

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE
MADEIRAS DE *Pinus caribaea* VAR. *hondurensis* E DE *Eucalyptus grandis***

PATRÍCIA GOMES RIBEIRO

ORIENTADOR: PROF. DR. JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: EFL M – 119/2009

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2009

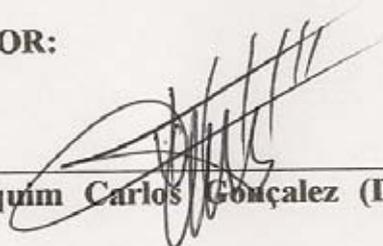
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA
CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRAS DE *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* E DE
*Eucalyptus grandis***

PATRÍCIA GOMES RIBEIRO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

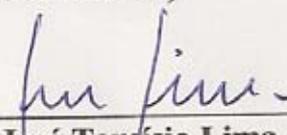
APROVADA POR:



**Prof. Dr. Joaquim Carlos González (Departamento de Engenharia Florestal,
UnB);
(Orientador)**



**Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa (Departamento de Engenharia Florestal
/UnB);
(Examinador interno)**



**Prof. Dr. José Tarcísio Lima (Universidade Federal de Lavras);
(Examinador externo)**

**Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale (Departamento de Engenharia Florestal /UnB);
(Examinador suplente)**

Brasília, 20 de fevereiro de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, PATRÍCIA GOMES

Utilização de Técnicas Não Destrutivas para Caracterização de Madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis*.

xvi, 114 p., 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Análise de Imagem

2. Colorimetria

3. Infravermelho Próximo

4. Ultrassom

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, P. G. (2009). Utilização de Técnicas Não Destrutivas para Caracterização de Madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal. Publicação: EFL M – 119/2009. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Patrícia Gomes Ribeiro.

TÍTULO: Utilização de Técnicas Não Destrutivas para Caracterização de Madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis*.

GRAU: Mestre ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Patrícia Gomes Ribeiro
QR 414 Conjunto 15 Casa 11 – Samambaia Norte
72.320-221 Brasília – DF – Brasil.

A **Deus**, pela minha existência, pelo privilégio de encontrar tantos amigos (anjos) nesta jornada que me ajudaram a superar tantos obstáculos.

Aos **meus pais** pelos esforços despendidos para que eu tivesse uma formação escolar completa e pela vida que me proporcionaram...

Ofereço

*"Plante árvores.
Elas nos dão dois dos mais cruciais elementos para nossa sobrevivência: oxigênio e livros."
(A. Whitney Brown)*

Ao **Rubens**, por tudo o que faz por mim, por estar ao meu lado em todos os momentos em que mais precisei, por compartilhar vitórias e frustrações, por me fazer feliz e por me ajudar a realizar muitos sonhos...

Dedico

Agradeço...

Grande é minha lista de agradecimentos (o que me torna uma pessoa de sorte).

Considero que a elaboração de uma dissertação é um produto coletivo embora sua redação, responsabilidade e *stress* seja predominantemente individual. Várias pessoas contribuíram para que este trabalho chegasse a bom termo. A todas elas registro minha gratidão.

Ao meu orientador, Dr. **Joaquim Carlos Gonzalez** pela amizade, incentivo, apoio, confiança e compreensão durante todo o trabalho, principalmente nos momentos difíceis, pelo exemplo como profissional e ser humano, pelos valiosos conhecimentos transferidos sempre com companheirismo e bom humor.

Aos professores, Drs. **Alexandre Florian da Costa e Ailton Teixeira do Vale** pela participação na Banca Examinadora, por todas as críticas, correções e sugestões, pelo carinho e amizade, pelo diálogo franco, incentivo e ensinamentos durante toda a minha jornada acadêmica.

Ao professor, Dr. **José Tarcísio Lima**, pela participação na Banca Examinadora, por sua disponibilidade irrestrita, sua forma exigente, crítica e criativa de argüir as idéias apresentadas, pelas correções e sugestões, que me foram preciosas para a conclusão deste trabalho.

Ao professor e pesquisador **José Arlete Alves de Camargos**, grande Mestre na identificação de madeiras, pela co-orientação e apoio técnico nos ensaios realizados no Laboratório de Anatomia e Morfologia de Madeiras do LPF (SFB).

À professora e pesquisadora, Dra. **Tereza Cristina Monteiro Pastore** pela co-orientação e apoio técnico nos ensaios de Infravermelho Próximo (*Near Infrared – NIRS*) realizados no Laboratório de Química, Adesivos e Borracha Natural do LPF (SFB), e por ter contribuído com valiosas sugestões para o término deste trabalho.

Ao professor e pesquisador do Instituto de Química da UnB (IQ/UnB), Dr. **Florian Pastore Júnior**, pela grande ajuda, parceria, incentivo e colaboração.

Ao professor e pesquisador, Dr. **Jez Willian Batista Braga**, do Instituto de Química da UnB, pela dedicada co-orientação nas análises e interpretações dos espectros *NIRS*, e pela imensurável contribuição para o término deste trabalho.

Ao professor e pesquisador, Dr. **Mário Rabelo de Souza** pela orientação, críticas e correções da dissertação e disponibilização de equipamentos no Laboratório de Engenharia e Física do LPF (SFB).

Ao **João Evangelista Anacleto**, técnico do Laboratório de Engenharia e Física do LPF, pelo trabalho e orientação na execução dos ensaios.

À professora, Dra. **Raquel Gonçalves**, da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pela orientação e disponibilidade para ajudar com os ensaios de ultrassom.

Às professoras, Dra. **Carolyn Elinore Barnes Proença**, curadora do Herbário da Universidade de Brasília (UB/UnB), e Dra. **Dalva Graciano Ribeiro**, coordenadora do Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade de Brasília (UnB), pela disponibilização de equipamentos para captura de imagens.

Ao professor, Dr. **John Du Vall Hay**, pesquisador do Departamento de Ecologia da Universidade de Brasília (ECL/UnB), com o qual aprendi a não ser uma predadora de *Vellozias* sp e a tomar gosto pela pesquisa científica.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Florestal (EFL/UnB) e do Laboratório de Produtos Florestais (LPF/SFB) pela colaboração e companheirismo.

Aos grandes amigos (Engenheiros Florestais) que fiz e tenho **Frederico de Souza, Juliana Martins de Mesquita Matos, Mirian de Almeida Costa, Raquel Santos de Godoi e Ricardo Faustino Teles**, pela jornada compartilhada de estudante.

A todas as pessoas que de uma forma ou outra contribuíram com meu caminhar nessa estrada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – **CAPES** – que me concedeu uma bolsa durante a realização deste mestrado, fato este que muito contribuiu para viabilização da minha dissertação.

Reitero aqui minhas palavras, sendo este um trabalho individual e muitas vezes solitário, de que não se pode empreendê-lo sem a ajuda dos que nos cercam e querem bem.

A todos o meu muito obrigada!

RESUMO

UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRAS DE *Pinus caribaea* VAR *hondurensis* E DE *Eucalyptus grandis*.

O setor florestal brasileiro desempenha papel importante na economia do país, e suas indústrias precisam alcançar a excelência na qualidade dos produtos para conquistar o mercado consumidor. O desenvolvimento de novas tecnologias, bem como o aprimoramento de técnicas já conhecidas é o modo mais eficiente de melhorar a qualidade dos produtos fabricados pela indústria florestal e conseqüentemente utilizar de forma racional o potencial madeireiro que o Brasil disponibiliza. É crescente a necessidade de novas tecnologias relacionadas à caracterização tecnológica da madeira de espécies florestais, atualmente realizada por meio de ensaios destrutivos. A utilização de tecnologias alternativas não destrutivas tem se mostrado eficiente na caracterização e na avaliação da qualidade da madeira. Este trabalho objetiva a utilização de técnicas não destrutivas: análise de imagem, colorimetria, espectroscopia no infravermelho próximo (*Near infrared spectroscopy – NIRS*) e ondas ultrassônicas para caracterizar tecnologicamente as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* Var. *hondurensis*. A pesquisa foi desenvolvida na Universidade de Brasília (UnB), em conjunto com o Laboratório de Produtos Florestais – LPF/SFB, e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP – São Paulo). Os resultados obtidos nesta pesquisa utilizando-se as técnicas de análise de imagem, de colorimetria, de espectroscopia de infravermelho próximo e de ondas ultrassônicas para as madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* podem ser consideradas alternativas para a caracterização das madeiras destes gêneros. A propriedade melhor estimada por todas as técnicas foi a densidade, seguida do módulo de elasticidade (MOE) e pelo módulo de ruptura (MOR). Na análise de imagem a densidade permite a separação das madeiras, e prevê os valores com maior precisão para *Pinus* e *Eucalyptus*, com coeficientes de determinação de 0,96 e 0,59, respectivamente. Na análise colorimétrica a face radial foi a que melhor correlacionou as propriedades mensuradas, com ênfase para a densidade e o MOR. Na análise de ultrassom não foi possível a separação das madeiras, e as propriedades melhores estimadas foram a densidade e o MOE. Na análise por *NIRS*, observou-se que podem ser utilizadas quaisquer das faces (tangencial ou radial), embora a face que melhor representa os resultados seja a face tangencial. A densidade, o MOE e o MOR foram as propriedades que apresentaram resultados mais expressivos para este estudo. As técnicas utilizadas permitiram concluir que as espécies podem ser separadas em grupos de coníferas e folhosas, pelas características distintas, e suas propriedades físicas e mecânicas podem ser preditas com a utilização dessas técnicas.

