célula de carga, isso pode ter gerado esta diferença entre a carga calculada e a carga aplicada. O módulo médio de carregamento aplicado durante o ensaio fotoelástico foi apresentado na tabela 10. Também foi apresentado na tabela 10 um módulo de carregamento extra, o $F_{T0\%}$ para cada grupo. Foi necessário aplicar esse carregamento inicial para que o MRFT pudesse ser travado e estabilizado sob os apoios da viga metálica de suporte e não ocorresse qualquer tipo de movimento frontal, com relação à grade Ronchi, evitando,

assim, distorções e movimentos relativos extras que pudessem alterar as franjas formadas sob o corpo de prova composto, além da alteração que fosse gerada pela carga de flexão. Os dados da célula de carga mostraram uma baixa diferença de carga entre os carregamentos de cada intervalo, atingindo o objetivo da aplicação de carga, que era o de gerar uma condição de contorno semelhante em todos os casos. Nos ensaios fotoelásticos foi notado um problema sobre o algoritmo da prensa com relação ao módulo de carregamento F_{11} (50%). Durante os ensaios, no momento em que a prensa aplicava o último intervalo de carregamento, automaticamente a prensa recuava a célula de carga para o ponto inicial do início dos testes, sem nenhum tempo adicional que permitisse a obtenção das imagens. Portanto, para todos os ensaios, o módulo de carregamento $F_{50\%}$ foi cancelado nos ensaios fotoelástico e simulação computacional.

5.3 Simulação Computacional

A madeira é conhecida por ser um material de natureza anisotrópica, porém, na engenharia de estruturas, consideram-na, na melhor das hipóteses, como um elemento de natureza ortotrópica.

A intenção da simulação virtual foi a de se aproximar às condições do ensaio fotoelástico. Apesar da obtenção de todas as constantes necessárias para a caracterização de um material ortotrópico, bem como os dados externos à madeira, como a carga aplicada e a área de contato, não foi possível, nos ensaios, realizar a simulação virtual dentro de todas as condições desejadas. Testes iniciais de simulação de contato entre elementos mostraram que haveria certa complexidade no processamento das imagens, mesmo considerando o material como isotrópico, por causa do tempo que o computador toma para gerar os resultados.

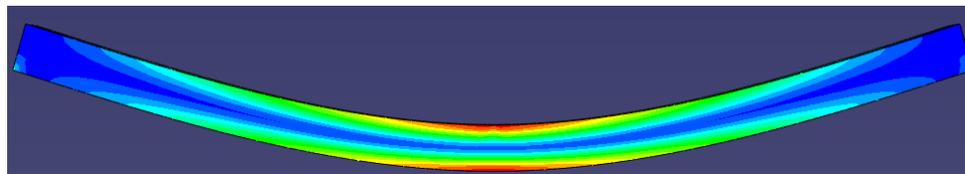
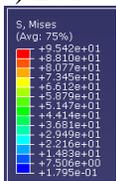
De posse dos dados das constantes elásticas, dimensões do elemento individualizado e composto e as condições de contorno do carregamento aplicado durante o ensaio fotoelástico, foi então, realizada a simulação através do *software* ABAQUS. Durante a simulação, o *software* conseguiu completar a etapa de processamento das imagens, mostrando assim que todos os dados de entrada para a simulação foram alcançados com sucesso. Porém, o *software* não conseguiu mostrar resultados conclusivos, devido à complexidade dos dados

envolvidos. Optou-se então, para obtenção de dados de comparação com o ensaio fotoelástico neste trabalho de pesquisa, considerar o material como sendo isotrópico. Nesta, são obtidas a distribuição de tensão referente ao eixo longitudinal da madeira, visto que o resultado do ensaio fotoelástico é obtido para um plano bidimensional no eixo longitudinal do MRFT. Portanto, para efeitos de comparação qualitativa na simulação computacional, não haverá problemas de considerar a madeira como um material de natureza isotrópica.

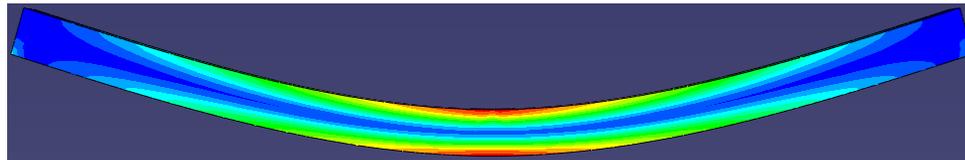
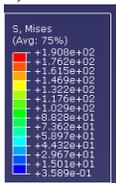
Dos dados experimentais do ensaio mecânico destrutivo, foi possível inserir no ABAQUS os dados de módulo de Young e densidade básica, bem como o coeficiente de Poisson fornecido pela literatura, área de contato da célula de carga e a pressão calculada de acordo com a média das cargas aplicadas pela máquina universal EMIC obtidos durante o ensaio fotoelástico. Os dados de coeficiente de atrito foram embutidos na modelagem computacional apenas para as simulações de elementos compostos (MRFT). Como explicado acima, para a estabilização do corpo de prova em cima dos apoios, foi necessário um pré-carregamento, tanto do MRFT como para o ensaio de elementos individuais do feixe, durante o ensaio fotoelástico.

A modelagem computacional simulou a distribuição de tensões para um nível de carga aplicada como sendo a diferença entre os módulos da pré-carga e a carga estabelecida para cada intervalo obtido no ensaio fotoelástico. Isto é absolutamente aceitável, visto que no ensaio fotoelástico de *moiré* é calculado o gradiente de deslocamento das franjas, ou seja, o movimento relativo das franjas entre o intervalo da carga estabelecido e a pré carga. As Figuras 43 à 45 apresentam os resultados de distribuição de tensão obtidos pela simulação virtual para os grupos G1, G2 e G3, respectivamente, de acordo com cada intervalo de carregamento.

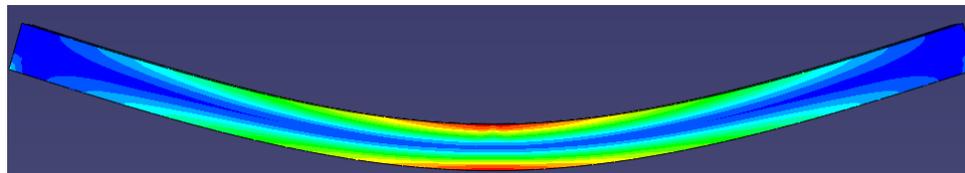
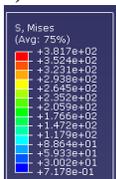
a) 20 N



b) 70 N



c) 140 N



d) 300 N

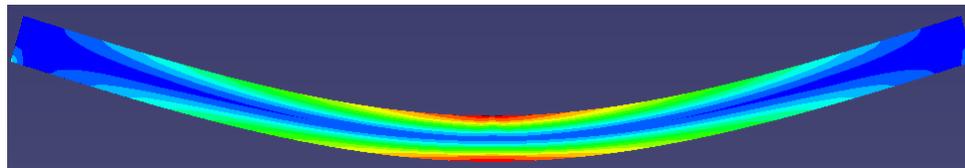
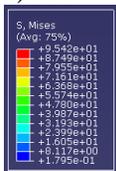
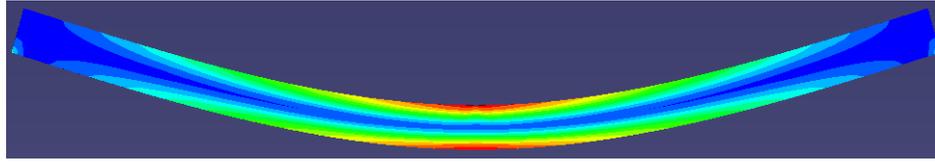
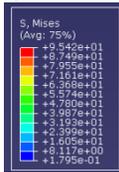
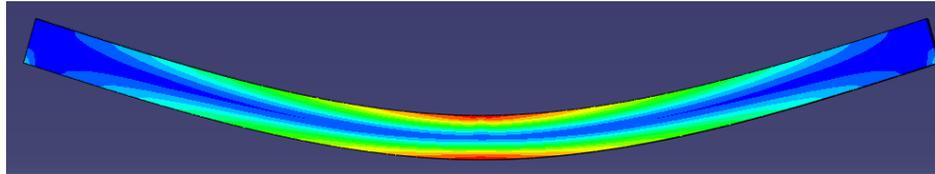
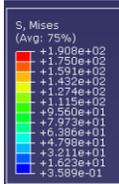


Figura 43. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em elementos do grupo G1.

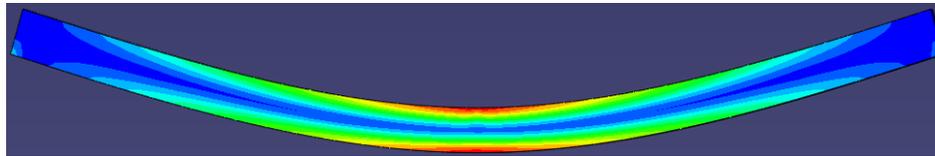
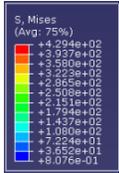
a) 20 N



b) 80 N



c) 200 N



d) 360 N

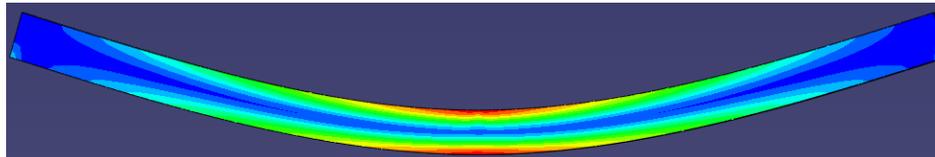
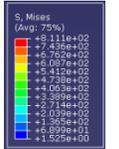


Figura 44. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em elementos do grupo G2.

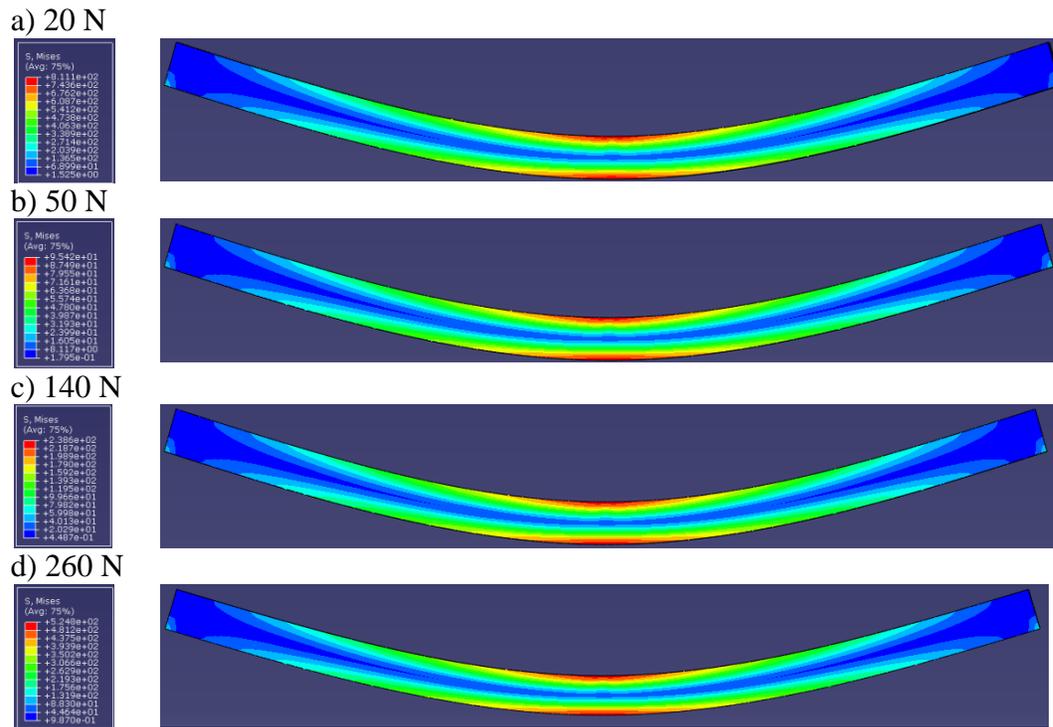


Figura 45. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em elementos do grupo G3.

Para facilitar o entendimento da escala em cores, a Figura 46 mostra uma ampliação de uma das régua obtidas pela simulação computacional.

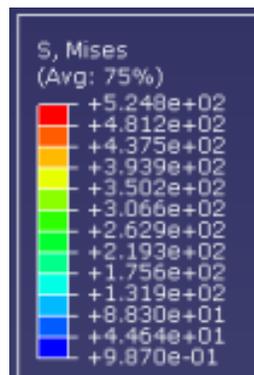


Figura 46. Graduação da régua de cores e suas variações de tensões obtidas através da simulação computacional.

Analisando qualitativamente as Figuras 43, 44 e 45, percebe-se que os resultados mostram regiões que variam da cor azulada, o qual representa regiões onde a tensão se aproxima de módulo nulo até região de cor vermelha, as quais representam regiões de maior tensão, de acordo com a análise da régua de cores. Verifica-se que, pela simulação virtual, a linha neutra se situa na região mediana longitudinal do corpo de prova individual, evidenciando uma espessura menor na região mediana, a qual a aumenta nas direções das extremidades. Na região de aplicação da carga aplicada, bem como na extremidade inferior é observada uma maior intensidade e concentração de tensão. Apesar de apresentarem as mesmas cores, devido ao carregamento aplicado, a região superior é caracterizada por tensão de compressão, enquanto que a região inferior é caracterizada por tensões de tração. A régua de cores apresenta valores positivos porque o *software* ABAQUS calcula as tensões de Von Mises, as quais não admitem tensões de natureza negativa, mas que podem ser deduzidas de acordo com as leis da mecânica dos materiais sólidos. Percebe-se que à medida que o carregamento aplicado vai aumentando, a linha azul que separa a região de tração e compressão vai se estreitando, ou seja, à medida que a tensão aumenta, há uma diminuição da região correspondente à linha neutra.

As Figuras 47 à 49 apresentam os resultados de distribuição de tensão obtidos pela simulação computacional para o MRFT dos grupos G1, G2 e G3, respectivamente, de acordo com cada nível de carga.

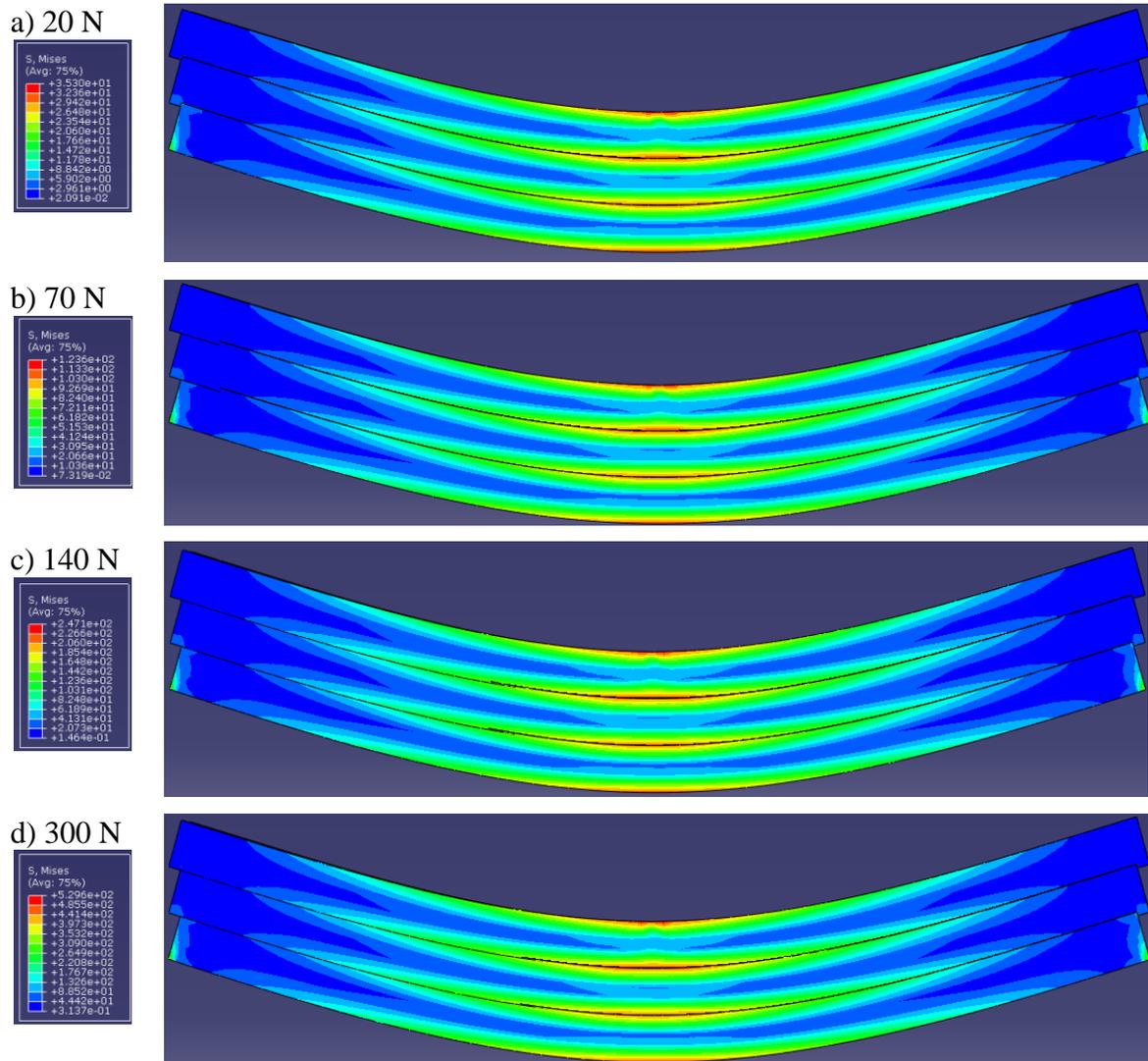
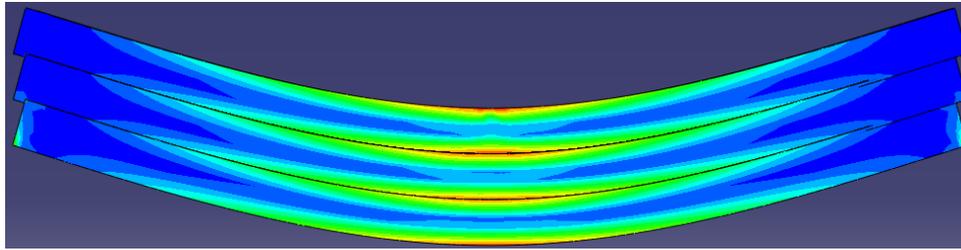
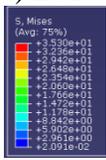
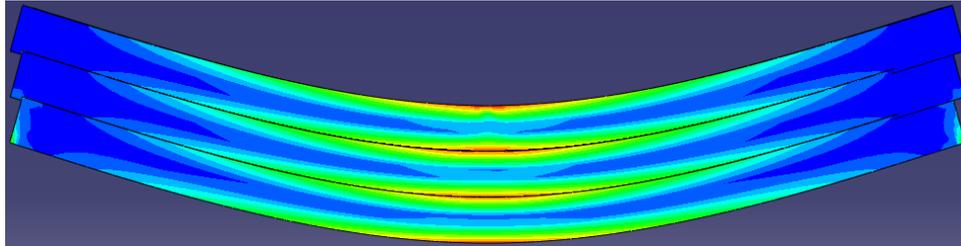
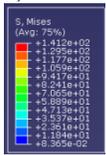


Figura 47. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em MRFT para o grupo G1.

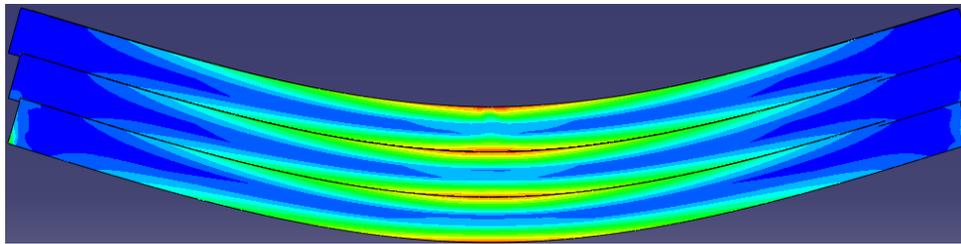
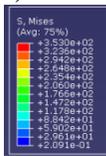
a) 20 N



b) 80 N



c) 200 N



d) 360 N

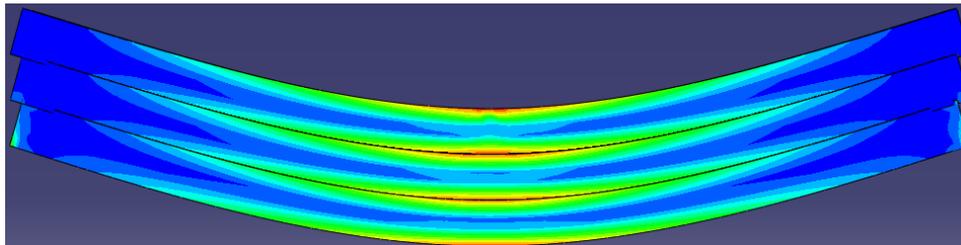
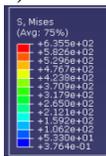


Figura 48. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em MRFT para o grupo G2.