Palavras-chave: madeira; propriedades tecnológicas, análise de imagem; colorimetria; ultrassom; infravermelho próximo.

ABSTRACT

USE OF NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES FOR CHARACTERIZATION OF *Pinus caribaea* VAR. *hondurensis* AND *Eucalyptus grandis* WOODS

The Brazilian forestry sector plays an important role in the economy of the country and its industries need to achieve excellence in product quality to win the consumer market. The development of new technologies and the improvement of techniques already known is the most efficient way to improve the quality of products manufactured by the forest industry and therefore a rational way of using the potential of timber available in Brazil. It is increasing the need for new technologies related to the characterization of wood, currently determined by destructive testing. The use of alternative non-destructive technology has been effective in characterizing and assessing the quality of wood. This study aims the use of non-destructive techniques: image analysis, colorimetry, near infrared spectroscopy (*NIRS*), ultra-sound to characterize *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* woods. The research was developed at the University of Brasilia (UnB), together with to Forest Products Laboratory - LPF / SFB, and the State University of Campinas (UNICAMP - São Paulo). The results obtained in this study using the techniques of image analysis, the colorimetry of near infrared waves and ultrasonoras to the woods of pine and eucalyptus can be considered alternatives to the characterization of these woods. The property best estimated by all the techniques was the density, the modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR). The analysis of the image density allows the separation of the wood density, and provides more accurate values for *Pinus* and *Eucalyptus*, with coefficients determination of 0.96 and 0.59, respectively. Colorimetric analysis in the radial surface was better correlated to the properties measured, with emphasis on density and MOR. In the analysis of ultrasound it was not possible to separate the wood and the better estimated properties were the density and MOE. In the analysis by *NIRS*, it was observed that it can be used on any surface (tangential or radial), although the face that best represents the results in the tangential. The density, the MOE and MOR were properties that had more significant results for this study. The techniques used permitted to conclude that the species can be separated into groups of conifers and hardwoods, the distinctive characteristics and its physical and mechanical properties can be predicted with the use of these techniques.

Keywords: wood; technological properties, image analysis, colorimetry, ultrasound, near infrared.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 - JUSTIFICATIVA	18
1.2 - OBJETIVOS	18
1.3 - HIPÓTESE	19
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 – PROPRIEDADES DA MADEIRA	20
2.1.1 – <i>Propriedades Físicas</i>	20
2.1.1.1 – <i>Densidade da madeira</i>	20
2.1.1.2 – <i>Retratibilidade da madeira</i>	22
2.1.2 – <i>Propriedades Mecânicas</i>	23
2.2 – QUALIDADE DA MADEIRA	24
2.3 – TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA	25
2.3.1 – <i>Métodos Visuais</i>	26
2.3.1.1 – <i>Análise de imagens</i>	27
2.3.1.2 – <i>Colorimetria</i>	28
2.3.2 – <i>Métodos Físicos</i>	31
2.3.3.1 – <i>Técnicas vibracionais</i>	32
2.3.3.2 – <i>Técnicas acústicas (Ultrassom e ondas acústicas ou de tensão)</i>	33
2.3.3.3 – <i>Técnicas ópticas (Infravermelho Próximo – NIRS)</i>	38
2.3.3 – <i>Método Mecânico</i>	43
2.4 – AS ESPÉCIES DE MADEIRAS	44
2.4.1 – <i>Pinus caribaea Var. Hondurensis</i>	45
2.4.2 – <i>Eucalyptus grandis</i>	46
3 – MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1 – OBTENÇÃO DO MATERIAL LENHOSO	49
3.1.1 – CORPOS-DE-PROVA	49
3.2 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	50
3.2.1 – ENSAIOS CONVENCIONAIS	50
3.2.2 – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (NDT)	50
3.2.2.1 – <i>Análise de imagens</i>	50
3.2.2.2 – <i>Colorimetria</i>	51
3.2.2.3 – <i>Ensaio de ondas ultrassonoras</i>	53
3.2.2.4 – <i>Espectroscopia no infravermelho próximo</i>	54
3.3 – DELINEAMENTO E TESTES ESTATÍSTICOS	56
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	58
4.1.2 – ENSAIOS CONVENCIONAIS	58
4.1.2.1 – <i>Propriedades físicas (densidade básica e retratibilidade)</i>	58
4.1.2.2 – <i>Propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e de ruptura)</i>	59
4.2 – ENSAIOS DESTRUTIVOS X NÃO DESTRUTIVOS	61
4.2.1 – <i>Análise de Imagem</i>	61
4.2.2 – <i>Análise Colorimétrica</i>	65
4.2.2.1 – <i>Parâmetros colorimétricos x Propriedades da madeira</i>	68
4.2.3 – <i>Análise por meio de Ultrassom</i>	75
4.2.4 – <i>Análise no Infravermelho Próximo</i>	80
4.2.3.1 – <i>NIRS x Densidade básica da madeira</i>	85
4.2.3.2 – <i>NIRS x Retratibilidade volumétrica da madeira</i>	88
4.2.3.3 – <i>NIRS x Coeficiente de anisotropia da madeira</i>	91
4.2.3.4 – <i>NIRS x Módulo de elasticidade da madeira</i>	91
4.2.3.5 – <i>NIRS x Módulo de ruptura da madeira</i>	93

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. REGIÕES ESPECTRAIS DO INFRAVERMELHO.	39
TABELA 2.2. DENSIDADE BÁSICA MÉDIA DA MADEIRA (G/CM^3) E COMPRIMENTO MÉDIO DAS FIBRAS (MM) DE DIFERENTES PROCEDÊNCIAS DE <i>P. CARIBAEA</i> VAR. <i>HONDURENSIS</i> , AOS 11 E 13 ANOS, EM AGUDOS, SP.	46
TABELA 4.3. VALORES MÉDIOS PARA A DENSIDADE BÁSICA E RETRATIBILIDADES DAS MADEIRAS DE <i>PINUS</i> E <i>EUCALYPTUS</i>	58
TABELA 4.4. VALORES MÉDIOS, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE (MOE) E RUPTURA (MOR) EM FLEXÃO ESTÁTICA (MPA) DA MADEIRA DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS</i> <i>GRANDIS</i>	60
TABELA 4.5. VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS (L^* , A^* , B^* , C , H^*) DAS MADEIRAS DE <i>PINUS</i> <i>CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> COMPARADOS COM OUTRAS ESPÉCIES REPORTADAS NA LITERATURA.	65
TABELA 4.6. VALORES MÉDIOS, DAS FACES RADIAL E TANGENCIAL, DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS (L^* , A^* , B^* , C , H^*) DA MADEIRA DE <i>PINUS CARIBAEA</i>	66
TABELA 4.7. VALORES MÉDIOS, DAS FACES RADIAL E TANGENCIAL, DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS (L^* , A^* , B^* , C , H^*) DA MADEIRA DE <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i>	67
TABELA 4.8. RESULTADOS DA ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO PARA O AGRUPAMENTO DOS VALORES MÉDIOS PARA AS ESPÉCIES.	70
TABELA 4.9. CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS (L^* , A^* , B^* , C , H^*) E PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i>	75
TABELA 4.10. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSONORAS DAS MADEIRAS DE <i>PINUS</i> E <i>EUCALYPTUS</i> , COMPARADAS COM OUTRAS MADEIRAS REPORTADAS NA LITERATURA.	75
TABELA 4.11. QUADRO DE ANOVA PARA OS DADOS DO MOE ESTÁTICO E DO MOE DINÂMICO.	77

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. RELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE E ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA.	21
FIGURA 2.2 - ESPAÇO COLORIMÉTRICO CIELAB 1976 (STAR COLOR, 2004).	31
FIGURA 2.3. ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO (TAIZ E ZEIGEL, 2002).	40
FIGURA 2.4. ESQUEMA DE UM ESPECTROFOTÔMETRO (NISGOSKI, 2005).	41
FIGURA 2.5. ESPECTRO: GRÁFICO DE ABSORBÂNCIA X COMPRIMENTO DE ONDA GERADO PELO ESPECTROFOTÔMETRO.	41
FIGURA 2.6. ANÁLISE QUÍMICA DE COMPONENTES DA MADEIRA ESTIMADA COM A UTILIZAÇÃO DO <i>NIRS</i> COMPARADO COM ANÁLISES LABORATORIAIS CONVENCIONAIS (KELLEY ET AL., 2004).	41
FIGURA 3.7. ESQUEMA DE CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.	49
FIGURA 3.8. ESTEREOSCÓPIO LEICA COM CÂMERA JVC (3.0 MP).	51
FIGURA 3.9. ESPECTROFOTOCOLORÍMETRO DATACOLOR MICROFLASH 200D.	52
FIGURA 3.10. EQUIPAMENTO DE ULTRASSOM, MARCA PANAMETRICS MODELO EPOCH 4.	53
FIGURA 3.11. POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES PARA ENSAIO DE ULTRASSOM NO EIXO LONGITUDINAL DOS CORPOS-DE-PROVA.	54
FIGURA 3.12. ESPECTROFOTÔMETRO NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO, DA MARCA BRUKER, MODELO TENSOR 37... 55	55
FIGURA 3.13. DISPOSITIVO DE REFLECTÂNCIA DIFUSA, MARCA PIKE, MODELO EASYDIFF.	56
FIGURA 4.14. IMAGEM DE LÂMINAS HISTOLÓGICAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> , CORTE TRANSVERSAL (A); CORTE LONGITUDINAL TANGENCIAL (B) E; CORTE LONGITUDINAL RADIAL (C).	61
FIGURA 4.15. IMAGEM DE LÂMINAS HISTOLÓGICAS DE <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> (CORTE TRANSVERSAL) (A); CORTE LONGITUDINAL TANGENCIAL (B); CORTE LONGITUDINAL RADIAL (C).	61
FIGURA 4.16. IMAGENS DE CUBOS DE MADEIRA DE <i>PINUS</i> E <i>EUCALYPTUS</i> UTILIZADAS NA PREDIÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA SOFTWARE IMAGE-PRO@PLUS 6.0.	62
FIGURA 4.17. ANÁLISE DE REGRESSÃO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ESPAÇOS VAZIOS E A DENSIDADE DAS MADEIRAS DE <i>EUCALYPTUS</i> E <i>PINUS</i>	62
FIGURA 4.18. ANÁLISE DE REGRESSÃO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ESPAÇOS VAZIOS E A DENSIDADE DAS MADEIRAS DE <i>EUCALYPTUS</i> E <i>PINUS</i>	63
FIGURA 4.19. ANÁLISE DE REGRESSÃO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ESPAÇOS VAZIOS E O MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DAS MADEIRAS DE <i>EUCALYPTUS</i> E <i>PINUS</i>	64
FIGURA 4.20. ANÁLISE DE REGRESSÃO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ESPAÇOS VAZIOS E O COEFICIENTE DE ANISOTROPIA DAS MADEIRAS DE <i>EUCALYPTUS</i> E <i>PINUS</i>	64
FIGURA 4.21. ANÁLISE DE REGRESSÃO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ESPAÇOS VAZIOS E A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA (RV) DA MADEIRA DE <i>PINUS</i>	65
FIGURA 4.22 – CURVA ESPECTRAL DAS FACES RADIAL E TANGENCIAL DE <i>PINUS</i>	67

FIGURA 4.23 – CURVA ESPECTRAL DAS FACES RADIAL E TANGENCIAL DE <i>EUCALYPTUS</i>	68
FIGURA 4.24. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA DENSIDADE DAS MADEIRAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> EM FUNÇÃO DA CLARIDADE DA MADEIRA (L^*).	69
FIGURA 4.25. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA DENSIDADE DAS MADEIRAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> EM FUNÇÃO DO PIGMENTO VERMELHO DA MADEIRA (A^*).	71
FIGURA 4.26. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA DENSIDADE DAS MADEIRAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> EM FUNÇÃO DO PIGMENTO AMARELO DA MADEIRA (B^*).	71
FIGURA 4.27. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA DENSIDADE DAS MADEIRAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> EM FUNÇÃO DA SATURAÇÃO OU CROMATICIDADE DA MADEIRA (C).	72
FIGURA 4.28. ANÁLISE DE REGRESSÃO DA DENSIDADE DAS MADEIRAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE TINTA (H^*).	72
FIGURA 4.29. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO COEFICIENTE DE ANISOTROPIA DAS MADEIRAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> EM FUNÇÃO DA CLARIDADE DA MADEIRA (L^*).	73
FIGURA 4.30. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO COEFICIENTE DE ANISOTROPIA DAS MADEIRAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> EM FUNÇÃO DO PIGMENTO AMARELO (B^*).	73
FIGURA 4.31. ANÁLISE DE REGRESSÃO DO MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DAS MADEIRAS DE <i>PINUS CARIBAEA</i> E <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> EM FUNÇÃO DA CLARIDADE DA MADEIRA (L^*).	74
FIGURA 4.32. DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE DENSIDADE BÁSICA E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSONORAS DA MADEIRA DE <i>PINUS</i>	76
FIGURA 4.33. DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE MOE ESTÁTICO E MOE DINÂMICO.....	77
FIGURA 4.34. RESÍDUOS CONTRA VALORES ESTIMADOS PARA OS DADOS DO MOE OBTIDO COM O EQUIPAMENTO DE ULTRASSOM.	78
FIGURA 4.35. DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE MOE ESTÁTICO E MOE DINÂMICO PARA A MADEIRA DE <i>PINUS</i>	78
FIGURA 4.36. DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE MOE ESTÁTICO E MOE DINÂMICO PARA <i>EUCALYPTUS</i>	79
FIGURA 4.37. DIAGRAMA DE DISPERSÃO E RETA DE REGRESSÃO ENTRE MOE ESTÁTICO E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO ULTRASSÔNICA (V_{LL}) PARA A MADEIRA DE <i>EUCALYPTUS</i>	80
FIGURA 4.38. ESPECTROS DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO DAS MADEIRAS DE <i>EUCALYPTUS</i> E <i>PINUS</i>	81
FIGURA 4.39. ESPECTROS <i>NIRS</i> DA MADEIRA DE <i>PINUS</i>	82
FIGURA 4.40. ESPECTROS <i>NIRS</i> DA MADEIRA DE <i>EUCALYPTUS</i>	82
FIGURA 4.41. CALIBRAÇÃO PARA SEPARAÇÃO EM GRUPOS DAS MADEIRAS DE <i>PINUS</i> E <i>EUCALYPTUS</i> , FACE RADIAL.	83
FIGURA 4.42. VALIDAÇÃO CRUZADA PARA SEPARAÇÃO EM GRUPOS DAS MADEIRAS DE <i>PINUS</i> E <i>EUCALYPTUS</i> , FACE RADIAL.	83
FIGURA 4.43 CALIBRAÇÃO PARA SEPARAÇÃO EM GRUPOS DAS MADEIRAS DE <i>PINUS</i> E <i>EUCALYPTUS</i> , FACES RADIAL, TANGENCIAL E TRANSVERSAL.....	84

FIGURA 4.44. VALIDAÇÃO CRUZADA PARA SEPARAÇÃO EM GRUPOS DAS MADEIRAS DE <i>PINUS</i> E <i>EUCALYPTUS</i> , FACES RADIAL, TANGENCIAL E TRANSVERSAL.....	84
FIGURA 4.45. CALIBRAÇÃO PARA A DENSIDADE BÁSICA DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	85
FIGURA 4.46. VALIDAÇÃO CRUZADA PARA A DENSIDADE BÁSICA DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	86
FIGURA 4.47. CALIBRAÇÃO PARA A DENSIDADE BÁSICA DE <i>PINUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	86
FIGURA 4.48. VALIDAÇÃO CRUZADA PARA A DENSIDADE BÁSICA DE <i>PINUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	87
FIGURA 4.49. CALIBRAÇÃO PARA A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	88
FIGURA 4.50. VALIDAÇÃO CRUZADA PARA A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	89
FIGURA 4.51. CALIBRAÇÃO PARA A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE RADIAL.....	89
FIGURA 4.52. VALIDAÇÃO CRUZADA PARA A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE RADIAL.....	89
FIGURA 4.53. CALIBRAÇÃO PARA A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA DE <i>PINUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	90
FIGURA 4.54. VALIDAÇÃO CRUZADA PARA A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA DE <i>PINUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	90
FIGURA 4.55. CALIBRAÇÃO DO MOE DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	92
FIGURA 4.56. VALIDAÇÃO EM AMOSTRAS EXTERNAS DO MOE DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	92
FIGURA 4.57. CALIBRAÇÃO DO MOE DE <i>PINUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	93
FIGURA 4.58. VALIDAÇÃO DO MOE DE <i>PINUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	93
FIGURA 4.59. CALIBRAÇÃO DO MOR DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	94
FIGURA 4.60. CALIBRAÇÃO DO MOR DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TRANSVERSAL.....	94
FIGURA 4.61. VALIDAÇÃO EM AMOSTRAS EXTERNAS DO MOR DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE TRANSVERSAL.....	95
FIGURA 4.62. CALIBRAÇÃO DO MOR DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE RADIAL.....	95
FIGURA 4.63. VALIDAÇÃO EM AMOSTRAS EXTERNAS DO MOR DE <i>EUCALYPTUS</i> , FACE RADIAL.....	95
FIGURA 4.64. CALIBRAÇÃO DO MOR DE <i>PINUS</i> , FACE TANGENCIAL.....	96
FIGURA 4.65. CALIBRAÇÃO DO MOR DE <i>PINUS</i> , FACE RADIAL.....	96
FIGURA 4.66. CALIBRAÇÃO DO MOR DE <i>PINUS</i> , FACE TRANSVERSAL.....	97
FIGURA 4.67. VALIDAÇÃO CRUZADA DO MOR DE <i>PINUS</i> , FACE TRANSVERSAL.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E NOMENCLATURA

Centímetro	cm
Centímetro ao quadrado	cm ²
Centímetro cúbico	cm ³
Coefficiente de determinação	R ²
Comprimento de onda	λ
Constante dinâmica na direção longitudinal (paralela às fibras)	C _{LL}
Densidade	ρ
Densidade básica	D _b
Diâmetro a altura do peito	DAP
Gramas	g
Graus Ceulsius	° C
Hectare	ha
Massa seca	M _S
<i>Medium-density fiberboard</i>	MDF
Megahertz	MHz
Megapascal	MPa
Metro	m
Metro ao quadrado	m ²
Metro cúbico	m ³
Micrometro	μm
Milímetro	mm
Módulo de elasticidade	MOE
Módulo de elasticidade dinâmica	MOE _D
Módulo de ruptura	MOR
Nanômetro	nm
Pascal	Pa
Relação tangencial/radial	T/R
Variação	Var.
Velocidade de propagação da onda no material na direção longitudinal	V _{LL}
Volume saturado	V _S

1 – INTRODUÇÃO

Quanto mais desenvolvido um país e quanto maior for a tecnologia disponível, mais intensa é a utilização da madeira. A madeira deixou de ser apenas um tecido vegetal para ser também um recurso energético (lenha e carvão), matéria-prima da construção civil (tábua, vigas, ripas, parede, piso, telhado) e móvel em geral.