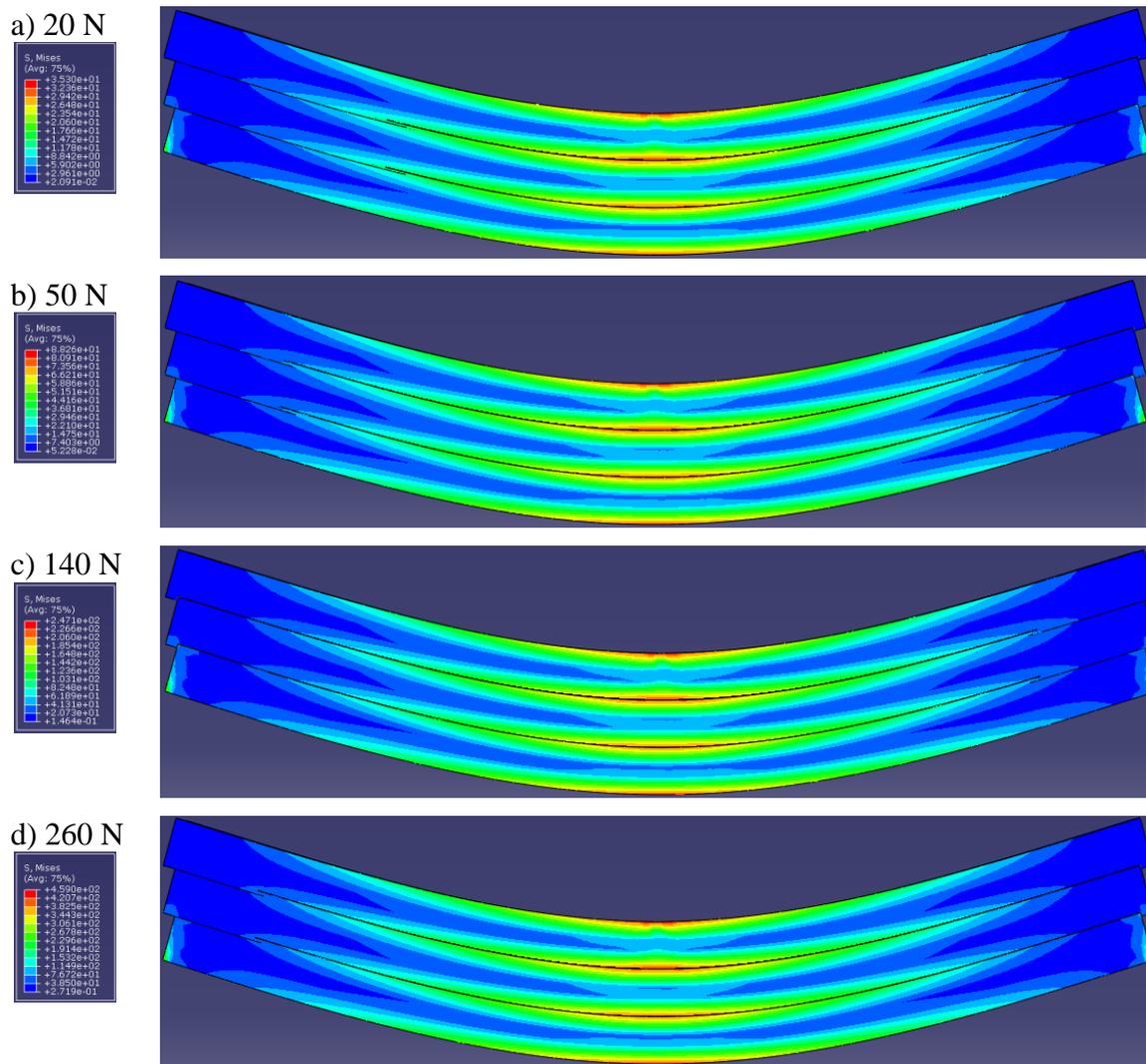


Figura 49. Resultado da distribuição de tensões obtido pela simulação computacional em MRFT para o grupo G3.

Analisando-se qualitativamente as Figuras 47 à 49 nota-se que cada elemento do MRFT responde de forma individual ao carregamento, i.e., cada elemento apresenta regiões com zonas de tração e compressão individualizadas. Também é notado que a região de baixa tensão, representada pela cor azul escuro em cada figura, não é contínua, apresentando interrupções ao longo do elemento superior e mediano na região de aplicação da carga. Porém, a região de baixa tensão, obtida na simulação computacional será chamada neste trabalho de

pesquisa de superfície neutra, o qual é a soma da linha neutra de cada área de seção. Pela análise qualitativa dos resultados da simulação computacional percebe-se que, a superfície neutra vai sendo ampliada à medida que o feixe vai distribuindo o carregamento sobre as peças inferiores conforme é mostrado na simulação por uma região de baixa tensão contínua a qual atravessa o corpo e separa as regiões de tração e compressão em zonas distintas. Percebe-se então que o elemento vai absorvendo a carga aplicada sobre o MRFT ao mesmo tempo em que transmitem para os elementos inferiores. Portanto, pode-se dizer que para o MRFT, os elementos inferiores vão atuando como uma base elástica e que os elementos superiores estão mais sujeito à tensões concentradas, enquanto que nos elementos inferiores a tensão é mais distribuída. Nas regiões dos apoios tem-se uma concentração de tensão, a qual já era esperada baseando-se na teoria da mecânica dos sólidos.

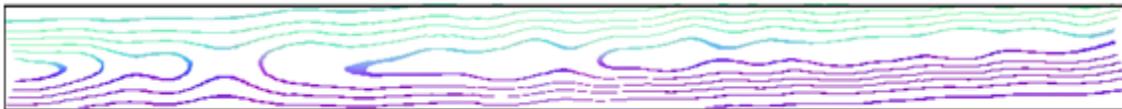
5.4 Ensaio Fotoelástico

5.4.1 Qualificação das franjas

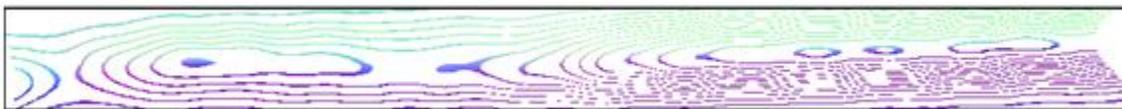
Neste capítulo são apresentados os resultados do ensaio fotoelástico para elementos simples e para o MRFT. Vale lembrar que todo o mapa de distribuição de tensão obtido para cada ensaio fotoelástico compreende o vão livre (L_{reduzido}) de 550 mm.

As Figuras 50 à 52 mostram os resultados de distribuição de tensão obtidos nos ensaios fotoelásticos para elementos simples pertencentes aos grupos de madeira G1, G2 e G3, gerados pela técnica de *moiré*. Este ensaio fotoelástico para elementos individualizados permitiu obter as constantes fotoelásticas de tração ($k_{\sigma T}$) e de compressão ($k_{\sigma C}$), bem como definir as condições para a determinação de linha neutra, região de tensão de tração e região de compressão.

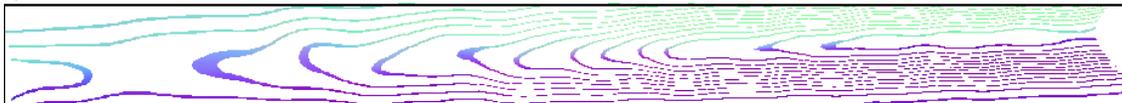
a) 20 N



b) 70 N



c) 140 N



d) 300 N

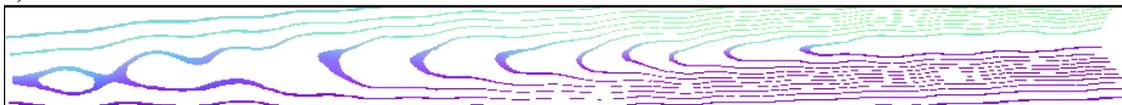
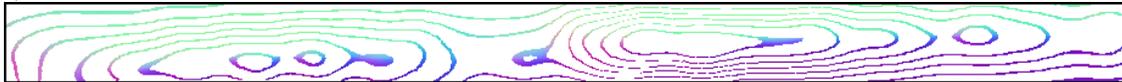
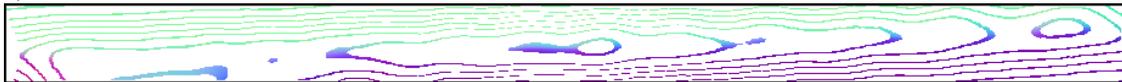


Figura 50. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para elemento individualizado do grupo G1.

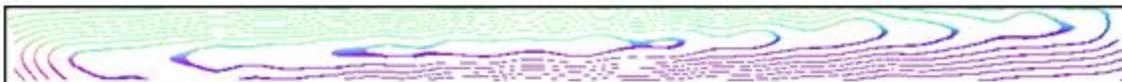
a) 20 N



b) 70 N



c) 140 N



d) 300 N

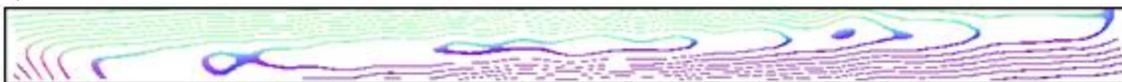


Figura 51. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para elemento individualizado do grupo G2.

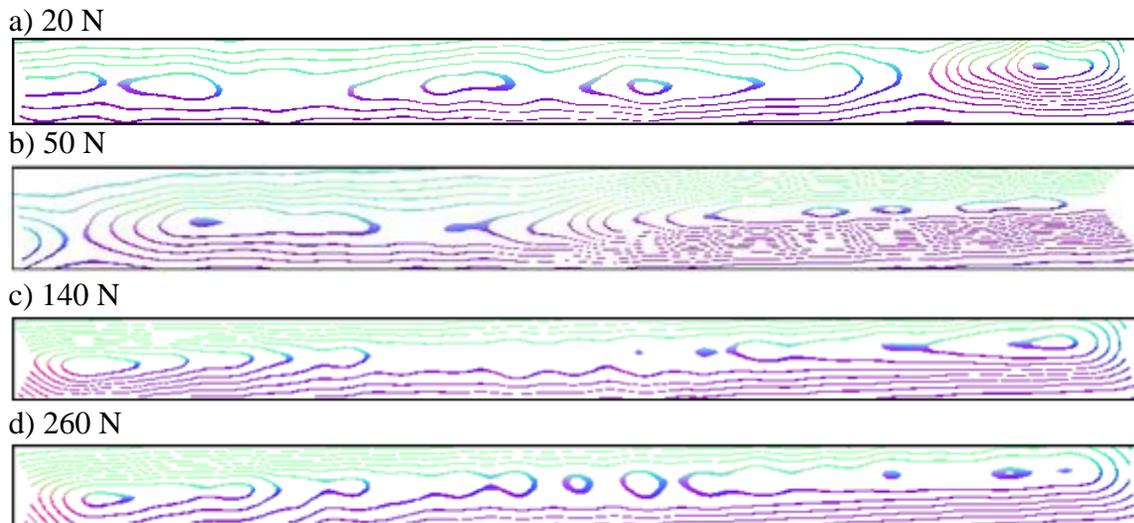
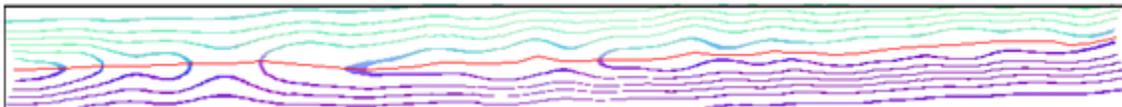


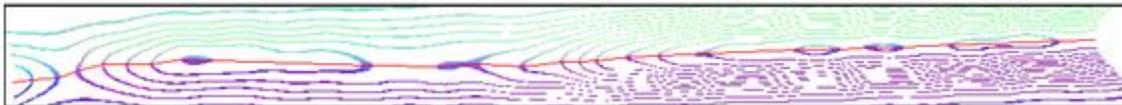
Figura 52. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para elemento individualizado do grupo G3.

Pode-se perceber qualitativamente, por meio de imagens apresentadas nas Figuras 50 à 52, que há um aumento no número de linhas à medida que o carregamento aplicado na peça é ampliado. Pelos conceitos da mecânica dos sólidos, quando um corpo é submetido a uma ação responsável pela flexão da mesma, surgirão tensões de compressão e de tração, as quais são separadas pela linha neutra. Também é estabelecido que um corpo sob ação de uma carga fletora apresenta a tensão de compressão na região onde a carga é aplicada e a tensão de tração na região oposta. Aliando-se a isso o conceito de qualificação de distribuição de tensão ao longo de um corpo, estabelecido pela fotoelasticidade, o qual diz que quanto mais próximas as linhas se apresentam, maior é a concentração de tensão e vice-versa. Portanto, pela análise da distância entre as linhas mostradas nas Figuras 50 à 52 foi possível determinar a localização da linha neutra. Outro fator qualitativo foi baseado na coloração das linhas. Linhas de cor verde representam regiões sob tensão de compressão, enquanto que as linhas de cor roxa representam as regiões sob tensão de tração. As Figuras 53 à 55 mostram os resultados de distribuição de tensão obtidos pela técnica de *moiré* em peças simples para os grupos G1, G2 e G3, respectivamente.

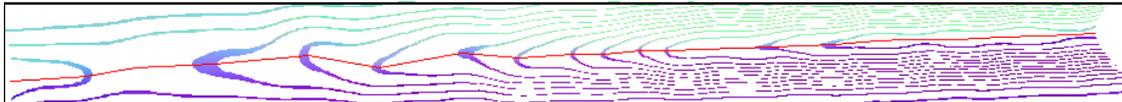
a) 20 N



b) 70 N



c) 140 N



d) 300 N

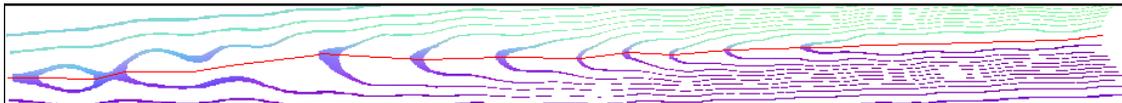
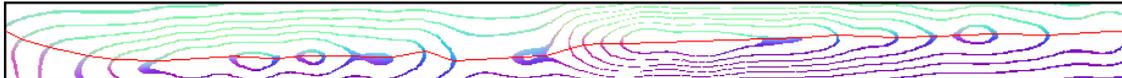
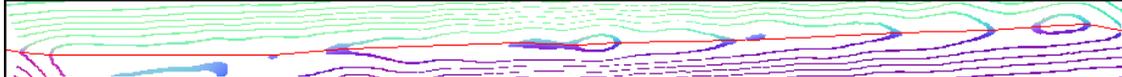


Figura 53. Determinação da superfície neutra e separação da região sob tensões de tração e compressão para o ensaio fotoelástico em elemento individualizado do grupo G1.

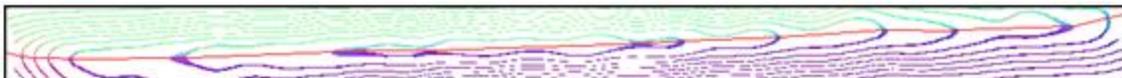
a) 20 N



b) 70 N



c) 140 N



d) 300 N

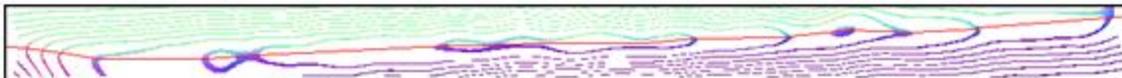


Figura 54. Determinação da superfície neutra e separação da região sob tensões de tração e compressão para o ensaio fotoelástico em elemento individualizado do grupo G2.

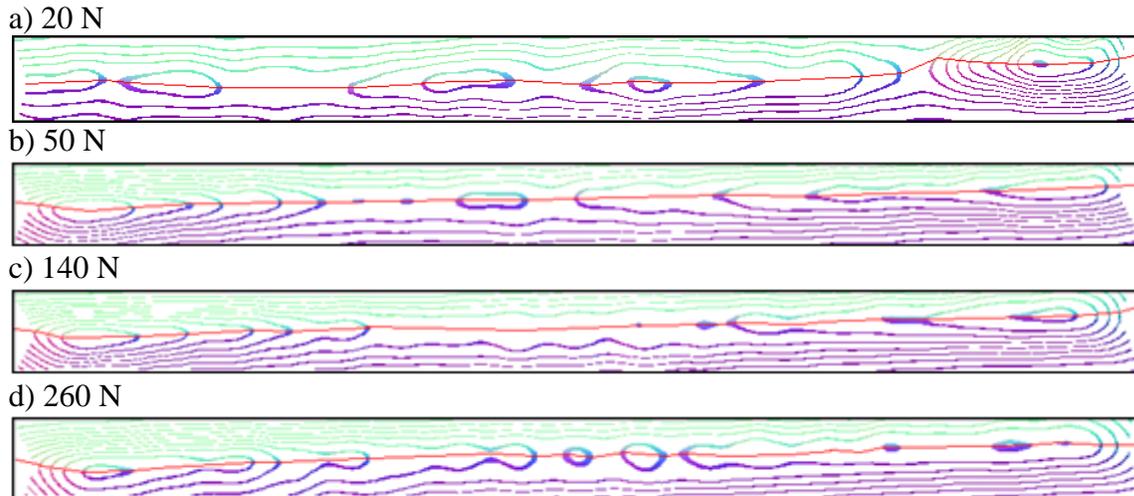


Figura 55. Determinação da superfície neutra e separação da região sob tensões de tração e compressão para o ensaio fotoelástico em elemento individualizado do grupo G3.

Analisando a distribuição de tensão no elemento individualizado é notado que a altura da linha neutra, considerando a área de seção ao longo do comprimento do elemento individualizado, apresentou certa inclinação e que, as regiões de tensão de compressão e tração se distribuem mostrando um equilíbrio não uniformizado, ou seja, as áreas correspondentes à região de tração e compressão aparentam ser numericamente próximos, porém, a altura da linha neutra foi variável ao longo do comprimento do elemento individualizado. Pode-se perceber analisando a linha neutra que, houve uma predominância da tensão de compressão na região de apoio na extremidade esquerda do elemento e o predomínio da tensão de tração na extremidade de apoio à direita da peça. Este equilíbrio não uniformizado possa ocorrer devido à anisotropia do material e também pela direção das fibras. A técnica de *moiré* de sombra permitiu a visualização da superfície neutra e o comportamento da distribuição de tensão ao longo de cada peça, embutindo nestes resultados suas particularidades que, entre elas, pode ser citado anisotropia, pontos internos de descontinuidade, além de outros, mapeados pela distribuição de tensão. Isto é uma vantagem em relação aos métodos computacionais e os métodos matemáticos, ao qual não permitiria a entrada de dados de particularidade mecânica do material analisado, além de tal fato não ser facilmente equacionado.

Com os resultados apresentados para o elemento simples, a localização da linha neutra no MRFT está baseada em dois fatores, seguindo a ordem de importância: (1) distanciamento entre as ondas, os quais determinam concentração de tensão (maior proximidade) e a linha neutra (menor proximidade); (2) cores das linhas, sendo azul para tensão de compressão e roxa para tensão de tração.

Os parâmetros de qualificação adotados para o ensaio fotoelástico de elemento foi aplicado para a qualificação do MRFT e posterior determinação da distribuição de tensão ao longo de seu corpo. As Figuras 56 à 61 mostram os resultados da distribuição de tensão em MRFT para o grupo G1.