A atividade de base florestal divide-se em vários segmentos, como: celulose e papel, siderurgia a carvão vegetal, móveis e madeira processada mecanicamente, que engloba a produção de madeira serrada, painéis reconstituídos, compensados e laminados e produtos de maior valor agregado.

Dada a diversidade das espécies produtoras de madeira, este material apresenta grande variação nas suas características (físicas, mecânicas, cor, grã, resistência ao apodrecimento, odor) que determinam os usos da madeira para finalidades específicas, tornando-a uma matéria-prima de múltiplas utilizações.

No mercado o uso a ser dado à tora de madeira e em que produtos esta deve ser transformada (madeira serrada, laminados, dormentes, postes, moirões, estacas, aglomerados, celulose, carvão, lenha, dentre outros) é definido pela demanda e a oferta. Essa multiplicidade de produtos permite à empresa florestal uma maior flexibilidade quanto à comercialização de produtos que tem diferentes valores de mercado, apresentando, também, variações em relação à demanda, ao longo dos anos.

Muitas tem sido a iniciativa das indústrias e organizações para alcançar a excelência na qualidade dos produtos visando à conquista do mercado consumidor. A busca por mecanismos que gerem competitividade entre as empresas é cada vez maior e a corrida por tecnologias inovadoras para alcançar a eficiência tem sido permanente. O desenvolvimento de novas tecnologias, bem como o aprimoramento de técnicas já conhecidas é o modo mais eficiente de melhorar a qualidade dos produtos fabricados pela indústria florestal e conseqüentemente utilizar de forma racional o potencial madeireiro que o Brasil disponibiliza.

Para melhorar a qualidade dos produtos é necessário o conhecimento prévio das propriedades da madeira a ser utilizada. Para isso, as grandes empresas de base florestal e os centros de pesquisas dispõem de laboratórios, onde são realizadas análises convencionais e, em geral, com um número restrito de amostras, uma vez que são demoradas e com um custo considerável, desde a coleta das amostras, em geral de forma destrutiva, até a obtenção dos resultados finais.

O conhecimento mais preciso da matéria-prima pode maximizar seu potencial de uso e minimizar os problemas do processo produtivo. O desenvolvimento de metodologia eficiente, rápida e “não destrutiva” contribui para alcançar esses objetivos.

Dentro desse contexto, as técnicas não destrutivas são ferramentas utilizadas na caracterização da madeira e na avaliação da durabilidade, apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais para caracterização da madeira, pois é possível avaliar uma peça sem ter de extrair dela corpos-de-prova, um grande volume de material pode ser analisado com maior rapidez e precisão, e se torna versátil para se enquadrar numa rotina de linha de produção. Dentre estas técnicas enquadram-se à avaliação visual (colorimetria), testes químicos (infravermelho próximo), técnicas de emissão acústica, vibração (ondas de tensão), emissão ultrassônica, raios-x, dentre outras.

1.1 - JUSTIFICATIVA

O estudo de técnicas não destrutivas para a caracterização de madeiras poderá permitir um melhor conhecimento científico das mesmas, podendo ser empregado a nível industrial, no segmento madeira e produtos derivados, agregando valores, melhorando a qualidade e a eficiência dos produtos fabricados.

1.2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral caracterizar as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* utilizando-se de técnicas não destrutivas: análise de imagem, colorimetria, espectroscopia no infravermelho próximo (*Near infrared spectroscopy*– *NIRS*) e ondas ultrassônicas.

O trabalho tem por objetivos específicos:

- Determinar os principais elementos anatômicos da madeira, caracteres gerais macroscópicos e microscópicos, por meio da técnica de análise de imagem em madeira maciça (cubos) e correlacionar com as propriedades físicas e mecânicas das madeiras;
- Determinar e avaliar os parâmetros colorimétricos claridade (L^*), coordenadas cromáticas (a^* , b^*), saturação da cor (C) e ângulo de tinta (h^*), por meio do sistema CIELAB, 1976. Estimar as suas correlações com propriedades da madeira, como a densidade, retratibilidade e flexão estática (módulo de elasticidade – MOE e de ruptura – MOR);
- Determinar as constantes elásticas das madeiras (C_{LL} ou C_{11}), comparando o módulo de elasticidade estático (MOE) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_D) da madeira, e;
- Obter espectros de infravermelho próximo (*NIRS*) que possam desenvolver curvas de calibração e por sua vez um padrão para as madeiras em estudo, estimando as principais propriedades físicas e mecânicas.

1.3 - HIPÓTESE

Técnicas não destrutivas como a análise de imagem, a colorimetria (sistema CIELAB), o infravermelho próximo (*NIRS*) e o ultrassom são alternativas para a caracterização tecnológica de madeiras.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – PROPRIEDADES DA MADEIRA

À medida que se desenvolvem tecnologias sofisticadas para processamento, a madeira passa a ser proporcionalmente mais solicitada como material indispensável para a construção de estruturas e para a confecção de peças de mobiliário. E com a mesma velocidade de avanço deixa de ser um produto secundário de uso inferior (MADY, 2000).

Araújo (2002) afirma que dentre as propriedades físicas mais importantes da madeira estão a densidade e a retratibilidade (contração e inchamento em função do teor de umidade da madeira), e, entre as propriedades mecânicas estão a resistência a esforços de compressão, flexão, tração, cisalhamento e fendilhamento.

De acordo com Lisboa (1993) a eficiente utilização de um material, está condicionada ao conhecimento de suas propriedades físico-mecânicas tanto no que se refere aos aspectos de segurança, quanto aos de economicidade; um dos exemplos é a dureza, que é uma propriedade importante ligada à trabalhabilidade da madeira e a diversas utilizações finais como móveis e assoalhamentos.

2.1.1 – Propriedades Físicas

2.1.1.1 – Densidade da madeira

Junto com as propriedades anatômicas, as propriedades físicas são de suma importância para se conhecer uma madeira e suas possibilidades enquanto matéria-prima para a produção industrial. Uma das propriedades físicas mais importantes é a densidade aparente que se relaciona com suas propriedades físicas e mecânicas (RAZERA NETO, 2005).

Burger e Richter (1991) relatam que a densidade é a propriedade mais importante da madeira, pois dela dependem estreitamente suas propriedades tecnológicas. A isto se acrescenta o gráfico criado por Mady (2000), Figura 2.1, onde se vê a relação entre a densidade e algumas características da madeira.

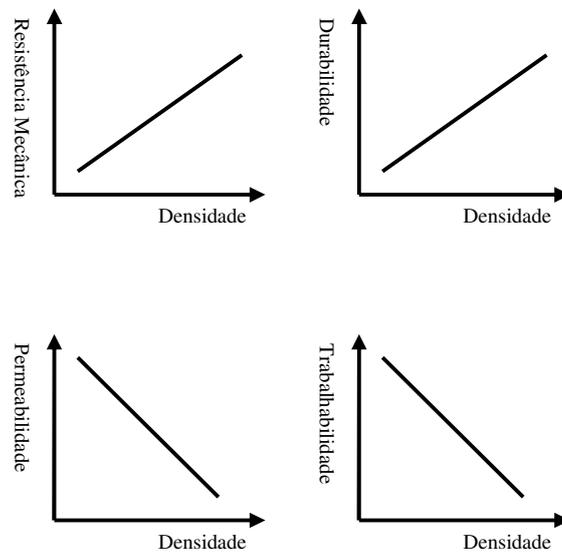


Figura 2.1. Relação entre a densidade e algumas características da madeira.

A densidade da madeira varia entre espécies, entre indivíduos e procedências da mesma espécie e dentro da árvore, tanto no sentido longitudinal, ou seja, da base para o topo, como no sentido radial da medula para a casca (BARRICHELO et al., 1983).

Autores, como Kloot (1976), Busnardo et al. (1983), Teixeira et al. (1993), Nogueira e Vale (1997), Garcia (1998) e Berger (2000) relatam que a densidade da madeira é uma importante propriedade na definição da qualidade da madeira para fins tecnológicos, em decorrência de a mesma estar relacionada às suas características químicas, físicas e anatômicas.

Como afirmam Shimoyama (1990), Muñiz (1993) e Klock (2000) a densidade é resultante das características químicas e anatômicas tais como as dimensões das fibras, o teor de lignina, holocelulose e extrativos, os percentuais de lenho inicial e tardio, e o teor de madeira juvenil e adulta, dentre outros.

A densidade da madeira está intimamente ligada ao seu teor de umidade, portanto, para determinação dessa propriedade física, é necessário também o conhecimento da contração e expansão volumétrica da madeira. Sabe-se também, que a retratibilidade total da madeira aumenta com sua densidade básica (KOLLMAN e CÔTÉ, 1968), sendo importante relacionar essas duas propriedades.

Melo et al. (1990) utiliza três classes para densidade básica:

Madeiras leves ($d \leq 0,50 \text{ g / cm}^3$)

Madeiras médias ($0,51 \text{ g / cm}^3 < d \leq 0,72 \text{ g / cm}^3$)

Madeiras pesadas ($d \geq 0,73 \text{ g / cm}^3$)

A densidade básica da madeira é definida como a relação entre o massa seca da madeira e o seu volume obtido acima do ponto de saturação das fibras.

É dada pela Equação 1:

$$Db = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

Db = densidade básica, em g/cm^3 ;

M_s = massa seca em estufa, em g, ao teor de umidade de 0%;

V_s = volume saturado, em g/cm^3 , ao teor de umidade saturado.

2.1.1.2 – Retratibilidade da madeira

A madeira e vários outros materiais celulósicos, são higroscópicos, apresentam contração quando o seu teor de umidade a partir do ponto de saturação das fibras (PSF) é reduzido até a condição seca ou anidra (OLIVEIRA e SILVA, 2003). A entrada de água entre as microfibras de celulose da parede celular provoca afastamento das mesmas e como consequência ocorre o inchamento. O processo contrário produz a aproximação das microfibras de celulose, resultando na retração da madeira (PANSWIN e ZEEUW, 1970).

A retratibilidade tem valor diferente no comprimento, largura e espessura de uma peça, assim como no material proveniente de uma mesma espécie e de uma mesma árvore. Em média, as folhosas retraem mais do que as coníferas, e em geral, espécies com alta densidade retraem mais do que aquelas de baixa densidade, e espécies com alto teor de extrativos possuem retratibilidade baixa (SIMPSON, 1991).

A retratibilidade ou inchamento da madeira é um dos mais importantes problemas práticos que ocorrem durante a sua utilização, como consequência da mudança do teor de umidade. A

magnitude das variações dimensionais depende de inúmeros fatores, como o teor de umidade, a direção estrutural (radial, tangencial ou longitudinal), a posição dentro da árvore, a densidade da madeira, a temperatura, o grau de estresse de secagem causado pelo gradiente de umidade entre outros (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

Devido à característica anisotrópica, as mudanças dimensionais observadas na madeira são diferentes ao longo das três direções estruturais. A razão entre a retratibilidade tangencial e radial (relação T/R), comumente chamada de coeficiente de anisotropia, geralmente varia de 1,5 a 2,5 e tornou-se um índice muito importante nos estudos de retratibilidade de madeira; quanto maior essa relação, maior será a tendência ao fendilhamento e empenamento. Para usos que envolverem estabilidade dimensional da madeira, a mais recomendada é aquela que apresentar a menor taxa T/R (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

Segundo Siau (1984), a retratibilidade na direção longitudinal para a maioria das madeiras pode ser considerada desprezível (varia entre 0,1 a 0,3%). A retratibilidade na direção tangencial é usualmente o dobro da retratibilidade na direção radial tanto que se pode assumir que dois terços da retratibilidade volumétrica são ocasionados pela retratibilidade tangencial e um terço pela radial.

2.1.2 – Propriedades Mecânicas

Entre as propriedades mecânicas, está a resistência a esforços de compressão, flexão, tração, cisalhamento e fendilhamento. As propriedades mecânicas estão divididas em dois grupos, um de resistência em que estão incluídas as propriedades de compressão paralela e perpendicular à fibra, flexão estática e dinâmica e cisalhamento entre outras. O outro grupo são as propriedades de elasticidade da madeira, neste grupo temos o módulo de elasticidade à flexão estática, que determina a rigidez da madeira (SCANAVACA JÚNIOR, 2001).

Segundo Autran (2006) essas propriedades são determinadas por meio de ensaios de laboratório, realizados seguindo normas que especificam métodos e procedimentos para realização de testes em corpos-de-prova de dimensões estabelecidas. A propriedade de flexão estática fornece importantes informações de resistência da madeira, pois envolve ao mesmo tempo o comportamento da madeira a compressão, tração e cisalhamento.

O módulo de elasticidade (MOE) é obtido com a aplicação de uma carga com velocidade constante, sendo seu valor o limite em que a madeira volta ao seu estado normal quando a carga é retirada, sem que haja qualquer deformação permanente. O módulo de ruptura é o valor a partir do ponto em que, após ser submetida a um valor extremo de carga, a madeira deforma e não volta ao seu estado original (FPL, 1999).

MATOS (1997), citando vários autores, reiterou que a resistência de uma peça de madeira submetida à flexão é expressa em termos de esforços por unidade de área, através do módulo de ruptura (MOR), representando o máximo esforço que é aplicado sobre as fibras nos extremos superior e inferior da seção transversal da peça. Os valores do módulo de ruptura são utilizados para a obtenção de tensões admissíveis para diversas formas de utilização da madeira.

2.2 – QUALIDADE DA MADEIRA

Diversos autores definiram “qualidade da madeira” em estudos anteriores. Entre os mais recentes, Nisgoski (2005) define a expressão como sendo a adequação da madeira com base nos atributos, conjunto de características, que a fazem valiosa para um determinado uso final. Assim dependendo da utilização da madeira, diversas características podem ser levadas em consideração para a determinação de sua qualidade.

Segundo Moura (2000) a qualidade de uma madeira está diretamente relacionada às propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas. Contudo, é importante verificar a variação destas propriedades, por meio de medições. Além disto, é necessário também conhecer variações de forma, de dimensão e os aspectos externos das toras, visando determinar os rendimentos em conversão. A combinação destas propriedades irá definir sua melhor forma de utilização. Para avaliar sua qualidade, é importante definir o uso, identificar os fatores que afetam essa madeira, quantificá-los, além de avaliar seus efeitos na qualidade do material.

2.3 – TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

Segundo Ross et al. (1998) a avaliação não destrutiva é uma técnica de identificação das propriedades de um determinado material, realizada com a utilização de ensaios não destrutivos nos materiais, para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior.

Todo método não destrutivo usa alguma forma de propagação de energia através ou em volta de um material para deduzir algumas características importantes do material examinado. Esta energia pode resultar de cargas estáticas ou dinâmicas ou serem geradas por ondas eletromagnéticas ou elásticas (SCHAD et al., 1996).

De acordo com Shimoyama (2005) os métodos mais usuais utilizam-se de ultrassom, radiografia, análise de vibrações, emissão acústica, entre outros. Na área de pesquisas, as avaliações não destrutivas, utilizando vibrações e ultrassom, são empregadas para a determinação das propriedades físicas e mecânicas de materiais. Para alguns materiais, como os metais, essa técnica tem sido bastante usada, uma vez que pode detectar defeitos e descontinuidade nesses materiais. No caso da madeira, como esses problemas são característicos do material, os ensaios não destrutivos são usados, quase sempre, para verificar como essas ocorrências afetam as suas características físicas e mecânicas.

As primeiras pesquisas relativas à aplicação de ensaios não destrutivos na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos. Ainda que detenham a primazia de conhecimentos nessa área específica, alguns países como Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, também se destacam nesse cenário (JAYNE, 1959). Embora seja grande a variedade de técnicas não destrutivas para avaliação da madeira, algumas delas, citadas por Ross et al. (2004), têm sido objeto de maior investigação e uso por parte dos institutos de pesquisa.

A hipótese fundamental para avaliação não destrutiva de produtos de madeira foi inicialmente proposta por Jayne em 1959, ao verificar que as propriedades de armazenamento e dissipação de energia da madeira, que podem ser medidas de forma não destrutiva, por meio de uma série

de técnicas estáticas e dinâmicas, são controladas pelos mecanismos que determinam as propriedades mecânicas deste material. Estas propriedades, especialmente o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) são relacionados, nesta teoria, com a energia armazenada e com a dissipação de energia, respectivamente (MATOS, 1997). Dessa forma, relações matemáticas entre essas propriedades puderam ser estabelecidas. A medição dos fatores de dissipação sob condições de baixa tensão torna possível a estimativa das propriedades de resistência, que são, normalmente, determinadas pela completa ruptura do material, no caso dos métodos destrutivos (PELLERIN, 1965).

Vários autores (PANTOJA, 2006; SHIMOYAMA, 2005; ROSS et al. 2004; CALIL JÚNIOR e MINÁ, 2003) destacam as vantagens da utilização dos métodos não destrutivos sobre os métodos convencionais, dentre elas a possibilidade de utilização posterior da peça testada; a rapidez de aplicação do método; a confiabilidade dos valores obtidos; redução das perdas de material; classificação de peças em classes de qualidade e resistência; detecção de defeitos internos antes do beneficiamento, além das vantagens financeiras proporcionadas pelo conjunto de vantagens citadas.

A avaliação não destrutiva da madeira por qualquer um dos métodos não é totalmente livre de erros, pois, as equações que regem o comportamento de cada uma destas técnicas consideram o material como sendo homogêneo, isotrópico e contínuo. Entretanto, como se sabe, a madeira apresenta descontinuidade das fibras devido ao processo de desdobro e devido à presença de nós, é um material heterogêneo e anisotrópico (CARREIRA et al., 2006).