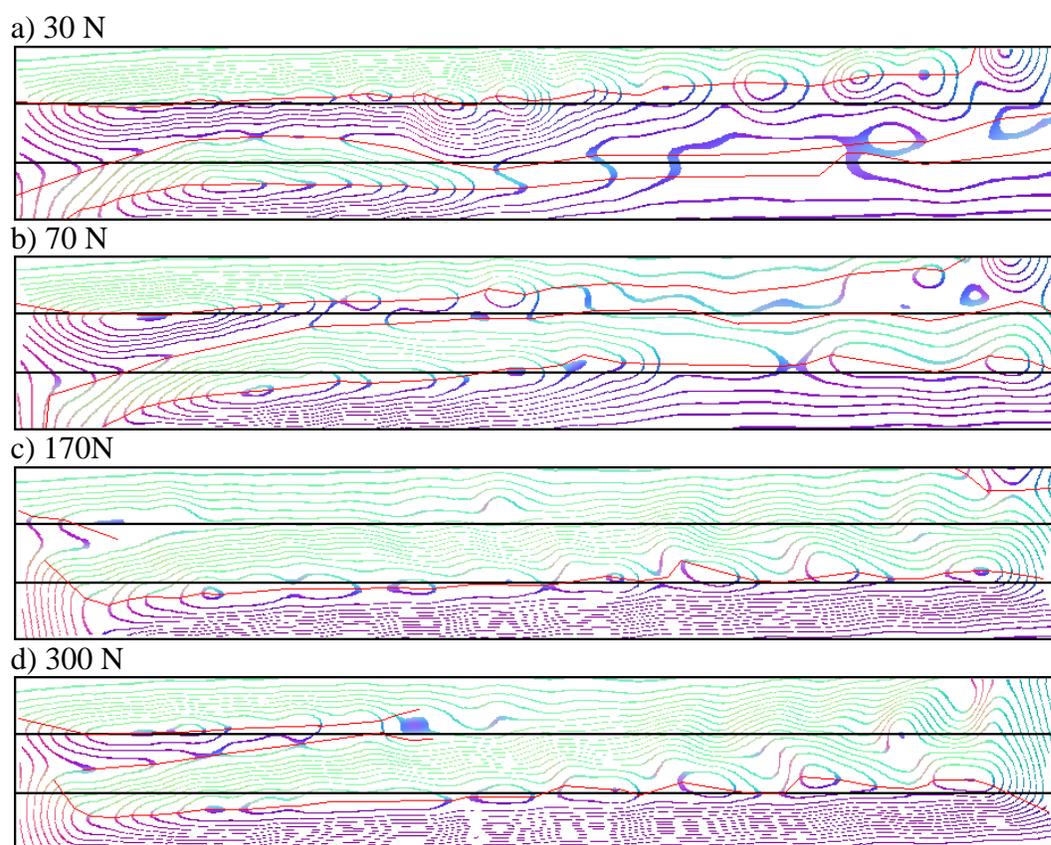
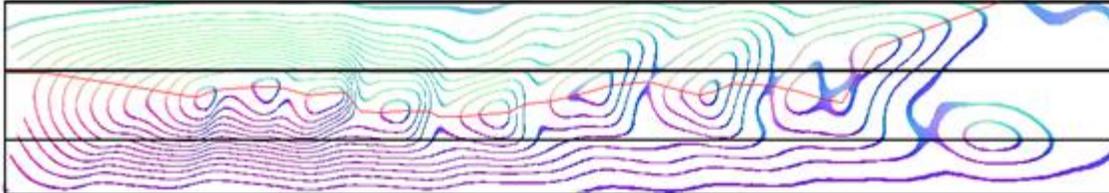


Figura 56. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 01 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

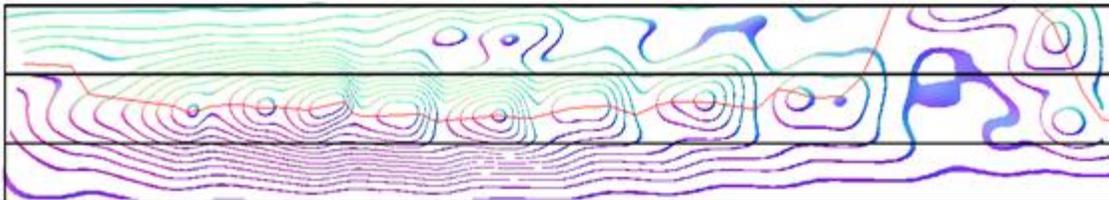
Na Figura 56 pode ser notado que, inicialmente, as peças atuam separadamente, sempre apresentando zonas de tração e de compressão, porém, a partir do nível de carga $F_{30\%}$ as peças do MRFT começam a atuar unidas, com uma região única de tração e outra de compressão. Esse comportamento deve ter sido proveniente do atrito entre as peças, pois pode

ser verificado que a distribuição de tensões entre os elementos ficou mais estável à medida que a carga foi ampliada. Quando os elementos atuaram unidos, houve a predominância de tensão de compressão no elemento superior e mediano e tensão de tração nas peças inferiores do feixe.

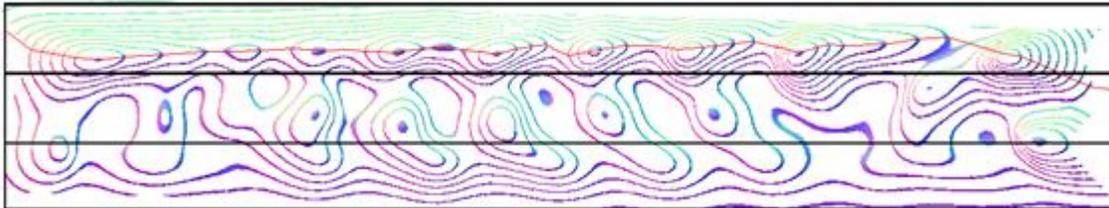
a) 20 N



b) 50 N



c) 130 N



d) 290 N

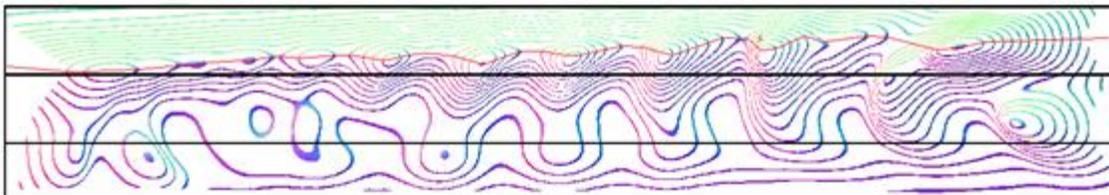


Figura 57. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 02 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

Analisando a Figura 57, foi verificado que as peças atuaram unidas durante todo o carregamento. Houve apenas a variação da linha neutra que inicialmente se localizava no elemento mediano e foi posteriormente deslocada para o elemento superior. Nesse deslocamento houve um alívio da concentração de tensão no elemento mediano.

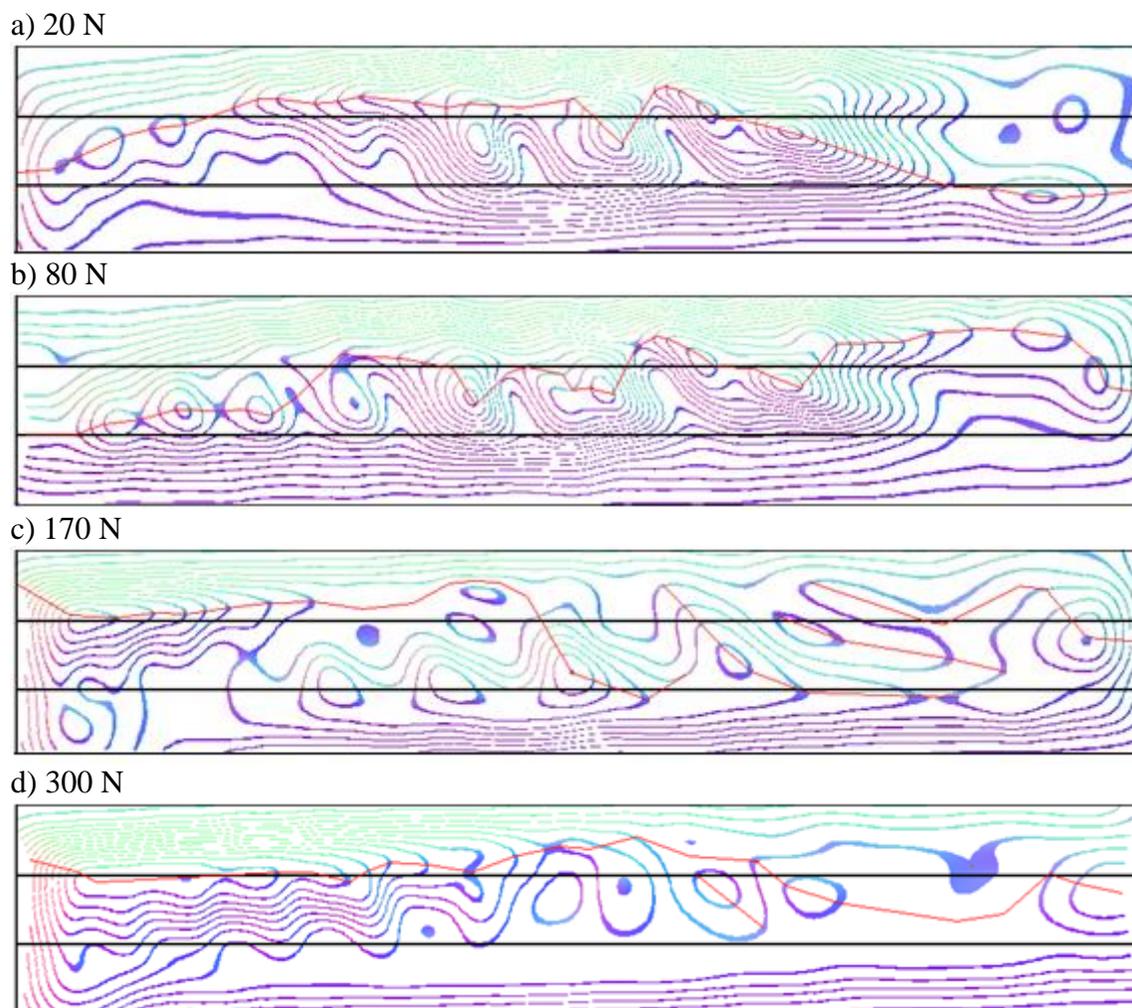


Figura 58. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 03 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

A Figura 58 mostra que as peças atuaram unidas durante o ensaio. Para as cargas $F_{10\%}$ e $F_{20\%}$ houve a distribuição de tensão sobre os elementos, porém na taxa de carregamento $F_{30\%}$ e $F_{40\%}$ a concentração de tensão no corpo foi aliviada possivelmente devido ao aumento do contato entre as peças, aumentando o atrito entre essas. Um fato interessante ocorre por ocasião do carregamento $F_{30\%}$, onde se observa uma descontinuidade na linha neutra.

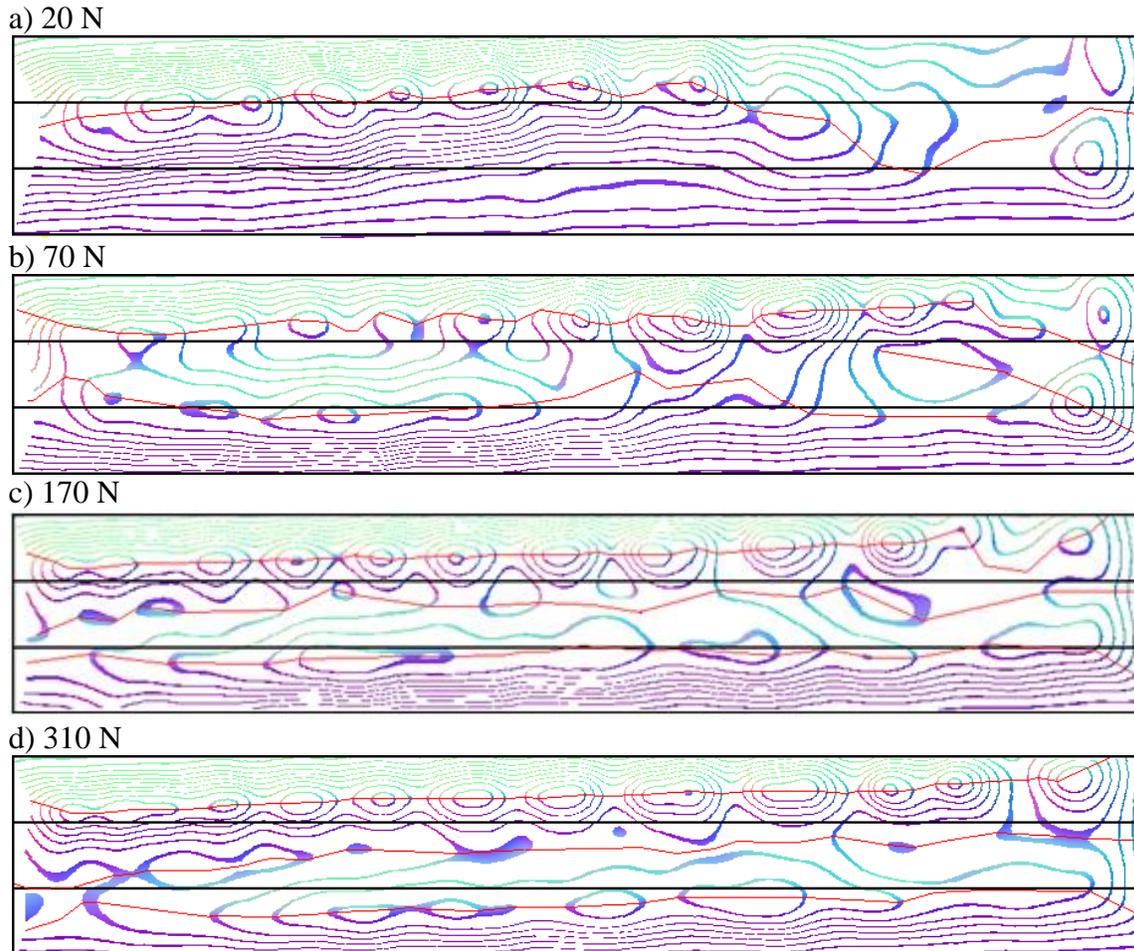


Figura 59. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 04 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

A Figura 59 mostra que, para esse ensaio, a carga inicial atua sobre o MRFT unido, ou seja, com os elementos não individualizados. No entanto, o comportamento do feixe enfatiza elementos individualizados, exibindo regiões de tração e compressão distintas em cada elemento. Além disso, o elemento mediano teve a menor concentração de tensão entre as demais. Este comportamento contradiz aos resultados anteriores para o MRFT. Provavelmente, esta distribuição de tensão tenha sido influenciada devido ao baixo contato entre as superfícies, e restritos em poucos pontos ao longo do comprimento entre os elementos do feixe. A real determinação desta variação de contato pode ser passível de análise através da instrumentação do MRFT, por exemplo, o uso de *strain-gages*.

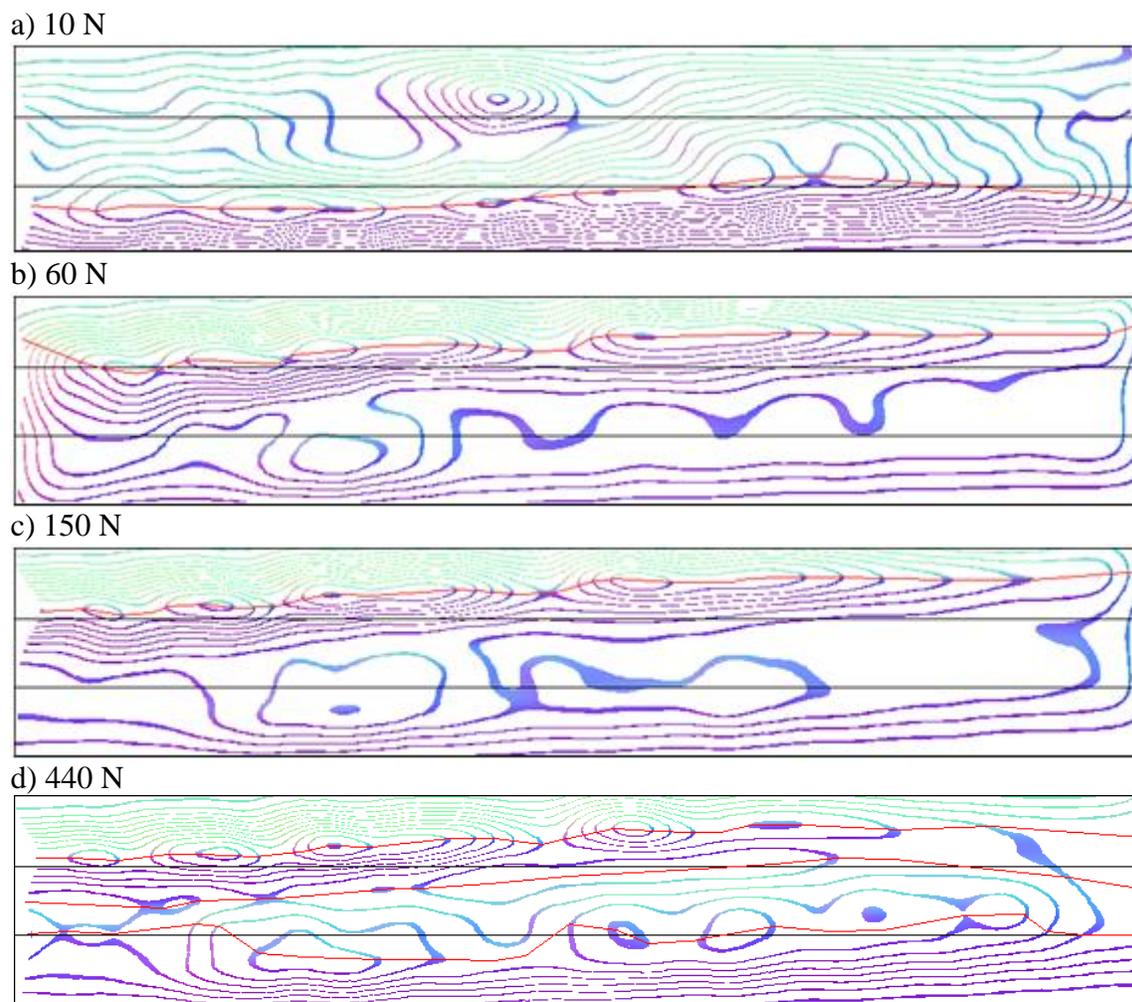


Figura 60. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 05 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

A Figura 60 mostra que o MRFT 05 apresentou tendência de atuação unida entre os elementos; porém, com o aumento da carga, o atrito entre os elementos foi maior, e, conseqüentemente a tensão no corpo mediano foi aliviada, e na taxa de carregamento de $F_{40\%}$ o MRFT deixou de atuarem unidas, porém houve um aumento de concentração de tensão nesse carregamento em relação aos dois casos anteriores.

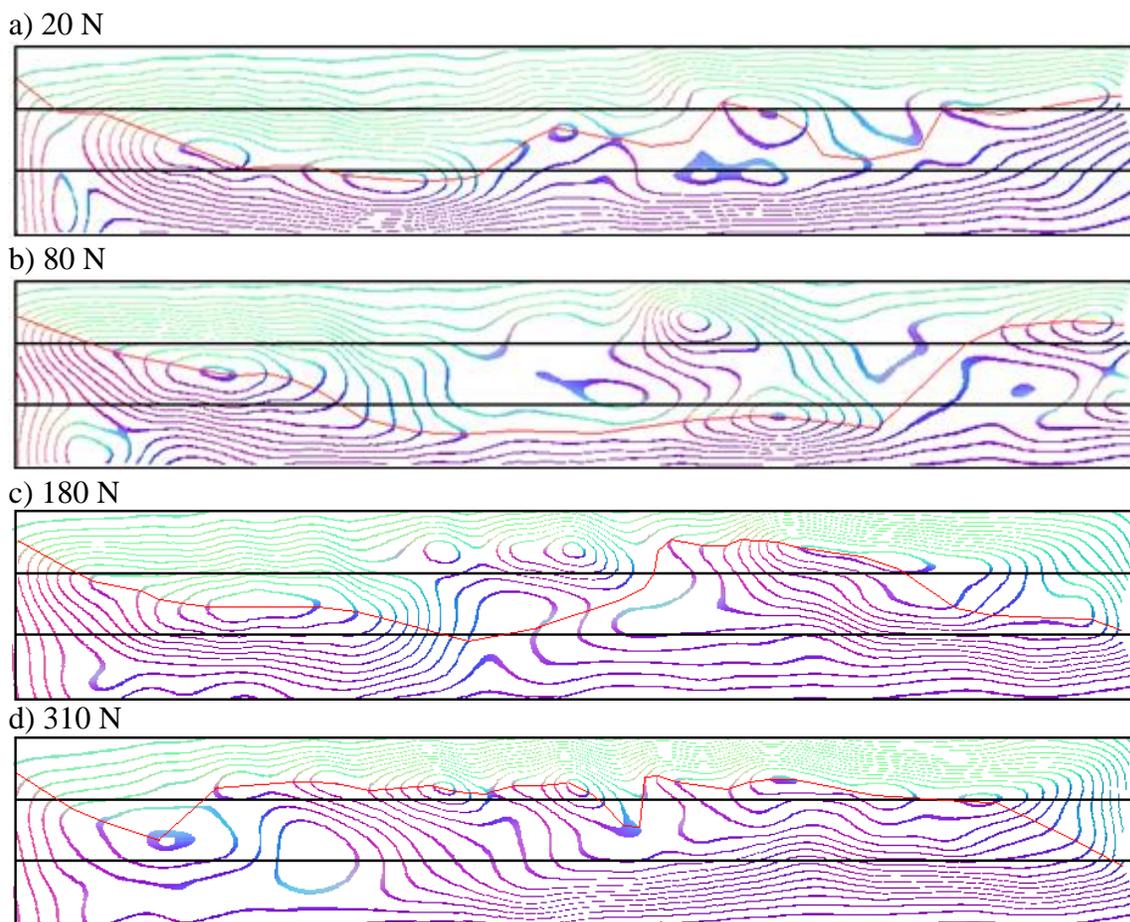


Figura 61. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 06 do grupo G1 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

Na Figura 61, nota-se que o comportamento do MRFT sugere uma união das peças do MRFT durante o carregamento. Houve uma tendência de deslocamento da linha neutra do elemento mediano para o elemento superior. Com a mudança da linha neutra entre as peças, houve também o alívio da tensão no elemento mediano, em particular na lateral esquerda.