2.3.1 – Métodos Visuais

Os métodos visuais são muito utilizados para uma classificação geral, com objetivo de eliminar problemas e defeitos graves da madeira que possam interferir significativamente na estrutura, fornecendo uma perspectiva qualitativa, sendo que as reais condições do material não são detectadas, uma vez que a avaliação fica limitada às faces externas da madeira, não garantindo seu desempenho em uso. Além disso, os parâmetros são bastante subjetivos, o que exige treinamento para realização das avaliações (SHIMOYAMA, 2005).

A inspeção visual busca localizar áreas de atual ou potencial deterioração da estrutura de madeira, identificando facilmente características como fotodeterioração, perda de cor; e presença de defeitos, tais como podridões (manchas, corpos frutíferos) e nós, considerando-se o tamanho, número e localização dos mesmos (SHIMOYAMA, 2005). Ross e Brashaw (2006) afirmam que a presença de fungos, insetos, superfícies com orifícios, depressões, com manchas, descoloração, rachaduras e trincas demonstram o grau de deterioração em que se encontra a estrutura.

2.3.1.1 – *Análise de imagens*

Uma grande variedade de métodos tem sido usada para medir e quantificar diferentes parâmetros na madeira. O uso de sistema de análise de imagens no estudo de caracteres de madeira tem sido propagado, mais precisamente no estudo anatômico (HUBER, 1980; LEE e ROSEN, 1983; TOMAZELLO FILHO, 1983a, 1983b; VETTER e BOTOSSO, 1985; ABRAHÃO et al., 2003; SILVA e TRUGILHO, 2003).

Huber (1980) desenvolveu um sistema de análise de imagens para estudos quantitativos de madeiras, especialmente em áreas próximas à zona cambial, com auxílio de um analisador de imagem. Lee e Rosen (1983) aplicaram o método de microscopia automatizada na determinação de área das paredes e lúmens celulares, empregando o mesmo princípio do sistema de análise de imagem desenvolvido por Ellis et al. (1980). Segundo Vetter e Botosso (1985), o uso deste sistema tem se demonstrado apropriado na análise de forma e dimensões dos objetos lenhosos.

Silva e Trugilho (2003) avaliaram o comportamento dimensional (as reduções nas dimensões lineares, seccional e volumétrica) da madeira do cerne e alborno de *Hymenaea courbaril* L. submetida a diferentes tratamentos térmicos, utilizando um analisador de imagem.

Gonçalez et al. (1996) determinaram com a utilização do sistema de análise de imagens a densidade de quatro espécies da floresta amazônica (Fava-amargosa, Jequitibá-rosa, Peroba-d'água e Peroba-mico).

2.3.1.2 – Colorimetria

A primeira tentativa no sentido de se conseguir uma definição quantitativa das cores deve-se a Leonardo da Vinci. Na impossibilidade de aferir a luz, ele improvisou o célebre método das colheres com tinta, para medir a quantidade de cor-pigmento que refletia a luz-colorida. Os resultados foram insatisfatórios, mas a idéia da viabilidade da mensuração das cores estava lançada (PEDROSA, 1989).

O fator decisivo para a criação do sistema de medidas de cores foi a descoberta, por Newton, do comprimento de onda que caracteriza cada matiz, representado em grandeza matemática por milimícrons (PEDROSA, 1989).

Alguns institutos de pesquisa utilizam escalas de cores usadas na classificação de solos (Munsell Soil Color Charts, 1975, citado em IBDF, 1981), onde cada cor possui uma codificação específica. Um modo sofisticado para determinar a cor da madeira é pelo método colorimétrico, onde são medidos valores reflectantes das três cores básicas (vermelho, verde e azul) por meio de um fotômetro com filtro de leitura de reflectância (VAN DER SLOOTEN, 1993).

Janin (1986), citado por Gonzalez (1993), resume a importância da determinação da cor da madeira em três aspectos:

1. Como ciência florestal, numa visão futura - um maior estudo sobre os fatores que influenciam a cor permite conhecer melhor as espécies e sua silvicultura, composição, química, anatomia e morfologia.
2. Do ponto de vista tecnológico - a cor permite uma classificação de madeira para serrar e para laminar.
3. Aspecto econômico - o preço de um m² de lâmina pode variar de 1 a 5 vezes ou mais, dependendo da espécie, do aspecto e da cor da madeira. O alto valor da madeira do carvalho usado em compensado depende de sua cor: quanto mais clara, mais é apreciado.

Burger e Richter (1991) mencionam que a cor e o desenho estão intrinsecamente relacionados com a anatomia da madeira. Fatores como espessura e orientação de fibras, quantidade de parênquima axial, largura de raios, diâmetro, distribuição e frequência de poros e outros,

contribuem sobremaneira para a figura e a cor da madeira. Além desses fatores, destacam também o regime de crescimento da árvore e os tratos silviculturais que provocam o surgimento dos nós, de canais traumáticos e de irregularidade dos anéis de crescimento.

Gonçalez (1993) afirma que vários fatores podem influenciar na cor da madeira, tais como: composição química, anatomia, método de derrubada, posição da amostra na árvore, espécie, altura e diâmetro da árvore, qualquer fator relativo ao meio ambiente e idade da árvore, além dos fatores genéticos.

Quando se trata da cor da madeira, a figura e a textura exercem grande influência na definição das cores. Isso pode ser avaliado quando são considerados os elementos anatômicos e os extrativos da madeira como componentes importantes na formação da cor (CAMARGOS, 1999).

Segundo Mady (2000), a cor da madeira deriva da composição química das substâncias presentes no xilema: taninos, fenóis, flavonóides, estilbenos, quinonas e outros. Essas substâncias é que conferem cores diferenciadas ao lenho. A cor, entretanto, não é estável em uma madeira, uma vez que ela tende a alterar-se com o passar do tempo, escurecendo devido à oxidação causada principalmente pela luz, que reage com os componentes químicos tais como, a lignina.

Pastore et al. (2008) e Silva et al. (2007) afirmam que as cores das madeiras sofrem com a ação do intemperismo sejam pela lixiviação ocasionada pela chuva ou ainda pela incidência da luz. A fotodegradação e a lixiviação por água são processos que podem ser analisados com técnicas não destrutivas como a colorimetria (Sistema CIE Lab) e espectroscopia de infravermelho.

Camargos (1999) afirma ser a cor relacionada com os três planos de orientação da madeira: transversal, longitudinal tangencial, longitudinal radial, além das características gerais (textura, grã e figura).

Gonçalez (1993) estudando quatro espécies de madeiras tropicais, concluiu que os cortes transversais das amostras estudadas apresentaram cor mais escura em relação aos cortes longitudinal radial e tangencial. (RIBEIRO et al., 2005)

A cor da madeira está associada à deposição de substâncias corantes nas paredes das células lenhosas, bem como as reações químicas dessas substâncias após a exposição aos elementos atmosféricos e à luz. Varia do quase branco ao negro, e tem importância do ponto de vista decorativo. Para a descrição da cor da madeira, normalmente são utilizadas observações macroscópicas visuais, onde as cores são nomeadas a partir de padrões de cores (RICHTER e BURGER, 1978).

Visando sempre o seu uso final, nos estudos sobre a caracterização tecnológica de madeiras, a determinação da cor, vem se destacando como um fator fundamental para a caracterização da qualidade da madeira, que influirá diretamente no aspecto e, conseqüentemente na sua comercialização. Torna-se importante porque pode trazer um melhor conhecimento da madeira, permite uma triagem objetiva das madeiras com ajuda das coordenadas cromáticas e pode, por exemplo, melhorar o preço da madeira no mercado (GONÇALEZ et al., 2001a).

A tecnologia para determinação quantitativa da cor (colorimetria) vem evoluindo ano a ano, fazendo da propriedade cor um fator chave na qualidade da madeira, podendo ainda ser utilizada, como em estudo descrito por Thompsom (2006), para avaliar propriedades mecânicas (MOR e MOE) de painéis de partículas orientadas de madeira.

Camargos (1999) afirma ser o sistema CIE (Comission International de L'Eclairage ou Comissão Internacional de Iluminantes) um método que define a sensação da cor e baseia-se em três elementos: a claridade ou luminosidade, a tonalidade ou matiz e a saturação ou cromaticidade. Os elementos, representados na Figura 2.2, claridade (L^*), saturação (C) e tonalidade (a^* , b^* ou h^*) definem o sistema conhecido como CIE Lab atualmente utilizado na colorimetria (CIE Lab, 1976).

A claridade ou luminosidade é expressa pela variável (L^*) e assume valor zero para o preto absoluto e 100 para o branco total (CAMARGOS, 1999).

A tonalidade é expressa pelas cores primárias vermelho, verde, amarelo e azul. Os pigmentos vermelhos, verdes, amarelos e azuis são definidos pelas variáveis $+a^*$, $-a^*$, $+b^*$ e $-b^*$, respectivamente. Cada variável vai de zero a 60 (sem unidade de medida). A tonalidade pode

ser dada, também pelo ângulo do círculo, expresso pela variável h^* , conhecida como ângulo de tinta, que é derivada dos valores de a^* e b^* (CAMARGOS, 1999).

A saturação ou cromaticidade é o desvio a partir do ponto correspondente ao cinza no eixo L (luminosidade). Quanto mais distante do eixo, mais saturada será a cor. A saturação seria o raio do círculo de tonalidade, partindo do ponto cinza do eixo de luminosidade até a cor pura espectral localizada na extremidade do círculo. A saturação é expressa pela variável C e varia de zero a 60 (CAMARGOS, 1999).