Analisando o comportamento da distribuição de tensão para o grupo G1, pode-se dizer que o MRFT apresentou um comportamento transitório entre a união das peças e a individualização das mesmas na distribuição de tensões entre essas, porém com uma leve predominância de atuarem unidas.

As Figuras 62 à 67 mostram o resultado da distribuição de tensões em MRFT para o grupo G2.

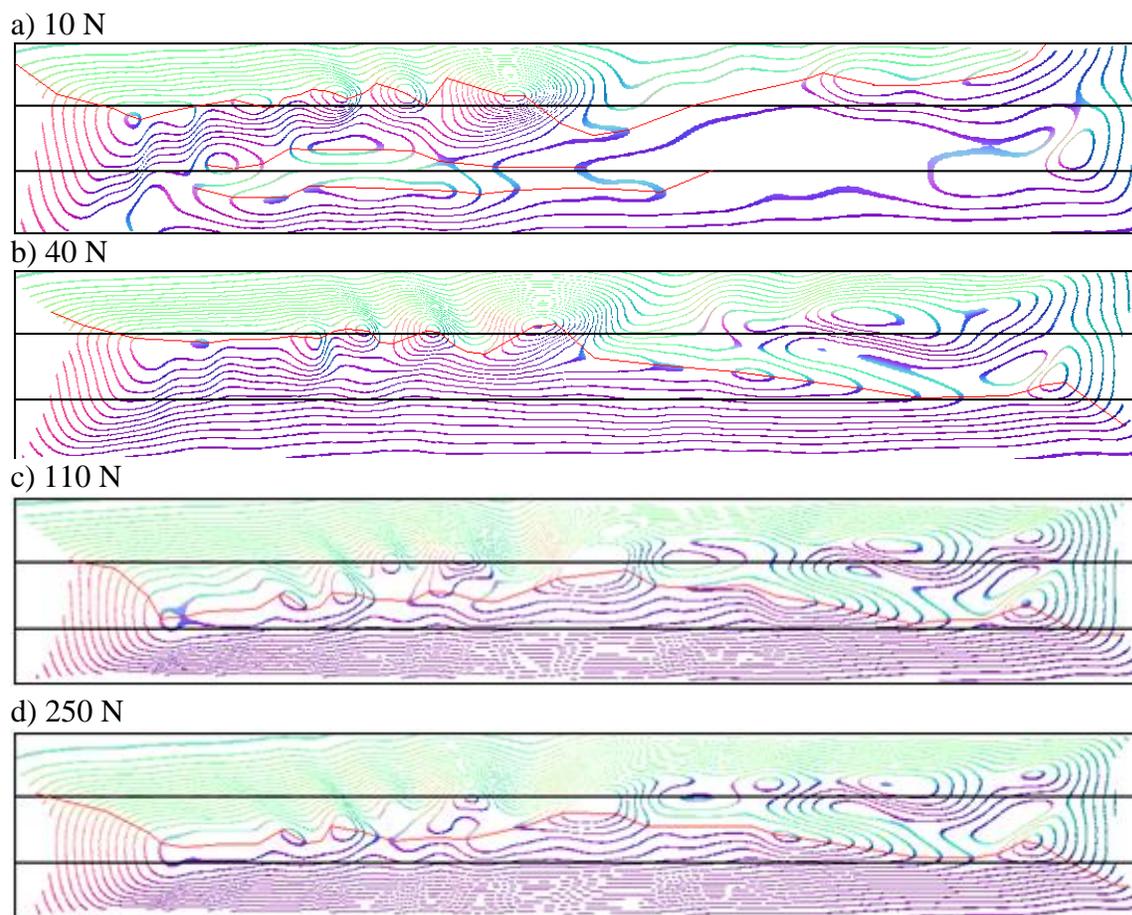


Figura 62. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 01 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

O comportamento geral do MRFT 01 do grupo G2, mostrado na Figura 62, indica uma tendência dos elementos atuarem unidos. Percebe-se também que, à medida que o carregamento aplicado aumenta, a proximidade das ondas se torna menor e bem distribuída ao longo de todo o corpo de prova.

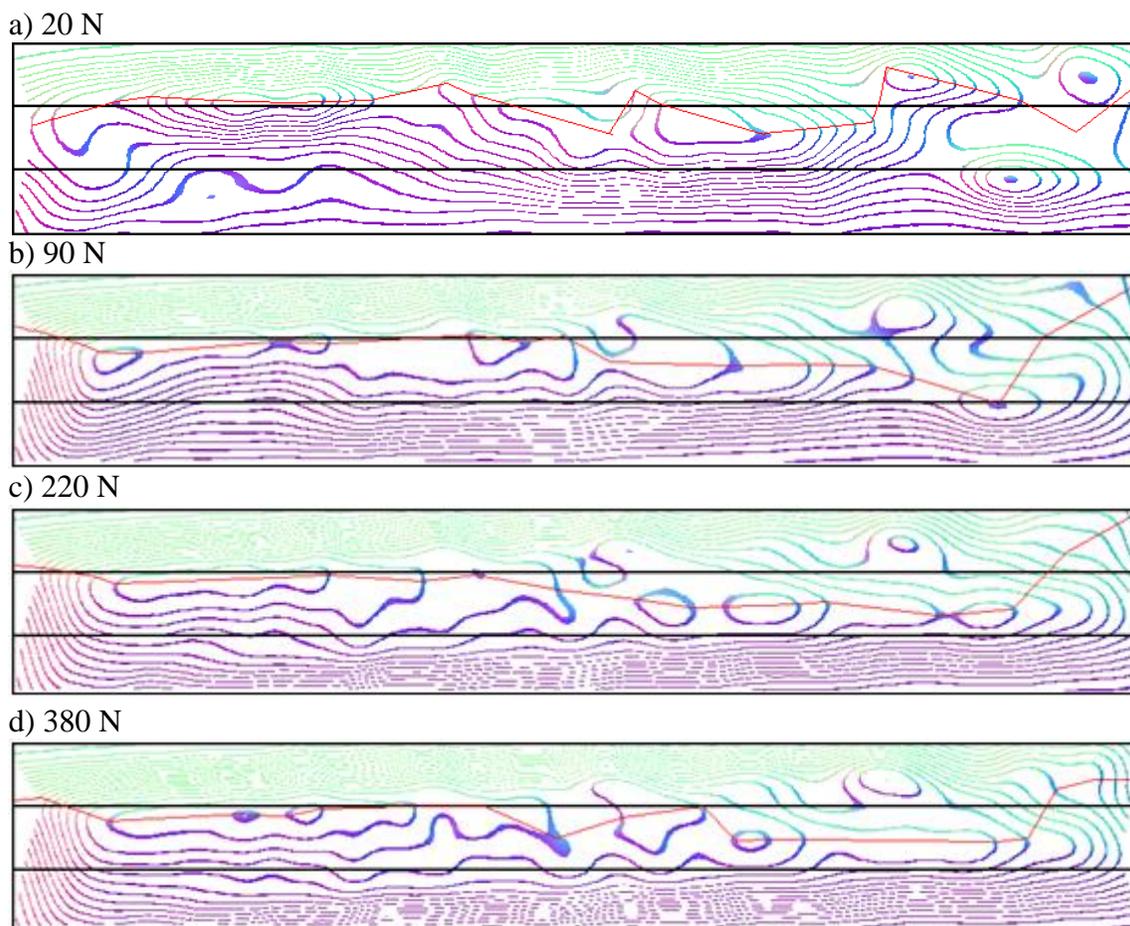


Figura 63. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 02 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

A Figura 63 mostra as peças do MRFT atuando unidas, porém, diferente do caso anterior, sendo que o elemento mediano teve um alívio maior com relação à distribuição de tensões. Isso pode ter ocorrido devido ao melhor contato entre o elemento mediano e o elemento inferior e superior, permitindo uma ação mais eficiente do atrito e conseqüentemente diminuindo o deslizamento entre ambas. Este atrito mais eficiente pode ter aliviado a tensão no elemento mediano. Esta hipótese também é comprovada através da análise da determinação da posição da linha neutra, a qual foi localizada à meia altura do MRFT, com o deslocamento da linha neutra. Outro fato que pode comprovar a hipótese está relacionado à linha neutra estar mais localizada à meia altura do MRFT.

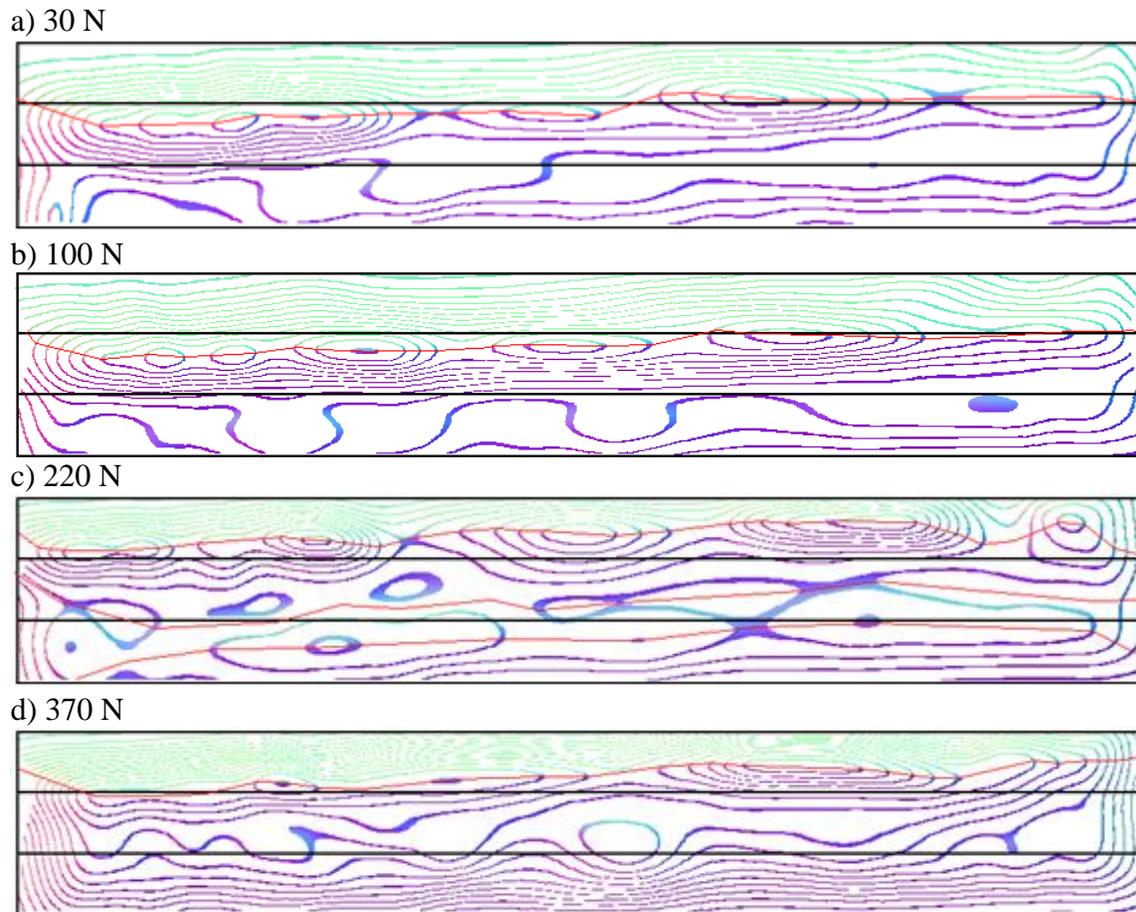


Figura 64. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 03 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

A Figura 64 mostra que, no geral, o elemento superior desenvolveu as tensões de compressão, enquanto que o elemento inferior e mediano apresentou as tensões de tração. Apesar de que na carga $F_{30\%}$ os elementos atuarem individualizados, possivelmente devido a algum deslizamento dos elementos e possível diminuição da força de atrito, o comportamento, no âmbito geral foi de união entre as peças do MRFT.

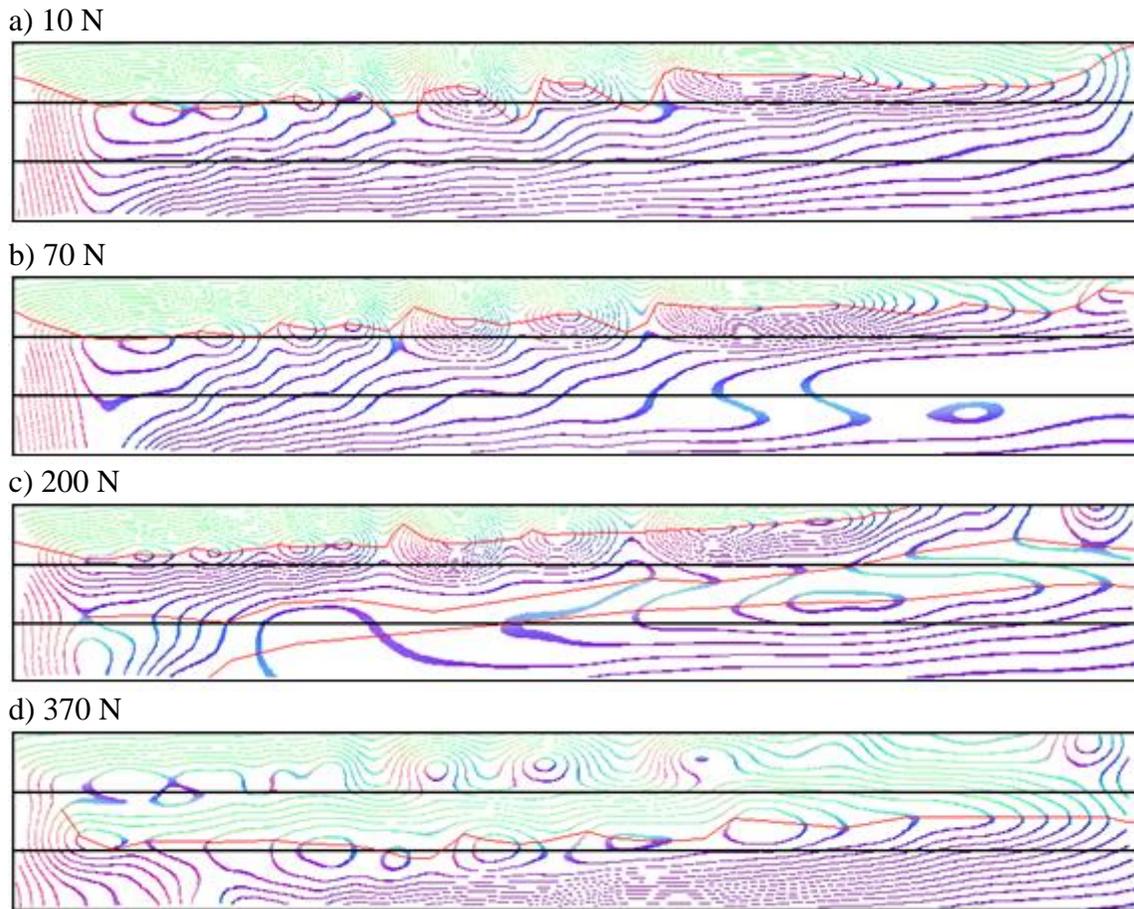
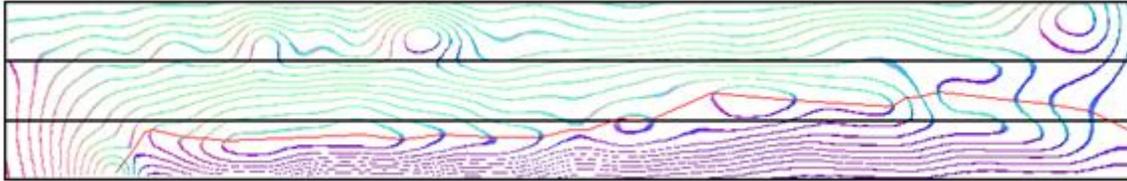


Figura 65. Resultado da distribuição de tensão obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 04 do grupo G2 para níveis de carga: a) 10 N; b) 70 N; c) 200 N; d) 370 N.

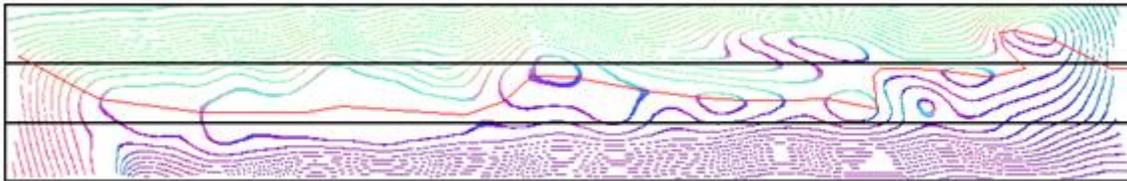
O mesmo comportamento observado na Figura 64, pode ser também visto na Figura 65. Porém, diferentemente do que ocorreu na Figura anterior, a linha neutra vai se deslocando da peça superior para a peça inferior, de acordo com o aumento da carga, i.e., à medida que o atrito entre os elementos mediano e superior vai crescendo, o atrito do elemento mediano com o inferior acaba sendo influenciado provavelmente devido à diminuição do contato entre ambos. Outro fator que pode ser observado é quando os elementos atuam de forma individualizada, ou seja, com o mínimo de contato entre os demais, podendo ocorrer uma zona de transição no comportamento dos elementos atuarem de forma individualizada para um comportamento com os elementos atuando unidos. Esse fato é observado quando o MRFT

deixa de apresentar os elementos com região de tensão de tração e compressão distintas para uma região única de tração e outra de compressão.

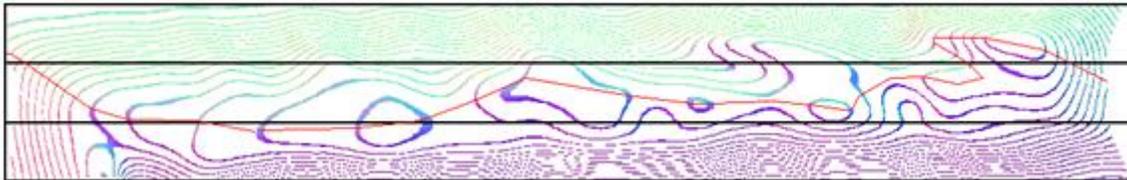
a) 10 N



b) 90 N



c) 210 N



d) 380 N

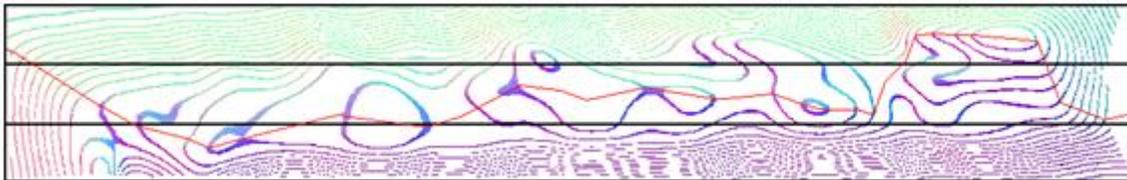


Figura 66. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 05 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

A Figura 66 indica um comportamento de união entre os elementos, evidenciando que a linha neutra se deslocou do elemento inferior para o elemento superior, à medida que o carregamento foi ampliado.

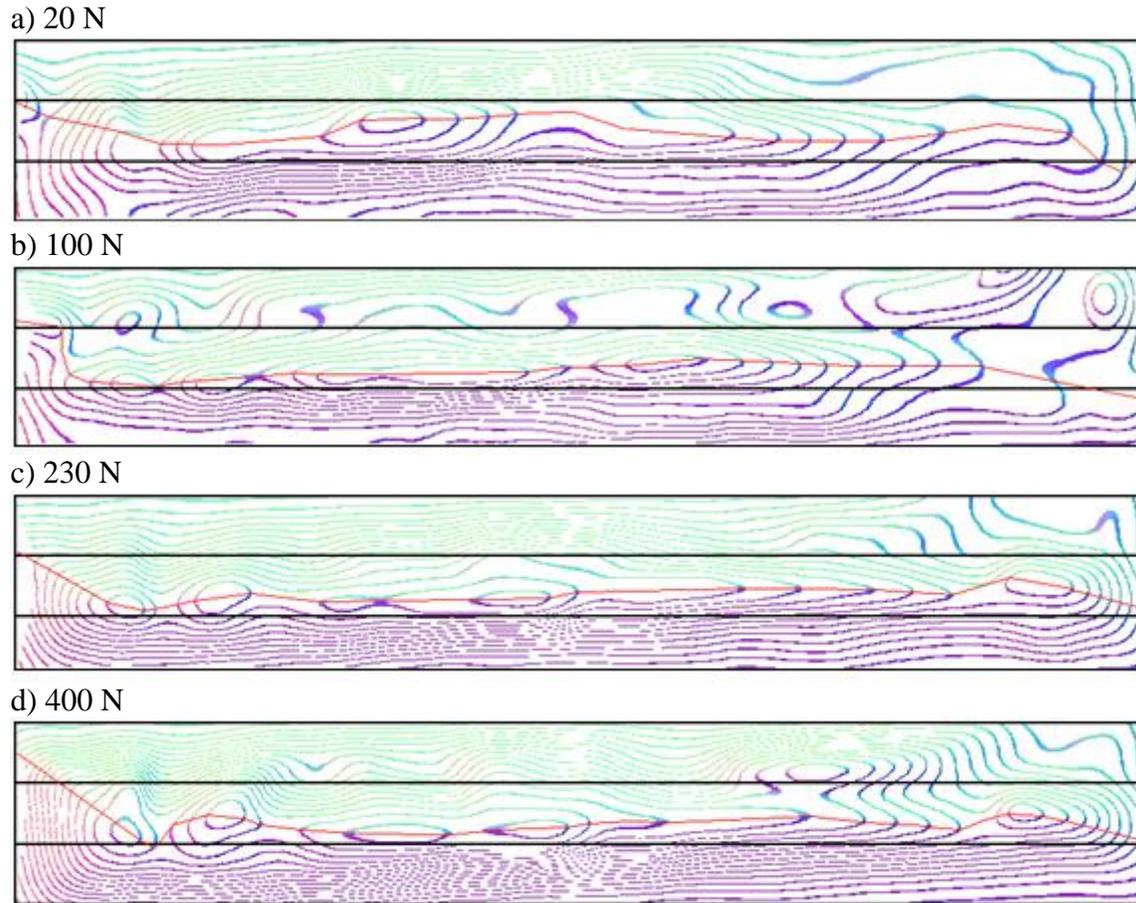


Figura 67. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 06 do grupo G2 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

De todos os resultados de distribuição de tensões no MRFT pelo ensaio fotoelástico, até o momento, o MRFT 06 (Figura 67) foi o que mais evidenciou estabilidade, onde a linha neutra pouco variou e a proximidade e quantidade de linhas, variou diretamente em relação ao aumento de carga. Entende-se como estabilidade neste trabalho de pesquisa como sendo a menor variação possível do deslocamento da linha neutra, bem como a qualificação de seu comportamento entre elementos atuantes unidos ou individualizados.

Com a análise geral do comportamento do grupo G2, pode-se dizer que o MRFT, nesse caso, teve um comportamento de união entre os elementos e houve pouco ou nenhum deslizamento. As tensões foram bem distribuídas para todos os níveis de carga, havendo

apenas uma linha neutra na altura do feixe, fato que pode ser atribuído ao deslizamento mínimo entre as peças do feixe.

As Figuras 68 à 73 mostram o resultado da distribuição de tensões em MRFT para o grupo G3.

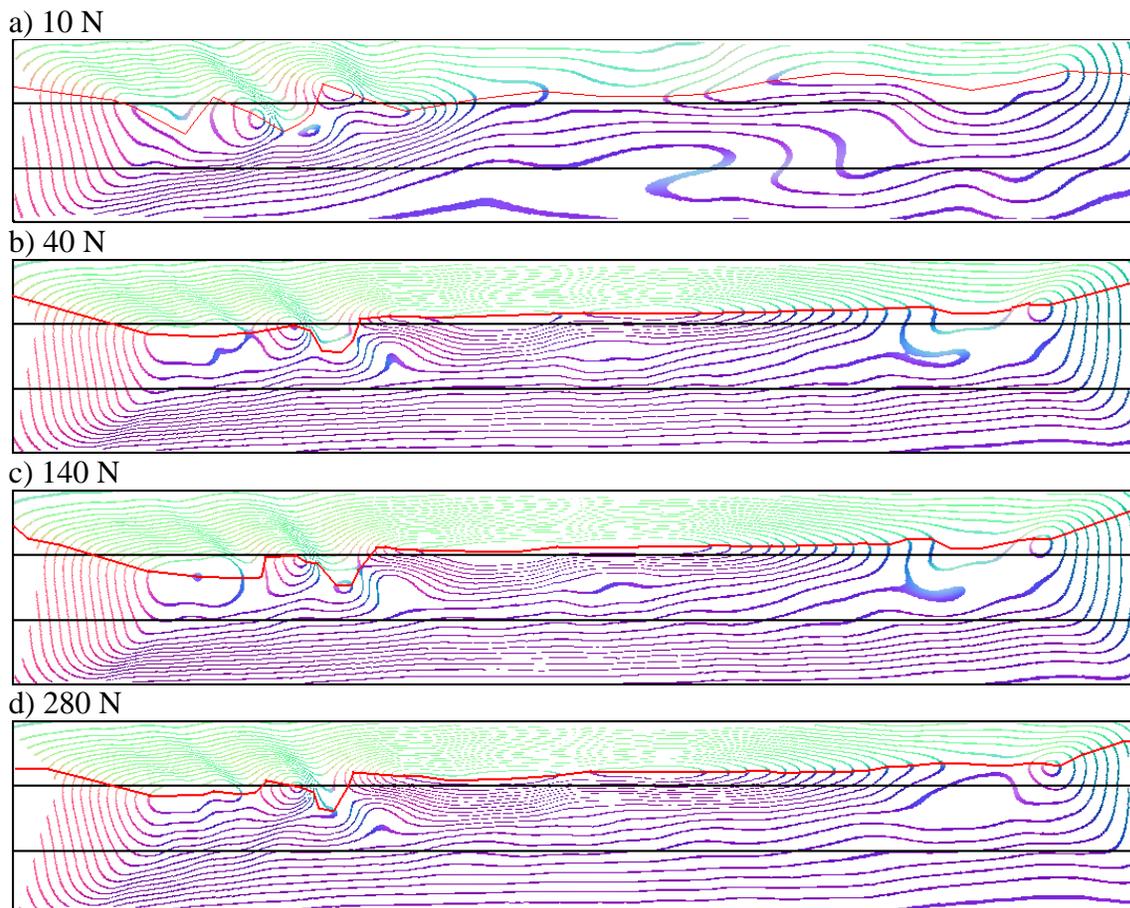


Figura 68. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 01 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

A Figura 68 mostra que o MRFT esteve estabilizado durante todo o teste de carregamento, com pouca variação da linha neutra. Houve uma predominância da tensão de compressão na peça superior, enquanto que, nas outras, houve predominância da tensão de tração. Também se percebe que, à medida que o carregamento aplicado é ampliado, as isóclinas ficam mais próximas uma das outras, refletindo uma boa distribuição da tensão sobre o MRFT.

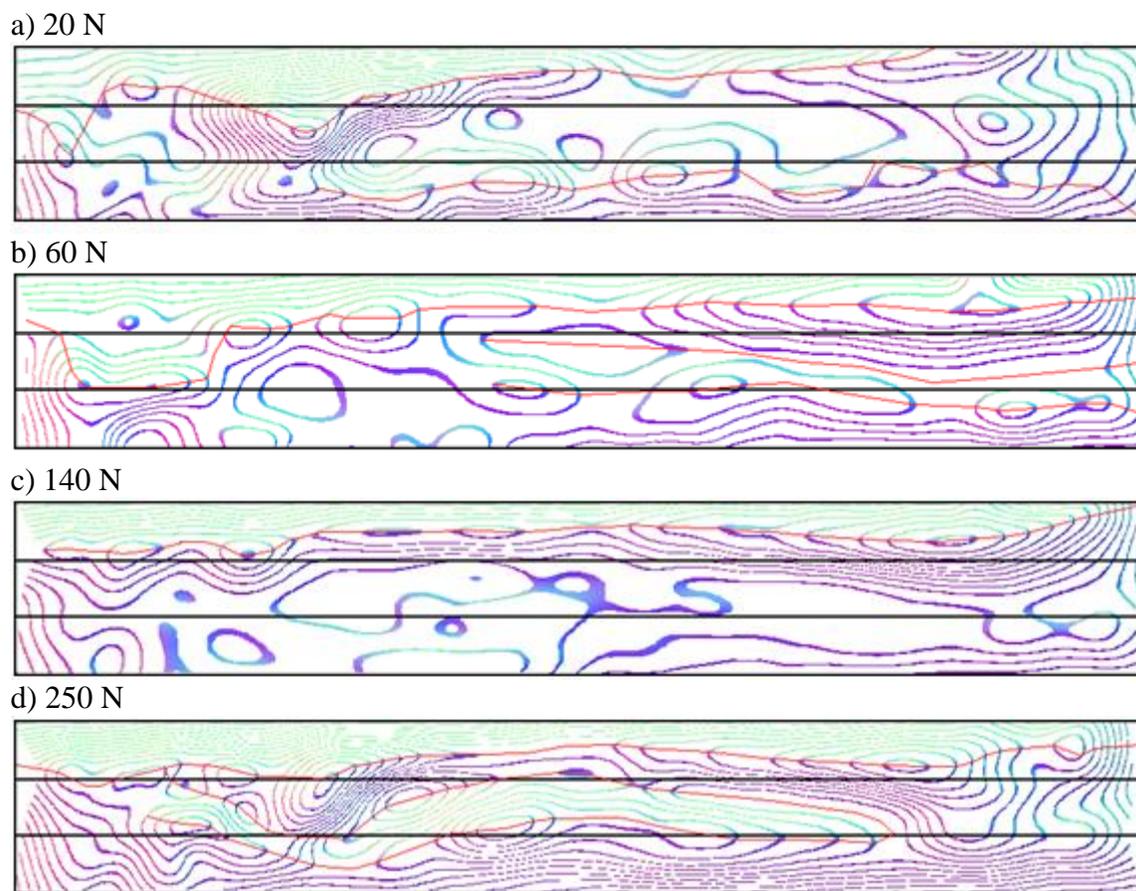


Figura 69. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 02 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

O resultado mostrado na Figura 69 é evidenciado uma predominância dos elementos atuarem individualizados. A linha neutra foi bastante variável em cada ensaio, assumindo maior estabilidade nos níveis de carga $F_{30\%}$ e $F_{40\%}$. Provavelmente um posicionamento de contato menos perfeito entre os elementos, provocado por alguma irregularidade ao longo do comprimento desses possa ter gerado uma diminuição na ação do atrito entre ambos, porém, com o carregamento ampliado e o contato entre as peças aumentado; logo, este acabou por promover uma maior estabilidade no MRFT. O comportamento deste MRFT não caracterizou o efeito do grupo, pois num mesmo ensaio houve situação de única ou mais linhas neutras. Portanto o contato (maior ou menor) entre os elementos passa a estar regendo a formação das imagens.

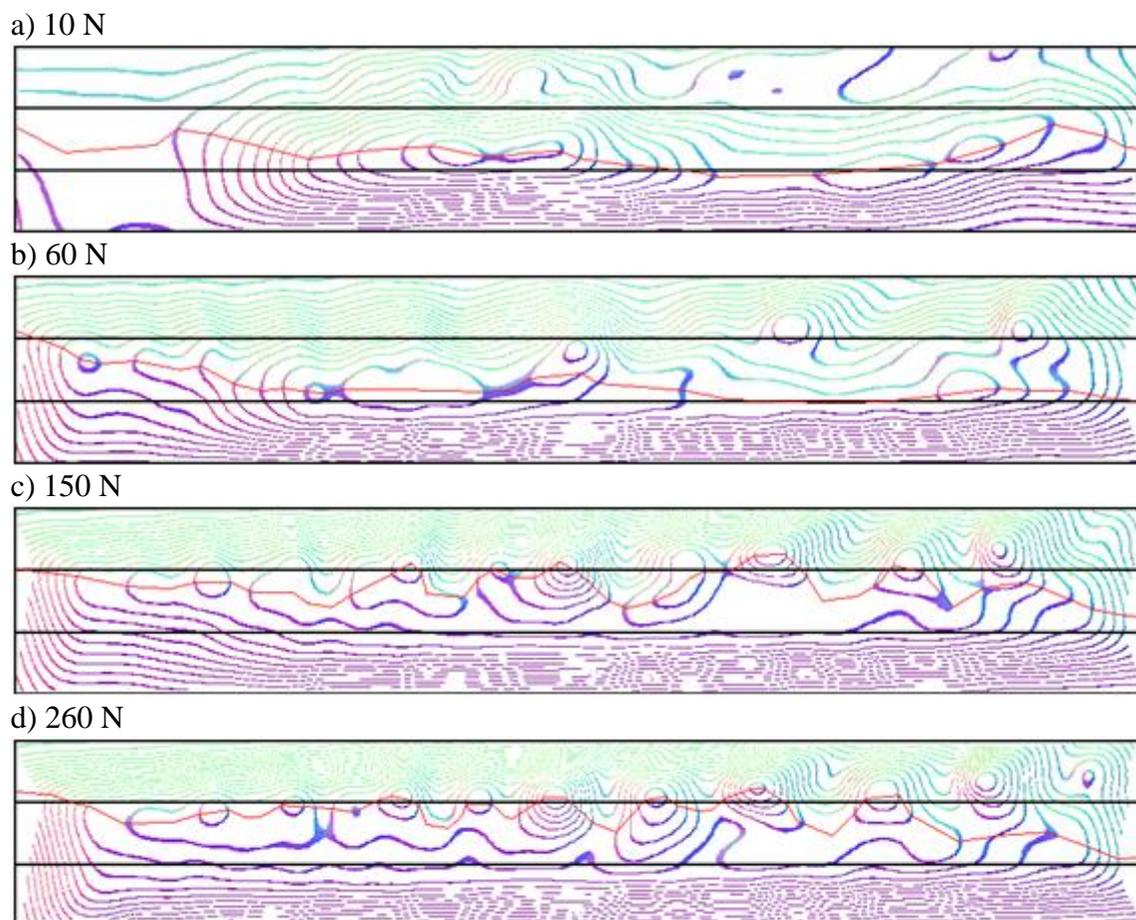


Figura 70. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 03 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

O MRFT da Figura 70 mostrou que as peças atuaram unidas durante todo o carregamento. Uma linha neutra simples divide os elementos em zonas únicas de atuação das tensões de tração e compressão. Porém, essa linha variou durante o carregamento, partindo do elemento inferior e atingindo o elemento superior. Também é verificado que no carregamento $F_{10\%}$ o elemento superior apresentou zonas de baixa concentração de tensão, de acordo com as distâncias entre as ondas e, à medida que o carregamento foi ampliado no elemento superior, essas zonas de baixa concentração foram se deslocando para o elemento mediano. Fica fácil de perceber por este caso, que a atuação da força de atrito é muito importante na distribuição de carga, pois, com a ampliação do carregamento, maior foi o contato entre os elementos, melhor a estabilidade da distribuição de tensão, e a linha neutra permaneceu localizada no elemento mediano, onde as forças de ação e reação aliviaram as tensões na peça mediana.

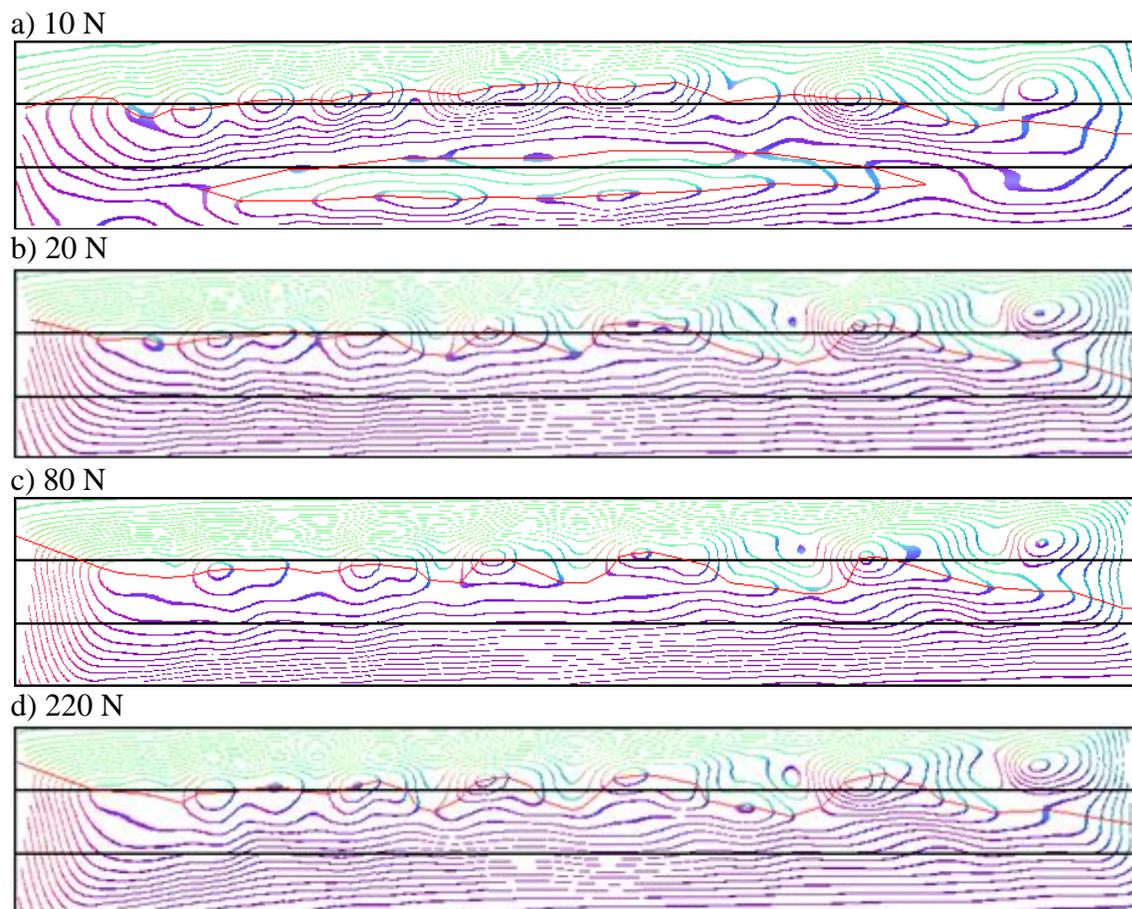


Figura 71. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 04 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

Assim como na Figura 68, as peças de madeira do MRFT 04 (Figura 71) apresentaram comportamento semelhante, com boa distribuição de tensões entre si, pouca variação no deslocamento da linha neutra ao longo do MRFT e a predominância da tensão de compressão no elemento superior, e tração nos demais.