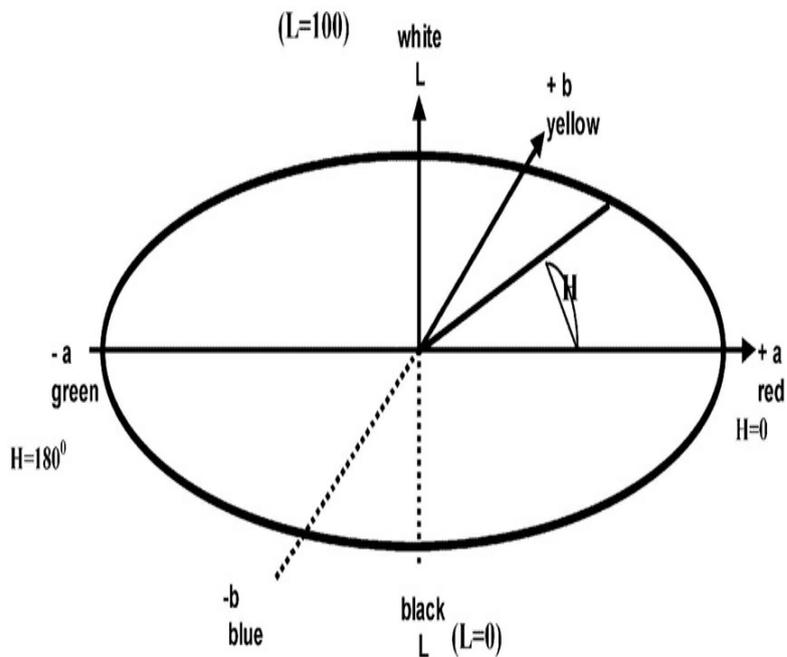


Figura 2.2 - Espaço colorimétrico CIELAB 1976 (STAR COLOR, 2004).

2.3.2 – Métodos Físicos

Shimoyama (2005) afirma que entre os diversos testes físicos de avaliação não destrutiva incluem-se os testes de resistência elétrica, propriedades dielétricas, resistência física (à penetração de materiais), raios-X, propriedades ópticas, vibracionais e acústicas.

2.3.3.1 – Técnicas vibracionais

De acordo com Shimoyama (2005) a teoria da técnica de vibração prediz que todos os materiais possuem uma frequência natural de vibração e um significativo desvio desta vibração teórica natural é um indicador de possível dano ou defeito neste material.

Para a madeira em particular, os trabalhos de Kitazawa (1950) e Bell et al. (1950), citado por Jayne (1959) demonstraram claramente a possibilidade do uso de características vibracionais para a estimativa do módulo de elasticidade estático.

Pellerin (1965) investigou o uso da vibração transversal em vigas de madeira serrada, para determinar o módulo de elasticidade, examinando a vibração transversal livre, em vigas simplesmente apoiadas nas extremidades, e concluiu que a vibração transversal em vigas deste tipo é governada por equação diferencial, que tem solução analítica. A partir do trabalho de Pellerin (1965) muitos outros, usando metodologia semelhante, foram publicados sobre o uso do teste de vibração transversal, para determinação do módulo de elasticidade de várias espécies de madeira.

Alguns trabalhos são teóricos e estudam a vibração transversal através de métodos numéricos (MURPHY, 1997), mas a maioria estuda a aplicação de vibração transversal de maneira experimental, usando diversos tipos de madeira, como: madeira serrada com várias dimensões (ROSS et al., 1994); toras de madeira com pequeno diâmetro (ROSS et al., 2000) e madeira com ou sem defeito (CAI et al., 2000).

Atualmente, o teste de vibração transversal é considerado uma técnica que apresenta valores confiáveis para o módulo de elasticidade e que pode ser usado em qualquer tipo de madeira, com qualquer seção transversal e, também, em madeira laminada colada ou, ainda, em painéis de madeira (MURPHY, 2000). Segundo Calil Júnior e Miná (2003) está sendo considerada pela American Society of Testing and Materials (ASTM) uma proposta para o cálculo da rigidez da madeira na flexão, usando-se um teste de vibração transversal em viga simplesmente apoiada. Esta é uma importante indicação da valorização atual do uso da vibração transversal para determinação do módulo de elasticidade da madeira.

A relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a frequência natural de vibração pode ser expressa pela Equação 2 apresentada por Görlacher (1984):

$$MOE_D = \frac{4\pi^2 \times L^4 \times f^2 \times \rho}{m_n^4 \times i^2} \times \frac{1+i^2}{L^2 \times k_1} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que,

MOE_D: módulo de elasticidade dinâmico;

ρ: densidade, g/cm³;

L: comprimento da peça de madeira biapoiada (cm);

f: frequência natural;

i: momento de inércia;

m_n, k₁: constante de vibração em módulo 1.

2.3.3.2 – Técnicas acústicas (Ultrassom e ondas acústicas ou de tensão)

Avaliações não destrutivas, com uso de emissão de ondas acústicas, tem sido utilizadas para estimar as propriedades da árvore em pé, toras, tábuas e lâminas (SHIMOYAMA, 2005); estimar propriedades de resistência de painéis (MATOS, 1997; MATOS et al., 2000), e avaliação em postes, pontes de madeiras e em outras estruturas, valorizando a aplicação direta no local onde estão montados (ROSS, 1999).

A técnica de ultrassom destaca-se como importante ferramenta com potencial para melhorar a qualidade e a competitividade da madeira. Para isso, faz-se necessária à compreensão do fenômeno de propagação da onda ultrassônica no material, estabelecendo relações entre as diversas variáveis envolvidas (OLIVEIRA, 2001).

Segundo Pelizan (2004) uma onda de choque em um material provoca um movimento de oscilação nas partículas do mesmo sendo essa perturbação transmitida às partículas vizinhas. Caso a frequência de oscilação seja superior a 20 kHz (20.000 ciclos por segundo) e inferior a 100 kHz classifica-se a onda como ultra-sons. A propagação da onda no interior da madeira caracteriza-se por um efeito de atenuação da onda. Quando as vibrações ocorrem no mesmo

sentido da propagação da onda, tem-se ondas longitudinais, se ocorrerem perpendicularmente tem-se as ondas transversais ou cisalhantes.

A aplicação de ondas tensão e, a medição das mesmas, consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A energia armazenada manifesta-se pela velocidade com a qual a onda percorre o material. Em contraste, a taxa sob a qual a onda é atenuada é uma indicação de dissipação de energia (ROSS e PELLERIN, 1985). A qualidade da madeira está diretamente correlacionada com a velocidade e o tempo de propagação da onda. Quanto maior a velocidade, menor o tempo, verifica-se menor presença de discontinuidades e em melhor estado a sua peça de madeira se encontra.

Os fatores que mais influenciam a propagação das ondas ultrassônicas na madeira maciça são: teor de umidade, relação d/λ (onde d é a distância percorrida pela onda, que é equivalente ao comprimento da peça, e λ é o comprimento de onda), frequência da onda e densidade aparente, quando esta última é considerada dentro de uma mesma estrutura anatômica (MORALES, 2006).

Bodig e Jayne (1993) indicaram que a técnica utilizada para correlacionar ensaios destrutivos e não destrutivos, consiste de uma análise de regressão linear, dos módulos de ruptura (MOR) encontrados, e da velocidade de propagação da onda obtida em ensaios não destrutivos.

Diversos trabalhos (GONÇALVES e BARTHOLOMEU, 2000; BARTHOLOMEU, 2001; GONÇALEZ et al., 2001b; BALLARIN e NOGUEIRA, 2005; entre outros) tem demonstrado as relações existentes entre os parâmetros elásticos e mecânicos da madeira (notadamente seu módulo de elasticidade) e a constante dinâmica C_{LL} , obtida a partir da velocidade de propagação da onda de ultrassom, conforme Equação 3:

$$C_{LL} = V_{LL}^2 \times \rho \quad (\text{Eq. 3})$$

em que,

C_{LL} - constante dinâmica na direção longitudinal (paralela às fibras) do material, Pa;

V_{LL} - velocidade de propagação da onda no material na direção longitudinal, $m s^{-1}$, e
 ρ - densidade do material, $kg m^{-3}$.

Sandoz (1989) realizou estudos de classificação de madeiras para construção, utilizando a técnica de ultrassom, obtendo excelentes resultados na caracterização mecânica de vigas com 3 classes de resistência, baseadas em níveis de velocidade de propagação das ondas acústicas.

Calori e Dias (2000) utilizaram equipamento de ultrassom para a determinação da densidade básica da madeira em árvore em pé de *Eucalyptus grandis*, aos 14 anos de idade. Foram obtidas altas correlações da densidade determinada na árvore em pé com a obtida em discos retirados das mesmas árvores, demonstrando que a metodologia pode ser aplicada efetivamente no processo de seleção de árvores em pé para a propriedade densidade básica, reduzindo custos de operações e análises comparados aos métodos convencionais de determinação desta propriedade.