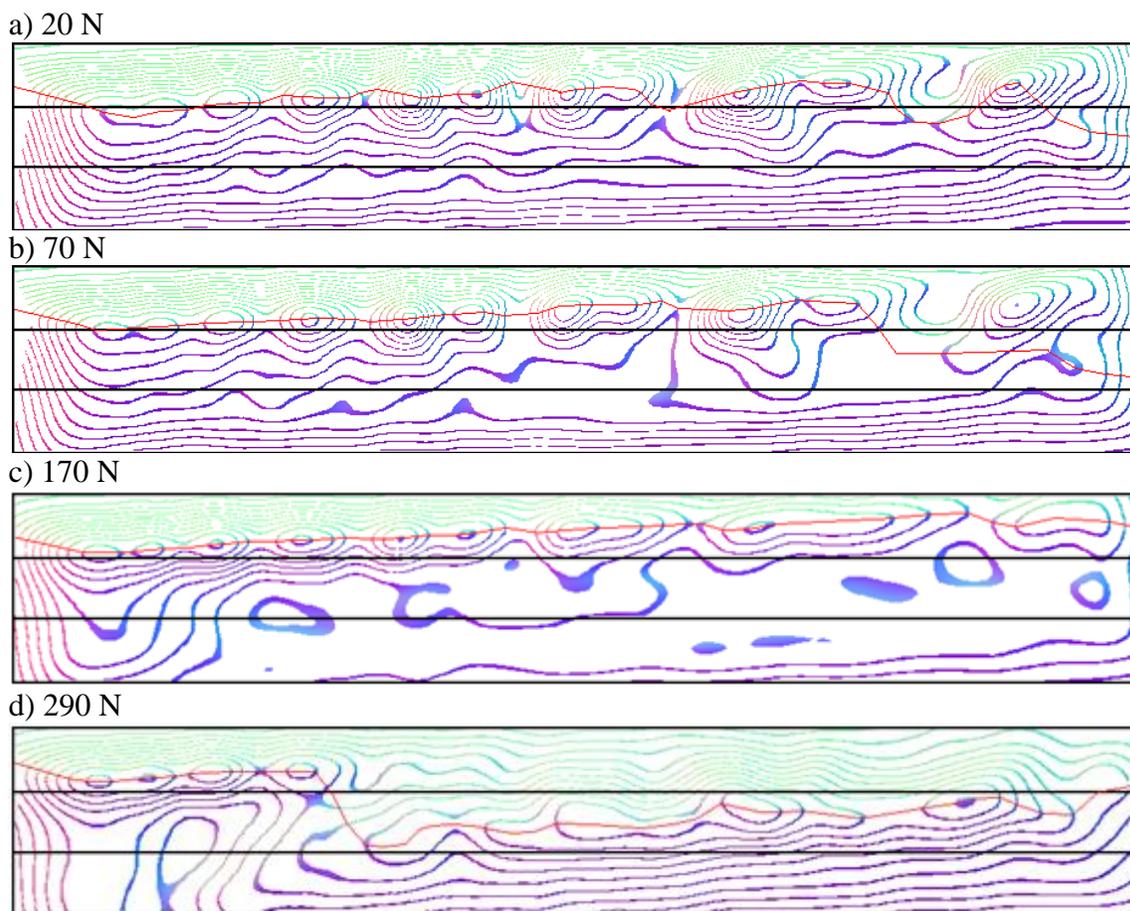
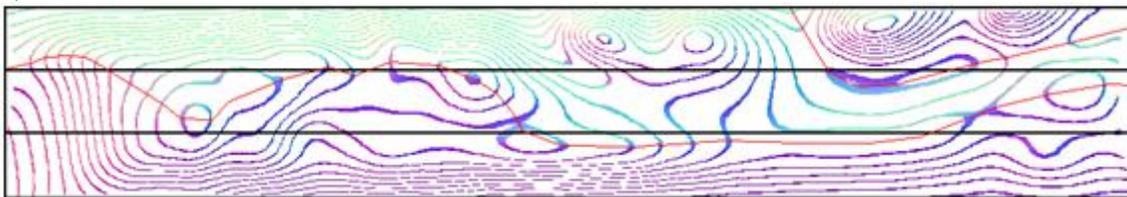


Figura 72. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 05 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

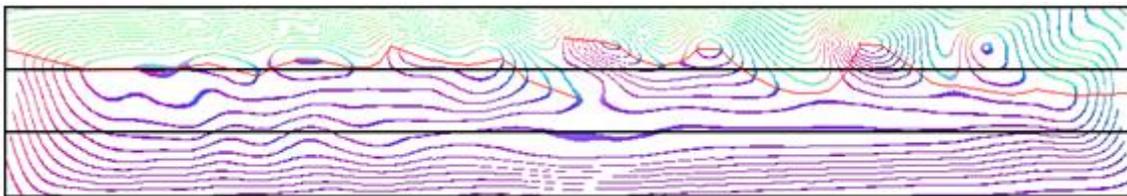
Na Figura 72, as peças atuaram novamente unidas, com predominância de tensões de compressão no elemento superior e tração nos demais. Porém, houve um comportamento interessante de ser analisado. O carregamento $F_{10\%}$ apresenta boa distribuição de tensão, porém, com a ampliação do carregamento, a carga de $F_{20\%}$ houve um alívio das tensões no elemento mediano até que na carga $F_{30\%}$ a linha neutra se deslocou para o meio do elemento superior e as tensões praticamente foram aliviadas nos elementos inferiores e medianos, devido à baixa concentração de tensão mostrada através do distanciamento das isóclinas e conseqüentemente o elemento superior absorveu toda a energia de carregamento aplicado sobre o MRFT. A partir do carregamento F_{11} (40%) essa concentração foi restabelecida e a tensão foi novamente distribuída ao longo do MRFT e a linha neutra novamente voltou a ser

deslocada para o elemento mediano. Esse comportamento pode ser explicado devido à ocorrência de algum escorregamento entre os elementos e que o elemento superior não manteve contato com o elemento mediano, e este com o inferior. Essa informação é de grande valia para projetos estruturais, como no caso dos veículos destinados a transportar toras, nos quais tal comportamento deve ser previsto nos projetos, sempre buscando reforçar o elemento inferior, a fim de evitar ruptura do mesmo, por excesso de carga em casos de má distribuição de tensões.

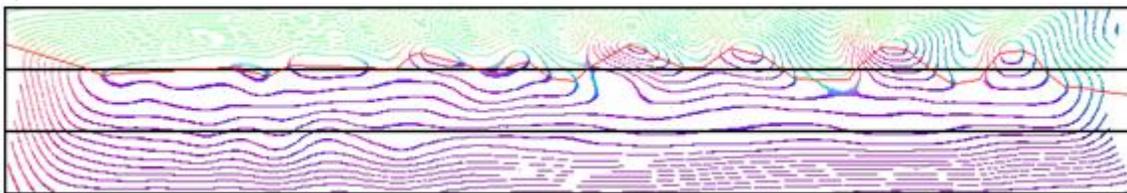
a) 10 N



b) 50 N



c) 120 N



d) 250 N

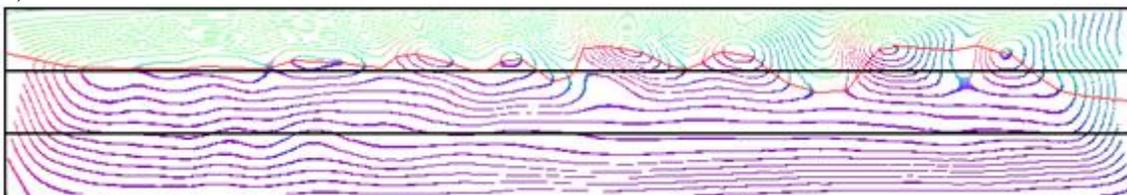


Figura 73. Resultado da distribuição de tensões obtido através da técnica de *moiré* de sombra para o MRFT 06 do grupo G3 para diferentes níveis de carregamento aplicado no ensaio fotoelástico.

A Figura 73 mostra que os elementos atuaram unidos durante o carregamento, apesar do comportamento apresentado no carregamento $F_{11 (10\%)}$ de atuação individualizada entre si.

A linha neutra apresentou pouca variação de deslocamento mostrando assim que no corpo, quando há atuação de forma bastante estável, a tensão é bem distribuída ao longo dos elementos. Sintetizando, o comportamento das madeiras do grupo G3, evidenciam maior envolvimento das peças para a rigidez efetiva do feixe.

O comportamento geral do grupo G3 pode ser classificado como se o MRFT atuasse unido sob nível de carga, com predominância de tensão de compressão no elemento superior e tensão de tração no elemento mediano e inferior.

A qualificação das tensões demonstrou que dentre todos os grupos, o grupo G3 apresentou melhor distribuição de tensões sobre o corpo, seguido dos grupos G2 e G1. Analisando os módulos de elasticidade de cada grupo de madeira, verifica-se que houve uma correlação entre ambos, ou seja, o módulo de elasticidade poderia ter influenciado na distribuição de tensão do MRFT. Os resultados mostraram que, quanto menor o módulo de elasticidade houve maior envolvimento das peças para a rigidez efetiva do MRFT, ou seja, quanto menor o módulo de elasticidade, maior será a curvatura das peças no feixe, favorecendo a mobilização do contato. Em contrapartida, quanto maior o módulo de elasticidade da madeira, menor será sua mobilização e a tendência dos elementos do feixe atuarem individualmente é maior, fazendo com que os elementos se comportem como base elástica entre si. Este dado para a otimização de *forwarder* é de grande importância, pois determina qual tipo de madeira pode ser utilizada como parte integrante da estrutura do veículo. É também observada a influência do atrito de contato para a distribuição de tensão em um MRFT. Essa observação foi evidenciada quando a comparação entre a distribuição das linhas isóclinas sobre o MRFT dos diferentes grupos mostraram-se cada vez mais estáveis, à medida que o coeficiente de atrito entre as peças aumentava. O coeficiente de atrito foi medido e apresentado na tabela 7, sendo que no grupo G3 o coeficiente de atrito foi maior que no grupo G2, que por sua vez foi maior que o coeficiente de atrito entre as madeiras que compuseram o grupo G1. Logo, observa-se pelas figuras que a estabilidade de distribuição de tensão ao longo do corpo também foi melhor. Portanto, o atrito e o módulo de elasticidade podem ser considerados como fatores determinantes para que as toras possam atuar unidas. O resultado qualitativo obtido pelo método do *moiré* de sombra, mostrando a influência do atrito na distribuição de tensão, está em comum acordo com a teoria da mecânica dos materiais que diz que para elementos que atuem em feixes, se não houver atrito entre as barras, a flexão de

uma barra é independente da outra; cada uma sofrerá compressão nas fibras longitudinal superiores e tração nas inferiores (TIMOSHENKO, 1974).

5.4.2 Quantificação das tensões

A quantificação das tensões no MRFT foi iniciada com a determinação do coeficiente fotoelástico da madeira. O coeficiente fotoelástico de tração e compressão foi determinado através da quantidade de franjas formada no elemento sob determinado carregamento aplicado. O ordenamento das franjas foi tomado a partir da linha neutra como uma das condições de contorno para a quantificação da tensão de compressão e tração. A Figura 74 mostra um exemplo de ordenamento de franja feito para elemento simples.

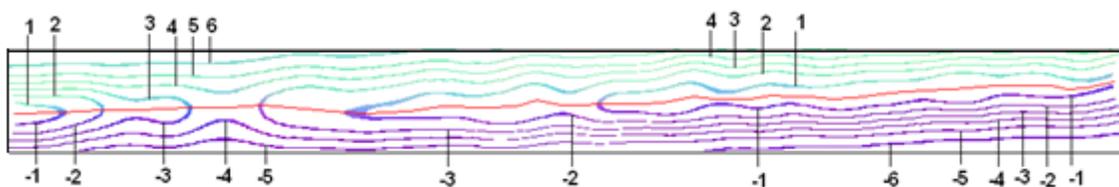


Figura 74. Ordenamento de franjas para toras simples.

Além de a linha neutra determinar a ordem das franjas, outras condições de contorno foram aplicadas para sua numeração. As linhas de comportamento parabólico que se encontram próximas uma às outras possuem o mesmo valor de ordenação; por exemplo, as linhas de comportamento parabólico que apresentarem uma união de cor roxa e azul possuem o mesmo valor para ordenação, como pode ser observado na linha de ordem 3. As linhas azuis foram ordenadas usando números positivos e as linhas roxas foram ordenadas com números negativos, apenas para diferenciá-las. A Figura 75 ilustra como foram determinadas as zonas de tração, compressão e localização da linha neutra.

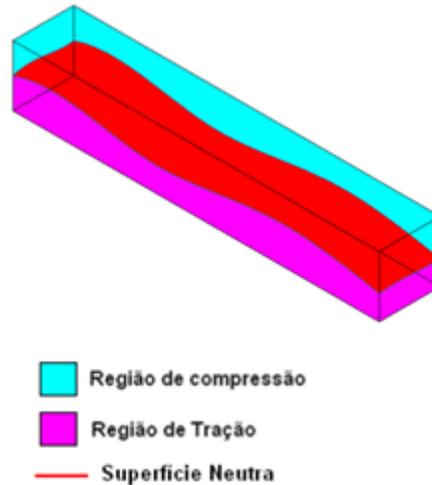


Figura 75. Ilustração das regiões de tração, compressão e superfície neutra de acordo com o comportamento determinado pela mecânica dos materiais.

Para os ensaios de flexão no elemento individualizado, foram determinados dois coeficientes fotoelásticos: o coeficiente fotoelástico de tensão de compressão ($k_{\sigma C}$) e o coeficiente fotoelástico de tensão de tração ($k_{\sigma T}$). O coeficiente fotoelástico foi determinado para cada intervalo de carregamento aplicado no elemento. As Tabelas 11, 12 e 13 mostram os resultados dos coeficientes fotoelásticos obtidos para o grupo de madeira G1, G2 e G3, respectivamente.

Tabela 11. Coeficientes fotoelásticos de tração e compressão para madeiras do grupo G1.

	Natureza da tensão	Tensão (MPa)	Linhas	Coefficiente Fotoelástico (MPa/linha)
$F_{10\%}$	Compressão ($k_{\sigma C}$)	0,528	6	0,09
	Tração ($k_{\sigma T}$)	0,528	6	0,09
$F_{20\%}$	Compressão ($k_{\sigma C}$)	1,584	14	0,11
	Tração ($k_{\sigma T}$)	1,584	14	0,11
$F_{30\%}$	Compressão ($k_{\sigma C}$)	3,696	13	0,28
	Tração ($k_{\sigma T}$)	3,696	13	0,28
$F_{40\%}$	Compressão ($k_{\sigma C}$)	11,616	11	1,06
	Tração ($k_{\sigma T}$)	11,616	11	1,06

Tabela 12. Coeficientes fotoelásticos de tração e compressão para madeiras do grupo G2.

	Natureza da tensão	Tensão (MPa)	Linhas	Coefficiente Fotoelástico (MPa/linha)
F _{10%}	Compressão (k _{σC})	0,528	8	0,07
	Tração (k _{σT})	0,528	8	0,07
F _{20%}	Compressão (k _{σC})	2,112	9	0,23
	Tração (k _{σT})	2,112	9	0,23
F _{30%}	Compressão (k _{σC})	4,752	11	0,43
	Tração (k _{σT})	4,752	11	0,43
F _{40%}	Compressão (k _{σC})	8,976	10	0,90
	Tração (k _{σT})	8,976	10	0,90

Tabela 13. Coeficientes fotoelásticos de tração e compressão para madeiras do grupo G3.

	Natureza da tensão	Tensão (MPa)	Linhas	Coefficiente Fotoelástico (MPa/linha)
F _{10%}	Compressão (k _{σC})	0,528	11	0,05
	Tração (k _{σT})	0,528	11	0,05
F _{20%}	Compressão (k _{σC})	1,056	9	0,12
	Tração (k _{σT})	1,056	10	0,11
F _{30%}	Compressão (k _{σC})	2,640	10	0,26
	Tração (k _{σT})	2,640	11	0,24
F _{40%}	Compressão (k _{σC})	5,808	10	0,58
	Tração (k _{σT})	5,808	10	0,58

A tensão obtida pelo método fotoelástico de *moiré* foi calculada pelo produto entre o coeficiente fotoelástico de cada nível de carga e a ordem das franjas (N), com as franjas quantificadas distintamente entre franjas que representavam as tensões de tração e compressão, respectivamente.

Para efeito de comparação dos resultados quantitativos, foram calculadas as tensões com resultados obtidos em ensaio de flexão e fornecidos pela EMIC. Porém, como os resultados qualitativos mostraram que o MRFT apresentou variação na distribuição de tensão com elementos atuando entre unidos e individualizados, logo foi necessário calcular as tensões adotando dos segmentos: o primeiro considerando a área de seção de viga do MRFT de dimensões de 50 mm x 75 mm e com o momento de inércia pleno (I_p), i.e., considerando não haver deslizamento entre os elementos, como se fosse uma viga única de dimensões semelhantes. Na segunda análise, foi considerada uma área de seção de 25 mm x 25 mm para elementos individualizados. Para este caso, o momento de inércia foi correspondente ao

momento de inércia de um elemento individualizado, e chamado de I_0 . Foi conveniente neste trabalho de pesquisa, nomear a seção de 50 mm x 75 mm como seção composta e a seção de 25 mm x 25 mm como seção simples.

Com os coeficientes de tração e compressão calculados e a determinação das ordens das linhas, as tensões de tração e compressão no MRFT foram quantificadas pelo método fotoelástico de *moiré* de sombra. As Tabelas 14, 15 e 16 mostram os valores médios de tensão quantificados experimentalmente e pelo método de *moiré*. Os valores de cada ensaio realizado estão tabelados no apêndice A.

Tabela 14. Resultados médios e desvio padrão de tensão experimental calculada para seções compostas, simples, supondo não haver deslizamentos, e pelo método de *moiré* para madeiras do grupo G1.

	Tensão média Área de Seção Composta (50 x 75) [MPa]	Tensão média Área de Seção Simples (25 x 25) [MPa]	Tensão média calculada por <i>Moiré</i> Compressão [MPa]	Tensão média calculada por <i>Moiré</i> Tração [MPa]
F10%	0,06 ±0,02	0,53 ±0,17	1,26 ±0,14	1,23 ±0,12
F20%	0,20 ±0,03	1,81 ±0,31	1,55 ±0,15	1,55 ±0,19
F30%	0,47 ±0,05	4,27 ±0,48	3,65 ±0,58	3,93 ±0,55
F40%	0,95 ±0,17	8,58 ±1,50	15,31 ±3,26	15,14 ±3,18

Tabela 15. Resultados médios e desvio padrão de tensão experimental para seções compostas, simples, supondo não haver deslizamentos, e pelo método de *moiré* para madeiras do grupo G2.

	Tensão média. Área de Seção Composta (50 x 75) [MPa]	Tensão média. Área de Seção Simples (25 x 25) [MPa]	Tensão média calculada por <i>Moiré</i> Compressão [MPa]	Tensão média calculada por <i>Moiré</i> Tração [MPa]
F10%	0,05 ±0,02	0,44 ±0,22	0,99 ±0,14	0,99 ±0,17
F20%	0,24 ±0,07	2,16 ±0,61	3,83 ±0,69	3,75 ±0,73
F30%	0,58 ±0,13	5,24 ±1,17	6,84 ±1,23	6,41 ±1,32
F40%	1,05 ±0,16	9,46 ±1,43	15,11 ±1,32	15,11 ±1,05

Tabela 16. Resultados médios e desvio padrão de tensão experimental calculada para seções compostas, simples, supondo não haver deslizamentos, e pelo método de *moiré* para madeiras do grupo G3.

	Tensão média. Área de Seção Composta (50 x 75) [MPa]	Tensão média. Área de Seção Simples (25 x 25) [MPa]	Tensão média calculada por <i>Moiré</i> Compressão [MPa]	Tensão média calculada por <i>Moiré</i> Tração [MPa]
F10%	0,04 ±0,01	0,35 ±0,14	0,74 ±0,05	0,74 ±0,05
F20%	0,15 ±0,05	1,32 ±0,47	1,86 ±0,44	1,65 ±0,43
F30%	0,39 ±0,09	3,52 ±0,81	4,53 ±1,05	4,16 ±0,99
F40%	0,76 ±0,07	6,82 ±0,66	10,55 ±2,09	10,21 ±1,97

Há de se considerar o deslizamento entre os elementos no momento do carregamento. Para este fato, quantificar a tensão requer o uso do cálculo da fração da rigidez para o MRFT, i. e., um momento de inércia efetivo (I_{ef}). Este cálculo apenas servirá como uma forma de melhor comparar os valores obtidos pela técnica fotoelástica frente às teorias da resistência de materiais. A tabela 17 mostra os resultados do cálculo da rigidez efetiva, calculado com base nos dados obtidos pela prensa universal EMIC em comparação com os módulos de rigidez pleno (I_p e I_0).

Tabela 17. Resultados de momento de inércia pleno (I_p e I_0) teórico e efetivo (I_{ef}), obtido por ensaios para o grupo de madeiras G1.

	Momento de Inércia Teórico. Seção simples. (25 x 25) [mm ⁴]	Momento de Inércia Efetivo. Seção simples. (25 x 25) [mm ⁴]	Momento de Inércia Teórico. Seção Plena. (50 x 75) [mm ⁴]	Momento de Inércia Efetivo. Seção Plena. (50 x 75) [mm ⁴]
F10%	32.552,1	-	1.757.813,5	52.242,6
F20%	32.552,1	38.449,0	1.757.813,5	66.374,2
F30%	32.552,1	31.071,5	1.757.813,5	70.502,6
F40%	32.552,1	30.764,7	1.757.813,5	77.951,0

Para exemplificar o efeito do comportamento do feixe a nível de rigidez efetiva, apresentou-se os cálculos de tensão para o grupo de madeiras G1, a fim de calcular a rigidez efetiva em comparação com as tensões de *moiré*. A tabela 18 mostra os valores de tensão calculados para este segundo caso e comparados com a tensão de *moiré* obtidos anteriormente.

Tabela 18. Quantificação da tensão efetiva aplicada sobre o MRFT do grupo de madeira G1 para rigidez efetiva (I_{ef}).

	Tensão média. Área de Seção Plena (50 x 75) [MPa]	Tensão média. Área de Seção Simples (25 x 25) [MPa]	Tensão média calculada por <i>Moiré</i> Compressão [MPa]	Tensão média calculada por <i>Moiré</i> Tração [MPa]
F10%	2,123 ±0,58	0,708 ±0,20	1,26 ±0,14	1,23 ±0,12
F20%	5,559 ±0,50	1,853 ±0,50	1,55 ±0,15	1,55 ±0,19
F30%	12,163 ±2,52	4,054 ±0,84	3,65 ±0,58	3,93 ±0,55
F40%	21,586 ±3,15	7,195 ±1,05	15,31 ±3,26	15,14 ±3,18

Comparando-se os valores de tensão teórica e a tensão efetiva, observou-se que considerando área de seção simples, os valores foram pouco alterados entre a rigidez máxima e a efetiva. Porém, há uma grande diferença entre os valores de tensão obtidos quando se considera a área de seção composta. Este fato pode ser explicado pela comparação do momento de inércia obtido em cada caso. A Tabela 17 compara o momento de inércia teórico e efetivo para o grupo de madeiras G1.

Verifica-se que a variação do valor de tensão calculado para a área de seção composta é reduzido consideravelmente porque há uma redução significativa no momento de inércia efetivo do MRFT atuando através da união de elementos em relação a um elemento único de mesma área de seção composta, ou seja, a rigidez do MRFT formada por elementos é mais próxima da rigidez de elementos atuando individualmente. O mesmo pode ser verificado quando se compara as tensões obtidas por *moiré* com as tensões teóricas (cálculo de tensão regido pelo I_p), isto é, verifica-se que seus módulos aproximam-se mais aos valores obtidos para uma área de seção de simples, do que para elementos atuando unidos.

O desvio padrão de tensão obtido para os valores de tensão experimental, de acordo com as equações da mecânica dos materiais, mostrou que sua variação foi da ordem de 25% para tensões teóricas (I_p e I_0) e de 22% para tensões efetivas (I_{ef}). Esta taxa de desvio padrão pode ser explicada pela variação das propriedades mecânicas do lote de toras de onde foram obtidos os corpos de prova para formar os elementos do MRFT. O desvio padrão das tensões calculadas pela técnica de *moiré* foi da ordem de 16%. Isto mostra que a variação de tensão obtida pela técnica de *moiré* pode ter sido influenciada pelas condições da madeira e não por fontes de erro relacionadas aos equipamentos utilizados ou procedimento experimental.

Também é observado que quanto maior a tensão aplicada no MRFT, menor foi a taxa do desvio padrão apresentada para cada intervalo de carga aplicado, ou seja, houve uma estabilização maior da distribuição de tensão sobre o corpo de prova.

Comparando-se os valores de tensão experimental, foi verificado que os valores de tensão média considerando área de seção simples apresentaram-se mais próximos dos valores obtidos pela técnica de *moiré* do que o valor de tensão calculado considerando a seção de área composta. Ou seja, pela comparação dos dados, pode-se perceber, através da comparação dos valores de tensão experimental e tensão obtida pela técnica de *moiré*, que o MRFT apresenta um módulo de tensão próximo aos valores calculados para elementos atuando individualmente, embora a análise qualitativa das linhas da distribuição de tensão sobre o MRFT demonstre um comportamento de distribuição de tensão em elementos predominantemente unidos. Isto é um dado importante visto que, para projeto de otimização do *forwarder*, ainda que a determinação qualitativa das tensões apresentasse caráter unificado, o projeto de máquinas deve basear seus cálculos para toras únicas.

Considerando os módulos de tensão para elementos individuais, os dados de tensão ainda mostraram que a tensão no corpo de prova esteve abaixo da tensão experimental calculada no MRFT pela técnica fotoelástica. Para futuros projetos de otimização, esta informação é importante, pois mostra que a força de atrito entre as toras a enrijece e melhora a distribuição de tensão, e, em alguns casos, pode até aliviá-las. Porém, o projeto deve considerar uma tensão no elemento inferior com módulo superior à simples determinação da ação do peso das toras sobre esta, como forma de segurança do projeto.

Os dados de quantificação de tensão por *moiré* mostraram que os módulos de tensão de tração mais elevados estiveram localizados nas extremidades inferiores do MRFT, estando em comum acordo com os resultados da simulação computacional. Para as tensões de compressão obtidas por *moiré*, os módulos mais elevados ficaram concentrados nas extremidades superiores, o que de certa forma contraria o resultado esperado pela simulação computacional; porém, a análise qualitativa mostrou que a maior concentração de tensões ficou localizada na região central do MRFT, o que significa que qualitativamente o resultado do ensaio está em comum acordo com a simulação computacional realizada.

Os dados de quantificação de tensão por *moiré* de sombra estão em comum acordo com os dados de qualificação. Isto é, para mesma carga, a tensão entre os módulos obtidos,

esteve no âmbito geral, menores para o MRFT do grupo G3, seguido pelo grupo G2 e G1, posteriormente.

6. CONCLUSÕES

Pelo exposto acima, pode-se concluir ao final deste trabalho de pesquisa que:

A qualificação das tensões geradas através da técnica fotoelástica de *moiré* de sombra, de forma geral, se assemelhou com a simulação computacional e com a teoria estabelecida pela mecânica dos materiais. Na avaliação das peças, pôde-se notar a formação de regiões com tensões distintas de compressão e tração.

A quantificação das tensões de tração e compressão, obtidas pela técnica de *moiré* de sombra, ainda que de forma preliminar, mostraram que os módulos de tensão obtidos pela técnica de *moiré* estiveram mais próximos das tensões calculadas para elementos individualizados. Este fato pode ser comprovado quando comparadas as tensões de *moiré* com as tensões teóricas e efetivas para o MRFT (Modelo Reduzido do Feixe de Toras) ao qual apresentou uma rigidez mais próxima do elemento individualizado.

Os resultados dos ensaios de flexão realizados em peças simples e em feixes de peças da espécie *Eucalyptus saligna* permitiram auferir que a técnica de *moiré* pode ser considerada adequada para determinar qualitativamente e quantitativamente a distribuição de tensões em elementos fletidos.

A análise fotoelástica mostrou haver sensibilidade na formação de franjas para peças com módulos de elasticidades diferenciados, bem como pelos coeficientes de atrito distintos de cada grupo de peças ensaiadas. Para projetos de otimização de *forwarder* essas informações são determinantes. Porém, nas condições reais sem mecanismo nenhum de efetivação do feixe de toras, em virtude das irregularidades de superfície dificultando e reduzindo as áreas de contato entre toras, se faz mais seguro considerar as toras atuando individualmente.

Na análise do MRFT, pôde-se notar que as toras formaram feixes efetivos. A influência do atrito permitiu dar maior estabilidade na distribuição de tensão sobre o MRFT quando carregado, fato observado pela formação de franjas sobre o elemento composto, influenciando assim na rigidez do conjunto. As franjas ainda mostram que o uso de toras em feixes pode de certa forma aliviar as tensões, principalmente nas toras medianas. A maior concentração de tensão é verificada no elemento superior e inferior, enquanto que o alívio de tensão é recorrente nas toras medianas. Este dado deve ser explorado nos projetos de

otimização de *forwarder*, uma vez que o aumento da rigidez do feixe de toras, como o uso de cintas envolvendo as peças do feixe, por exemplo, pode aliviar as tensões nas toras superiores e inferiores.

Finalmente, tendo em vista os resultados e discussões apresentados, a técnica de *moiré* de sombra possibilitou observar a importância das peças formarem um feixe efetivo propiciando uma maior rigidez ao conjunto MRFT, o que se faz necessário para a otimização dos projetos de *forwarder*.

6.1 Sugestões para futuros trabalhos

Pelos dados e resultados expostos nesta pesquisa, considera-se como sugestão de futuros trabalhos:

- ✓ Analisar a técnica de *moiré* de sombra como um novo método fotoelástico para determinação de tensão. Convém analisar a técnica, em detrimento às demais técnicas fotoelásticas existentes, apontando suas limitações e influência dos equipamentos do arranjo experimental nos resultados. Sugere-se inicialmente que a análise seja feita em feixes formados por elementos mais próximos à isotropia, por exemplo, metais.
- ✓ Realizar experimentos com instrumentação mais precisa para o estados de tensão e deformação (*strain-gages*, por exemplo), bem como analisar a influência do atrito de contato entre elementos em contrapartida com os resultados obtidos por *moiré*.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AJOVALIST, A. **Breve guida alla scelta dei metodi de análisi sperimentali delle tensione**, 1998. Acessado em Jul. 2010. Disponível em: <<http://dmti.unifi.it/aias/articoli/not%2084/ajovalasit.html>>.

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, 1.996.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira - procedimentos. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTA PLANTADA. **Anuário estatístico**: ano base 2008/ABRAF. Brasília, 2009.

ASSUNDI, A. K.; YUNG, K. H. Logical *moiré* and its application. *Experimental Mechanics*, Boston, v.31, n.3, p. 236-242, set, 1991.

BAENA, E. S. A Rentabilidade Econômica da Cultura de Eucalipto e sua contribuição ao Agronegócio Brasileiro. **Revista Científica da Famec**, São José dos Pinhais, 2.005.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de *Eucalyptus Citriodora*. **Revista Cerne**. V.9, n. 1, pp 66-80, 2.003.

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr. E. R. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Ed. Makron Books, 1.996.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. 2. ed. Malabar, Flórida: Krieger, 1993. 712 p.

BUFFONI, S. S. O. Resistência dos Materiais. **Notas de Aula**. Volta Redonda, RJ, Brasil, 2.004. Acessado em jul. 2010. Disponível em <http://www.professores.uff.br/salete/res1/aula11.pdf>.

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

CALLISTER Jr, W. D. **Fundamentos da ciência de engenharia de materiais**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2006.

CALIL Jr, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri, SP: Ed. Manole, 2003.

CAPUTO, A. A.; WYLIE R. S. **Role of Biomechanics in Periodontal Therapy**. pp 1-3, 2.008. Acessado em Julho de 2.009 <http://www.dent.ucla.edu/pic/members/biomechanics/page1.html>

CARDOSO, K. C.; DAL FABRO, I.M. Elastic Behavior of Bearing Ball. **Proceedings** of the 19º Congresso de exposição internacionais de tecnologia da mobilidade - SAE BRASIL 2.010. Vol 1. pp 1-15. São Paulo, SP, Brasil, 2.010.

CHIANG, F. P. **Moiré Methods of Strain Analysis**. Manual on Experimental Stress Analysis. New York: Ed. SESA. v.1. p 290-308. Ago. 1.979.

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, 2.006.

CRESPO, D.; QUIROGA, J.A.; GOMEZ-PEDRERO, J.A. Fringe extreme: State of the art software for automatic processing of fringe patterns, **Proceedings of SPIE** 6616 66163-1-66163 (2006).

EVANS, J. L. W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Products Journal**, v.50, n.7/8, p.75-87, 2000.

FANTIN, A. V. **Holografia digital complexa utilizando um interferômetro**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2.003.

FURLANI, J. E. **Um estudo sobre variação numérica do coeficiente de Poisson na madeira, considerando a anisotropia do material**. 156 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 1.995.

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

GAZZOLA, J.; DAL FABBRO, I. M.; SORIANO, J.; MAROTTI, D.V. Determinação de Descontinuidades Internas em Materiais Sólidos Através da Técnica de *Moiré* de Sombra. In: **Resúmenes...**Chillán: VI CIIACH,v. I, pp. 1 - 13, 2.010-a.

GAZZOLA, J.; DAL FABBRO, I. M.; SORIANO, J.; ENES, A. M.; KUNINARI, F. Shadow *Moiré* Applied to Torsional Stress Distribution Mapping. **Agricultural Engineering Journal**. Sophia, Bulgaria, v. 48, n.2, p. 61-65, Oct, 2.010-b.

GAZZOLA, J.; CARDOSO, K. C.; TEIXEIRA, L. G. R.; LAURENTI, R.; DAL FABBRO, I. M. Application of a photoelastic *Moiré* technique in determining stress and strain distributions on coupled gears surface. In: Proceedings... Samsun: ITTAFE'10 v. 1, pp 106-110, 2.010-c.

GÓES, J. L. N.; DIAS, A. A. Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 29, p. 57-77, 2005.

GONÇALVES, J. L. M. Cultivo mínimo. **Revista Cultivar Máquinas**, ano VIII, n. 78, p. 12-14, set. 2008.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J. CERRI, D. G. P. Comparison of Elastic Constants of Wood Determined by Ultrasonic Wave Propagation and Static Compression Testing. *Wood and Fiber Science*. v. 43, n.1, pp. 64-75, 2011.

HERTZ, H. R. G. et al. Desenvolvimento da Técnica de *Moiré* de Sombra como Alternativa de Baixo Custo para Análise Postural. **Scientia Medica**, Porto Alegre. v. 15, n. 4, pg 235-242 Out/Nov. 2005.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural**. EMBRAPA, Colombo, 2006. 32 p.

LINO, A. C. L. **Métodos de *moiré***. Congresso nacional dos estudantes de Engenharia Agrícola, Campinas, Jul. 2001.

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 FABRO, 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, 2.004.

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.

LOBÃO, M. S.; LÚCIA, R. M. D.; MOREIRA, M. S. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 889-894, nov./dez. 2004.

LOGSDON, N. B.; CALIL Jr., C.. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. São Carlos, n. 18, p. 77-107, 2002.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **Cerne**, v.6, N.2, p.124-129, 2000.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. Silva; BIRRO, M. H. B. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2003.

MAGNANIN Filho, N. Uma introdução a placas laminadas constituídas de materiais compostos em fibras longas. **Semina: Ci. Exatas/tecnol**. Londrina, v. 21, n. 4, p. 95-108, dez. 2.000.

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. **Applied optics**. Washington. Vol. 18, n. 4, p. 91-96, mar., 1970.

MONTEIRO, J.M.; CHOUSAL, J.A.; VAZ; M.A. **Vibration Analysis by Laser Interferometry Techniques**, International workshop on Aerospace and Powered Lift Technologies, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 7-9 Julho 1997.

MYIAKE, E. T.; SOLLERO, P.; PAIVA, W. P. Análise Experimental de Tensões Usando Processamento Digital de Imagens Fotoelásticas de Reflexão. **Anais...** Ilha Solteira: Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, v.1, p. 1427-1431, 2004.

MURAMATSU, M.; RODRIGUES, R. Estudo de deformação através de interferometria speckle-shearing. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 10, p.112, 1.995.

MURAUSSKAS, L. C. Agronegócios: Agropecuária cultiva ramos nas cidades e laboratórios. 2004. Disponível em <<http://www.folha.uol.com.br/folha/especial/2004/profissoesdefuturo>> acessado em 04/09/2004.

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, 1.988.

OLIVEIRA, G. N.; SANTOS, P. A. M.; NUNES, L. C. S. Controlled phase mismatch in sectioned dynamic holographic moiré-like patterns. **Optical and Laser Engineering Journal**. V.1, n. 46, pp. 721 – 725, 2.008.

PIRES, G.P.; TAGIAFERRI, A. A.; THAUMATURGO, C. Interferometria óptica para ensaios não-destrutivos. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro. v.7, n.1, 21 p. 2002. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10069/10069.pdf>>. Acessado em 14 abr. 2009.

POST, D.; HAN, B.; IFJU, P. **High sensitivity moiré: experimental analysis for mechanics and materials**. New York: Spring-Verlag, 1994.

QUINAN, M. A. D. **Uma metodologia para determinação do fator de intensidade de tensões causado por tensões térmicas utilizando a fotoelasticidade**. 126 p. Tese de Doutorado em Ciências – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2.005.

RIVERA, J. L. V.; PÉREZ, J. R.; PALACIOS, F. Holografia Digital Aplicada na Análise de Deslocamentos em Condições Submersas. **Revista da Associação Portuguesa de Análise de Experimental de Tendões**. v. 15, p. 83-92. 2008.

SANTOS, J. C.; do PRADO, A. P.; GAZZOLA, J.; DAL FABBRO, I. M.; SORIANO, J. Moiré supported flexural tests carried on wooden beams. In: **Proceedings** of the 3rd International Congress on Information, Communication Technologies in Agriculture, Food, Forestry and Environment, ITAFFE'10, Vol. 1, pp 270-273. Ondokuz Mayıs University, Samsun, Turkey, June, 14-18, 2.010.

SCARPINELLA, G. A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Quioto**. 182 p. Tese de Mestrado em Energia – Universidade de São Paulo, 2002.

SCIAMMARELLA, C. A. The moiré method – A review. **Experimental Mechanics**. v.44, n.8, p. 418-433, nov., 1982.

SEIXAS, F. **Estudo comparativo entre dois sistemas operacionais de exploração de madeira sob corte raso, utilizando toras de diferentes comprimentos.** Tese de Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1.984.

SEIXAS, F. Novas tecnologias no transporte rodoviário de madeira. **Simpósio...** Viçosa : Sociedade de Investigações Florestais, v. 1. p. 1-27, 2005.

SILVA, E. R.; MURAMATSU, M. O fenômeno do *speckle* como introdução à metrologia óptica no laboratório didático. **Revista Brasileira de Ensino de Física.** São Paulo, v. 29, n. 2, p. 283-286, 2007.

SILVA, J. C.; MATOS, J. L. M.; OLIVEIRA, J. T. S.; EVANGELISTA, W. V. Influência da idade e da posição radial na flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore,** Viçosa, v. 29, n. 5, p. 795-799, set./out. 2005.

SILVA, M. L. et al. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamento para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore,** Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, nov./dez. 2007.

Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622007000600012&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em 16 abr. 2009.

SIMÕES, J. A. O., MONTEIRO, J., VAZ, M. A., TAYLOR, M., BLATCHER, S. Study with speckle interferometry of bone-implant interface conditions. In: **Proceedings** of the 11th International Conference on Experimental Mechanics, Oxford, 24-26nd of August, 1998.

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

SORIANO, J. **Estruturas mistas de concreto e madeira: Análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil**. 288 p. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

SOUZA, F. L.; ARAUJO, C. A. Fotoelasticidade Automatizada utilizando Luz Polarizada Fotoelíptica. **Revista Horizonte Científico**. Uberlândia, v.1, n.1 p. 1-13, 2.007. Acessado em Jul. 2.010. Disponível em:

<www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/3812/2817>.

SUTERIO, R. **Caracterização de constantes elásticas de materiais isotrópicos por holografia óptica eletrônica combinada ao método de ressonância mecânica**. 133 p. Dissertação de Mestrado em metrologia científica e industrial, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2.005.

TIMOSHENKO, S. P. **Resistência dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ed. Ao Livro Técnico S.A, 1974. Vol 1.

VALVERDE, S. R. ; SOARES, N. S. ; SILVA, M. L. ; JACOVINE, L. A. G. ; NEIVA, S. A. Mercado da madeira de Eucalipto no Brasil. **Revista da Madeira**, 2005. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/br/index.php>>. Acesso em: 02 de jun., 2009.

VAZ, M. A. K.; CURY, A. A. D. B.; MARIOLANI, J. R. L. Análise fotoelástica da distribuição de tensões produzida na mandíbula pela simulação do esforço mastigatório em sobredentaduras muco-dento-suportadas e prótese total. **Revista de Odontologia da Universidade de São Paulo**. Sao Paulo, v. 13, n.1, jan./mar. 1.999. Acessado em Agosto de 2.009

<www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-6631999000100014&script=sci_arttext&ting=es>

VIEIRA; M. A. P. **Análise vibracional de viga engastada utilizando a técnica de moiré: um estudo de caso**. 103 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

WICKERT, L. **Holografia Interferométrica e sua utilização no estudo de semente.** 70 p. Tese de Mestrado em Ciências, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, 1.978.

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.

8. Apêndice A

Tabela 8.1. Valores para cálculo do módulo de elasticidade no ensaio à compressão. Grupo G1.

Amostra	σ_{rup} (MPa)	$\sigma_{10\%}$ (MPa)	$\sigma_{50\%}$ (MPa)	$\epsilon_{10\%}$	$\epsilon_{50\%}$	Eco (MPa)
CSG1-01	44,51	4,45	22,25	$1,39 \times 10^{-4}$	$6,31 \times 10^{-4}$	36.192,1
CSG1-02	CANCELADO					
CSG1-03	41,12	4,11	20,56	$2,92 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-3}$	13.916,6
CSG1-04	43,46	4,35	21,73	$2,20 \times 10^{-4}$	$1,05 \times 10^{-3}$	21.011,4
CSG1-05	40,00	4,00	20,00	$1,14 \times 10^{-4}$	$5,77 \times 10^{-4}$	34.607,8
CSG1-06	40,81	4,08	20,41	$8,34 \times 10^{-5}$	$5,40 \times 10^{-4}$	35.715,3

Tabela 8.2. Valores para cálculo do módulo de elasticidade no ensaio à compressão. Grupo G2.

Amostra	σ_{rup} (MPa)	$\sigma_{10\%}$ (MPa)	$\sigma_{50\%}$ (MPa)	$\epsilon_{10\%}$	$\epsilon_{50\%}$	E _{co} (MPa)
CSG2-01	45,86	4,59	22,93	$2,31 \times 10^{-4}$	$1,31 \times 10^{-3}$	16.967,1
CSG2-02	42,86	4,29	21,43	$1,63 \times 10^{-4}$	$7,28 \times 10^{-4}$	30.348,3
CSG2-03	47,35	4,73	23,67	$1,96 \times 10^{-4}$	$1,25 \times 10^{-3}$	17.952,1
CSG2-04	44,80	4,48	22,40	$8,51 \times 10^{-5}$	$6,15 \times 10^{-4}$	33807
CSG2-05	42,13	4,21	21,07	$2,08 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^{-3}$	17.130,7
CSG2-06	47,56	4,76	23,78	$2,58 \times 10^{-4}$	$1,38 \times 10^{-3}$	16.918,4

Tabela 8.3. Valores para cálculo do módulo de elasticidade no ensaio à compressão. Grupo G3.

Amostra	σ_{rup} (MPa)	$\sigma_{10\%}$ (MPa)	$\sigma_{50\%}$ (MPa)	$\epsilon_{10\%}$	$\epsilon_{50\%}$	Eco (MPa)
CSG3-01	33,82	3,38	16,91	$2,79 \times 10^{-4}$	$1,45 \times 10^{-3}$	11.566,4
CSG3-02	45,48	4,55	22,74	$4,60 \times 10^{-4}$	$2,16 \times 10^{-3}$	10.712,8
CSG3-03	33,42	3,34	16,71	$2,12 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-3}$	13.376,0
CSG3-04	43,61	4,36	21,81	$4,64 \times 10^{-4}$	$2,30 \times 10^{-3}$	9.478,2
CSG3-05	37,11	3,71	18,56	$2,78 \times 10^{-4}$	$1,53 \times 10^{-3}$	11.829,8
CSG3-06	35,78	3,58	17,89	$3,89 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-3}$	8.891,7
CSG3-07	40,53	4,05	20,26	$3,02 \times 10^{-4}$	$1,71 \times 10^{-3}$	11.472,4

Tabela 8.4. Valores para cálculo do módulo de elasticidade no ensaio à flexão. Grupo G1.

Amostra	F _{máxima} (N)	F _{10%} (N)	F _{50%} (N)	v _{10%} (m)	v _{50%} (m)	b (cm)	h (cm)	E _{M0} (MPa)
FSG1-01	5.807,0	580,7	2.903,5	$1,6 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$	4,99	5,02	17.003,3
FSG1-02	6.179,7	618,0	3.089,9	$1,7 \times 10^{-3}$	$8,7 \times 10^{-3}$	4,97	5,00	16.438,7
FSG1-03	4.658,0	465,8	2.329,0	$1,6 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-3}$	4,99	5,00	12.355,6
FSG1-04	5.744,9	574,5	2.872,5	$1,9 \times 10^{-3}$	$9,0 \times 10^{-3}$	4,95	4,98	15.263,8
FSG1-05	5.807,0	580,7	2.903,5	$1,6 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-3}$	5,01	4,90	17.952,1
FSG1-06	4.803,0	480,3	2.401,5	$1,4 \times 10^{-3}$	$7,3 \times 10^{-3}$	4,98	5,01	15.025,8

Tabela 8.5. Valores para cálculo do módulo de elasticidade no ensaio à flexão. Grupo G2.

Amostra	F _{máxima} (N)	F _{10%} (N)	F _{50%} (N)	v _{10%} (m)	v _{50%} (m)	b (cm)	h (cm)	E _{M0} (MPa)
FSG2-01	6.490,2	649,0	3.245,1	1,9x10 ⁻³	9,5x10 ⁻³	5,01	4,98	16.012,3
FSG2-02	5.840,4	584,0	2.920,2	1,8x10 ⁻³	8,7x10 ⁻³	4,98	5,01	15.599,9
FSG2-03	6.593,7	659,4	3.296,9	1,9x10 ⁻³	9,6x10 ⁻³	4,99	4,97	16.307,5
FSG2-04	6.562,7	656,3	3.281,4	2,1x10 ⁻³	1,0x10 ⁻²	4,98	4,97	15.179,4
FSG2-05	6.179,7	618,0	3.089,9	1,9x10 ⁻³	9,3x10 ⁻³	4,99	4,99	15.511,1
FSG2-06	5.310,2	531,0	2.655,1	1,7x10 ⁻³	8,6x10 ⁻³	4,95	4,95	14.986,0

Tabela 8.6. Valores para cálculo do módulo de elasticidade no ensaio à flexão. Grupo G3.

Amostra	F _{máxima} (N)	F _{10%} (N)	F _{50%} (N)	v _{10%} (m)	v _{50%} (m)	b (cm)	h (cm)	E _{M0} (MPa)
FSG3-01	3.943,8	394,4	1.971,9	2,1x10 ⁻³	1,0x10 ⁻²	4,96	4,96	8.929,2
FSG3-02	5.600,0	560,0	2.800,0	2,5x10 ⁻³	1,4x10 ⁻²	4,98	4,98	8.805,1
FSG3-03	5.051,4	505,1	2.525,7	2,4x10 ⁻³	1,2x10 ⁻²	4,95	4,95	9.856,2
FSG3-04	4.782,3	478,2	2.391,2	2,1x10 ⁻³	1,1x10 ⁻²	5,00	5,00	9.937,4
FSG3-05	4.771,9	477,2	2.386,0	2,1x10 ⁻³	1,0x10 ⁻²	4,99	5,00	10.257,5
FSG3-06	5.393,0	539,3	2.696,5	2,4x10 ⁻³	1,3x10 ⁻²	5,01	5,00	9.351,3

Tabela 8.7. Valores para cálculo do módulo de resistência à flexão para o Grupo G1.

Amostra	M _{máx} (N.m)	We (m ³)	f _M (MPa)
FSG1-01	1.524,34	2,06 x 10 ⁻⁵	72,73
FSG1-02	1.622,17	2,07 x 10 ⁻⁵	78,33
FSG1-03	1.222,73	2,08 x 10 ⁻⁵	58,75
FSG1-04	1.508,03	2,05 x 10 ⁻⁵	73,63
FSG1-05	1.524,34	2,00 x 10 ⁻⁵	76,03
FSG1-06	1.260,79	2,09 x 10 ⁻⁵	60,46

Tabela 8.8. Valores para cálculo do módulo de resistência à flexão para o Grupo G2.

Amostra	M _{máx} (N.m)	We (m ³)	f _M (MPa)
FSG2-01	1.703,68	2,07 x 10 ⁻⁵	82,35
FSG2-02	1.533,11	2,08 x 10 ⁻⁵	73,74
FSG2-03	1.730,85	2,05 x 10 ⁻⁵	84,26
FSG2-04	1.722,71	2,05 x 10 ⁻⁵	84,03
FSG2-05	1.622,17	2,07 x 10 ⁻⁵	78,33
FSG2-06	1.393,93	2,01 x 10 ⁻⁵	69,24

Tabela 8.9. Valores para cálculo do módulo de resistência à flexão para o Grupo G3.

Amostra	M _{máx} (N.m)	W _e (m ³)	f _M (MPa)
FSG3-01	1.035,25	2,04 x 10 ⁻⁵	50,80
FSG3-02	1.470,00	2,06 x 10 ⁻⁵	71,27
FSG3-03	1.326,00	2,06 x 10 ⁻⁵	64,30
FSG3-04	1.255,35	2,09 x 10 ⁻⁵	60,20
FSG3-05	1.252,63	2,08 x 10 ⁻⁵	60,18
FSG3-06	1.415,66	2,09 x 10 ⁻⁵	67,75

Tabela 8.10. Valores para cálculo da umidade e densidade para o Grupo G1.

Amostra	m _i (gramas)	m _s (gramas)	U (%)	V _{sat} (m ³)	ρ _{bas} (kg.m ⁻³)
FSG1-01	32,0834	17,8495	79,74	3,33x10 ⁻⁵	536,22
FSG1-02	32,3215	17,8428	81,15	3,24x10 ⁻⁵	550,53
FSG1-03	28,2194	17,4333	61,87	3,27x10 ⁻⁵	533,22
FSG1-04	28,7180	17,9561	59,93	3,25x10 ⁻⁵	553,21
FSG1-05	29,9466	18,5879	61,11	3,23x10 ⁻⁵	576,14
FSG1-06	30,9371	19,2400	60,78	3,25x10 ⁻⁵	592,12

Tabela 8.11. Valores para cálculo da umidade e densidade para o Grupo G2.

Amostra	m _i (gramas)	m _s (gramas)	U (%)	V _{sat} (m ³)	ρ _{bas} (kg.m ⁻³)
FSG2-01	29,6113	18,7070	58,29	3,21x10 ⁻⁵	583,04
FSG2-02	31,3855	19,1877	63,57	3,22x10 ⁻⁵	595,28
FSG2-03	31,6103	20,1827	56,62	3,24x10 ⁻⁵	622,26
FSG2-04	28,0633	16,9122	65,94	3,24x10 ⁻⁵	521,54
FSG2-05	30,9723	21,1419	46,50	3,18x10 ⁻⁵	664,18
FSG2-06	28,6436	19,1103	49,89	3,19x10 ⁻⁵	598,02

Tabela 8.12. Valores para cálculo da umidade e densidade para o Grupo G3.

Amostra	m _i (gramas)	m _s (gramas)	U (%)	V _{sat} (m ³)	ρ _{bas} (kg.m ⁻³)
FSG3-01	35,1932	23,2714	51,23	3,22x10 ⁻⁵	721,63
FSG3-02	33,7968	22,5565	49,83	3,21x10 ⁻⁵	701,95
FSG3-03	37,9443	25,5338	48,60	3,25x10 ⁻⁵	785,77
FSG3-04	36,2364	25,2658	43,42	3,16x10 ⁻⁵	798,75
FSG3-05	37,9433	25,4006	49,38	3,28x10 ⁻⁵	775,35
FSG3-06	37,6034	25,7247	46,18	3,25x10 ⁻⁵	790,08

Tabela 8.13. Módulos de carregamento aplicado na tora no ensaio fotoelástico.

Grupo G1	F _{0%}	F _{10%}	F _{20%}	F _{30%}	F _{40%}	F _{50%}
FFIN 01	0	30	70	170	300	-
FFIN 02	0	20	50	130	290	-
FFIN 03	10	30	90	180	310	-
FFIN 04	10	30	80	180	320	-
FFIN 05	10	30	90	190	320	-
FFIN 06	20	30	80	170	300	-

Tabela 8.14. Módulos de carregamento aplicado na tora no ensaio fotoelástico.

Grupo G2	F _{0%}	F _{10%}	F _{20%}	F _{30%}	F _{40%}	F _{50%}
FFIM 01	10	20	50	120	260	-
FFIM 02	10	30	100	230	390	-
FFIM 03	20	50	120	240	390	-
FFIM 04	10	20	80	210	380	-
FFIM 05	20	30	110	230	400	-
FFIM 06	10	30	110	240	410	-

Tabela 8.15. Módulos de carregamento aplicado na tora no ensaio fotoelástico.

Grupo G3	F _{0%}	F _{10%}	F _{20%}	F _{30%}	F _{40%}	F _{50%}
FFIV 01	10	20	50	150	290	-
FFIV 02	10	30	70	150	260	-
FFIV 03	20	30	80	170	280	-
FFIV 04	10	20	30	90	230	-
FFIV 05	10	30	80	180	300	-
FFIV 06	20	30	70	140	270	-

Tabela 8.16. Tensão aplicada no MRFT, considerando área de seção de 50 x 75 mm².

Grupo G1	F _{10%} [MPa]	F _{20%} [MPa]	F _{30%} [MPa]	F _{40%} [MPa]
FFIN 01	0,088	0,205	0,499	0,880
FFIN 02	0,059	0,147	0,381	0,851
FFIN 03	0,059	0,235	0,499	0,880
FFIN 04	0,059	0,205	0,499	0,909
FFIN 05	0,029	0,176	0,440	1,291
FFIN 06	0,059	0,235	0,528	0,909
Média	0,059	0,200	0,474	0,953
Desvio Padrão	0,019	0,034	0,054	0,167

Tabela 8.17.Tensão aplicada no MRFT , considerando área de seção de 25 x 25 mm².

Grupo G1	F _{10%}	F _{20%}	F _{30%}	F _{40%}
FFIN 01	0,792	1,848	4,488	7,920
FFIN 02	0,528	1,320	3,432	7,656
FFIN 03	0,528	2,112	4,488	7,920
FFIN 04	0,528	1,848	4,488	8,184
FFIN 05	0,264	1,584	3,960	11,616
FFIN 06	0,528	2,112	4,752	8,184
Média	0,528	1,804	4,268	8,580
Desvio Padrão	0,167	0,309	0,484	1,500

Tabela 8.18.Tensão aplicada no MRFT, considerando área de seção de 50 x 75 mm².

Grupo G2	F _{10%}	F _{20%}	F _{30%}	F _{40%}
FFIM 01	0,03	0,12	0,32	0,73
FFIM 02	0,06	0,26	0,65	1,11
FFIM 03	0,09	0,29	0,65	1,09
FFIM 04	0,03	0,21	0,59	1,09
FFIM 05	0,03	0,26	0,62	1,11
FFIM 06	0,06	0,29	0,67	1,17
Média	0,05	0,24	0,58	1,05
Desvio Padrão	0,02	0,07	0,13	0,16

Tabela 8.19.Tensão aplicada no MRFT, considerando área de seção de 25 x 25 mm².

Grupo G2	F _{10%}	F _{20%}	F _{30%}	F _{40%}
FFIM 01	0,264	1,056	2,904	6,600
FFIM 02	0,528	2,376	5,808	10,032
FFIM 03	0,792	2,640	5,808	9,768
FFIM 04	0,264	1,848	5,280	9,768
FFIM 05	0,264	2,376	5,544	10,032
FFIM 06	0,528	2,640	6,072	10,560
Média	0,440	2,156	5,236	9,460
Desvio Padrão	0,220	0,610	1,170	1,430

Tabela 8.20.Tensão aplicada no MRFT, considerando área de seção de 50 x 75 mm².

Grupo G3	F _{10%}	F _{20%}	F _{30%}	F _{40%}
FFIV 01	0,030	0,120	0,410	0,820
FFIV 02	0,059	0,176	0,411	0,733
FFIV 03	0,029	0,176	0,440	0,763
FFIV 04	0,059	0,059	0,235	0,645
FFIV 05	0,059	0,205	0,499	0,851
FFIV 06	0,029	0,147	0,352	0,733
Média	0,039	0,147	0,391	0,758
Desvio Padrão	0,015	0,052	0,090	0,073

Tabela 8.21. Tensão aplicada no MRFT, considerando área de seção de 25 x 25 mm².

Grupo G3	F _{10%}	F _{20%}	F _{30%}	F _{40%}
FFIV 01	0,264	1,056	3,696	7,392
FFIV 02	0,528	1,584	3,696	6,600
FFIV 03	0,264	1,584	3,960	6,864
FFIV 04	0,264	0,528	2,112	5,808
FFIV 05	0,528	1,848	4,488	7,656
FFIV 06	0,264	1,320	3,168	6,600
Média	0,352	1,320	3,520	6,820
Desvio Padrão	0,136	0,472	0,812	0,656

Tabela 8.22. Tensão de compressão calculada do ensaio fotoelástico de *moiré* de sombra no MRFT.

Grupo G1	F _{10%}		F _{20%}		F _{30%}		F _{40%}	
	N	σ	N	σ	N	σ	N	σ
FFIN 01	14	1,23	14	1,58	16	4,55	16	16,90
FFIN 02	15	1,32	13	1,47	13	3,70	18	19,01
FFIN 03	17	1,50	16	1,81	12	3,41	14	14,78
FFIN 04	12	1,06	13	1,47	10	2,84	10	10,56
FFIN 05	14	1,23	12	1,36	12	3,41	12	12,67
FFIN 06	14	1,23	14	1,58	14	3,98	17	17,95
Média	-	1,261	-	1,546	-	3,649	-	15,312
Desvio Padrão	-	0,144	-	0,155	-	0,580	-	3,255

Tabela 8.23. Tensão de tração calculada do ensaio fotoelástico de *moiré* de sombra no MRFT.

Grupo G1	F _{10%}		F _{20%}		F _{30%}		F _{40%}	
	N	σ	N	σ	N	σ	N	σ
FFIN 01	14	1,23	15	1,70	17	4,83	15	15,84
FFIN 02	15	1,32	13	1,47	13	3,70	18	19,01
FFIN 03	16	1,41	16	1,81	12	3,41	14	14,78
FFIN 04	12	1,06	12	1,36	15	4,26	10	10,56
FFIN 05	13	1,14	12	1,36	12	3,41	12	12,67
FFIN 06	14	1,23	14	1,58	14	3,98	17	17,95
Média	-	1,232	-	1,546	-	3,933	-	15,136
Desvio Padrão	-	0,124	-	0,185	-	0,552	-	3,180

Tabela 8.24. Tensão de compressão calculada do ensaio fotoelástico de *moiré* de sombra no MRFT.

Grupo G2	F _{10%}		F _{20%}		F _{30%}		F _{40%}	
	N	σ	N	σ	N	σ	N	σ
FFIM 01	18	1,19	21	4,93	19	8,21	18	16,16
FFIM 02	14	0,92	15	3,52	15	6,48	17	15,26
FFIM 03	12	0,79	14	3,29	11	4,75	16	14,36
FFIM 04	17	1,12	18	4,22	17	7,34	15	13,46
FFIM 05	14	0,92	17	3,99	18	7,78	19	17,05
FFIM 06	15	0,99	13	3,05	15	6,48	16	14,36
Média	-	0,99	-	3,83	-	6,84	-	15,11
Desvio Padrão	-	0,14	-	0,69	-	1,23	-	1,32

Tabela 8.25. Tensão de compressão calculada do ensaio fotoelástico de *moiré* de sombra no MRFT.

Grupo G2	F _{10%}		F _{20%}		F _{30%}		F _{40%}	
	N	σ	N	σ	N	σ	N	σ
FFIM 01	19	1,25	21	4,93	18	7,78	18	16,16
FFIM 02	14	0,92	15	3,52	15	6,48	18	16,16
FFIM 03	12	0,79	13	3,05	9	3,89	16	14,36
FFIM 04	17	1,12	18	4,22	16	6,91	15	13,46
FFIM 05	14	0,92	16	3,75	16	6,91	17	15,26
FFIM 06	14	0,92	13	3,05	15	6,48	17	15,26
Média	-	0,99	-	3,75	-	6,41	-	15,11
Desvio Padrão	-	0,17	-	0,73	-	1,32	-	1,05

Tabela 8.26. Tensão de compressão calculada do ensaio fotoelástico de *moiré* de sombra no MRFT.

Grupo G3	F _{10%}		F _{20%}		F _{30%}		F _{40%}	
	N	σ	N	σ	N	σ	N	σ
FFIV 01	16	0,77	21	2,46	21	5,54	21	12,20
FFIV 02	16	0,77	10	1,17	14	3,70	17	9,87
FFIV 03	15	0,72	15	1,76	20	5,28	21	12,20
FFIV 04	14	0,67	17	1,99	17	4,49	17	9,87
FFIV 05	17	0,82	14	1,64	11	2,90	12	6,97
FFIV 06	15	0,72	18	2,11	20	5,28	21	12,20
Média	-	0,744	-	1,858	-	4,532	-	10,551
Desvio Padrão	-	0,05	-	0,442	-	1,048	-	2,091

Tabela 8.27. Tensão de compressão calculada do ensaio fotoelástico de *moiré* de sombra no MRFT.

Grupo G3	F _{10%}		F _{20%}		F _{30%}		F _{40%}	
	N	σ	N	σ	N	σ	N	σ
FFIV 01	16	0,77	21	2,22	21	5,04	20	11,62
FFIV 02	16	0,77	9	0,95	14	3,36	16	9,29
FFIV 03	15	0,72	15	1,58	21	5,04	21	12,20
FFIV 04	14	0,67	17	1,80	17	4,08	17	9,87
FFIV 05	17	0,82	14	1,48	11	2,64	12	6,97
FFIV 06	15	0,72	18	1,90	20	4,80	20	11,62
Média	-	0,744	-	1,654	-	4,160	-	10,261
Desvio Padrão	-	0,05	-	0,431	-	0,991	-	1,967