Os estudos realizados por Oliveira et al. (2005; 2006) são baseados na velocidade das ondas ultrassônicas, em função das dimensões e das faces das madeiras de *Pinus caribaea*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus grandis* e *Hymenaea* sp, onde afirmam que a velocidade ultrassônica é sensível às variações das dimensões dos corpos-de-prova, demonstrando que existe uma tendência de diminuição da velocidade longitudinal em função do aumento (relação entre a base e a altura da peça) das dimensões.

Ballarin e Nogueira (2005) determinaram o módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* a partir da constante dinâmica C_{LL} , obtida em ensaios não destrutivos de ultrassom, e os resultados obtidos mostraram boa sensibilidade do método do ultrassom ($R^2 \approx 0,90$) na avaliação desse parâmetro mecânico da madeira juvenil e adulta.

Propriedades físicas e mecânicas (densidade, teor de umidade, compressão paralela às fibras, MOE e MOR) da madeira roliça de *Eucalyptus citriodora* foram estudadas por Pelizan (2004) com uso de ultrassom, que concluiu que a técnica é sensível à geometria das peças, ou seja, as dimensões de um corpo-de-prova influenciam diretamente na velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Segundo Bucur e Böhnke (1994), os fatores que influenciam a propagação de ondas ultrassônicas na madeira são: propriedades físicas do substrato, características geométricas da espécie, condições do meio (temperatura e umidade) e procedimento utilizado para a tomada das medidas.

A geometria do corpo de prova pode ter efeito decisivo na determinação da velocidade ultrassônica e também no modo de propagação da onda sonora. Conforme a onda sonora interage com os contornos do corpo de prova, forças de tração, compressão ou cisalhamento distorcem e interferem na onda, dificultando a precisão das medições do tempo de propagação (BROWN, 1997).

A preparação adequada da amostra é essencial para a determinação de velocidades ultrassônicas. Das três direções principais de propagação, pode-se afirmar que a velocidade na direção longitudinal é a mais afetada pela variação da geometria do corpo de prova (BUCUR, 1995).

As condições para a preparação satisfatória das amostras dependem da magnitude da atenuação da onda ultrassônica na madeira. Um limite mínimo para o tamanho do corpo de prova é necessário, pois a onda ultrassônica deve possuir a característica de onda plana em um meio infinito. O tamanho mínimo deve ser estabelecido experimentalmente, porque não há um bom critério teórico para isso (BUCUR, 1995). Amostras maiores apresentam maior exatidão nos resultados devido ao maior tempo de propagação do sinal ultrassônico na madeira, permitindo maior interação da onda com os constituintes da madeira.

Segundo Bucur (2003), quando uma das dimensões do corpo de prova se aproxima do comprimento de onda, a propagação ocorre por meio de ondas de superfície, as quais são mais complexas e com maior atenuação. As ondas de superfície podem ser divididas em ondas de placa, caracterizadas pelo efeito fronteira, com maior amortecimento devido à mudança da impedância acústica e ondas Rayleigh, nas quais a trajetória da onda é elíptica e paralela à direção de propagação.

A falta de homogeneidade da madeira limita a exatidão das medidas de velocidade de propagação. Se uma amostra apresentar fissuras internas, o pulso ultrassônico será atenuado

por dispersão nas interfaces, mas se a dimensão da descontinuidade for muito menor que o comprimento de onda, a alteração do pulso será pequena, permitindo bons resultados (BEALL, 2002).

De acordo com Berndt et al. (2000), a influência da variabilidade natural das espécies na velocidade e atenuação pode ser analisada pela escolha de uma frequência da fonte na qual o comprimento de onda no material fique aproximadamente entre a dimensão máxima dos elementos anatômicos e a dimensão mínima da amostra.

Puccini et al. (2001) realizaram ensaios variando o comprimento de tábuas de pinho-do-paraná com propagação de ondas de superfície e de compressão. Os resultados indicaram que a velocidade se torna constante quando o comprimento da tábua é maior que 7λ e $2,5\lambda$, respectivamente, para as ondas de superfície e de compressão.

Em estudos realizados por Oliveira et al. (2006) com madeiras de *Pinus caribaea*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora* e *Hymenaea* sp, a velocidade ultrassônica longitudinal mostrou-se sensível à variação da relação entre o comprimento da peça e o comprimento de onda utilizado. Os resultados indicaram que existe um ponto crítico na relação entre comprimento da peça e comprimento de onda (L/λ), a partir do qual a velocidade não é mais afetada, ou seja, para a frequência utilizada, existe um comprimento mínimo da peça, equivalente a alguns comprimentos de onda, para que a velocidade obtida não tenha interferências. Neste estudo, observou-se que é necessário o corpo de prova ser três vezes maior que o comprimento de onda e é necessário adequar a frequência do equipamento com o tamanho do corpo de prova, para que se obtenha a correta velocidade ultrassônica em madeiras.

Gonzalez et al. (2001b) estimaram as constantes elásticas das madeiras de quatro espécies amazônicas (fava-amargosa, jequitibá-rosa, peroba-d'água e peroba-mico) por meio de ondas ultrassônicas. Observou-se, neste estudo, que a velocidade ultrassônica na madeira é maior no sentido longitudinal que no sentido radial, e esta, por sua vez, é maior que no sentido tangencial.

A predição das propriedades da madeira, como MOR e densidade por meio do ultrassom é, segundo Daniels e Clark III (2006), insatisfatória. Sendo a melhor propriedade prevista pelo método o módulo de elasticidade, pois essa propriedade está diretamente relacionada com velocidade de propagação da onda ultrassônica. As constantes dinâmicas obtidas por meio de ensaios com equipamentos de ultrassom indicam a possibilidade de serem estabelecidas correlações com o módulo de elasticidade obtido por meio de ensaio destrutivo (GONÇALVES e SILVA, 2003).

2.3.3.3 – Técnicas ópticas (Infravermelho Próximo – NIRS)

Entre as técnicas ópticas, destacam-se o UVvis (ultravioleta visível), scanner, laser e os espectros de infravermelhos, infravermelho fundamental (IR) e próximo (*NIRS - near infrared spectroscopy*) (SHIMOYAMA, 2005).

A radiação infravermelha foi observada pela primeira vez por Sir Issac Newton que demonstrou que a luz solar pode ser decomposta em diferentes cores através de um prisma. Posteriormente, Herschel (1800) apud Cienfuegos (2003) idealizou um experimento usando um prisma, papelão e termômetros com bulbos pretos para medir as temperaturas das diferentes cores. Herschel observou um aumento da temperatura à medida que movia o termômetro do violeta para o vermelho no espectro criado pela luz do sol atravessando o prisma. Descobriu que a maior temperatura ocorria, de fato, além da luz vermelha e que a radiação que causou esse aquecimento não era visível; denominando esta radiação invisível como “raios caloríficos”, conhecidos atualmente como radiação infravermelha.

A energia luminosa (luz branca) é composta de todas as cores do espectro do arco-íris. Quando a luz incide em um objeto, certas cores são absorvidas e outras refletidas ou transmitidas. A luz refletida pode ser captada pelos olhos. Tomamos como exemplo: a incidência da luz branca em uma folha verde, de uma planta, são absorvidas as cores vermelha e azul e as cores refletidas são interpretadas pelos nossos olhos como verde.

Em 1892 Julius (JULIUS apud PASQUINI 2003) foi o primeiro a demonstrar que a presença do grupo metil em uma molécula origina absorções no infravermelho (IR) diferentes em comparação com a molécula em si, observando também a mesma dependência para diferentes

grupos funcionais. Em 1903 Coblenz (COBLENTZ 1903 apud PASQUINI 2003) tinha pesquisado espectros de centenas de substâncias, orgânicas e inorgânicas e grande parte dos espectros obtidos por este são utilizados atualmente, devido principalmente à forma criteriosa com que ele obteve tais espectros.

Segundo Nisgoski (2005) os primeiros equipamentos comerciais apareceram apenas em meados do século XX, impulsionados pelo seu desenvolvimento durante a Segunda Guerra Mundial, quando a espectroscopia de infravermelho foi utilizada para o controle da concentração e grau de pureza do butadieno utilizado para fabricação de borrachas sintéticas.

O emprego da espectroscopia de reflectância no infravermelho é consagrado desde o início da década de 60, quando Fahrenfort, (1961) realizou um estudo da técnica da reflectância total atenuada e Hart et al. (1962) desenvolveram um método para determinar a umidade em sementes baseada em análise espectrofotométrica no infravermelho próximo. Diversas outras aplicações são descritas por Watson (1977), onde o infravermelho próximo é empregado para a análise de produtos agrícolas.

De acordo com Pasquini (2003), as primeiras contribuições do Brasil para o campo de aplicação analítica do *NIRS* foram às publicações de Nishiyama et al. (1991), e nessa mesma década a aparição no mercado de espectroscópios com Transformada de Fourier, resultou em um incremento da expansão desta técnica, vislumbrando-se o surgimento de um dos mais potentes métodos de análise química de substâncias.

O espectro do infravermelho é dividido em infravermelho próximo, médio e distante, conforme descrito na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Regiões espectrais do infravermelho.

Espectro eletromagnético		Comprimento de onda (nm)
Ultravioleta visível		< 400
Visível		400 a 800
Infravermelho	Próximo	800 a 2.500
	Médio	2.500 a 50.000
	Distante	>50.000

A região espectral do infravermelho próximo compreende radiação com comprimentos de onda no intervalo de aproximadamente 800 a 2500 nm (Figura 2.3). Os métodos quantitativos

no infravermelho diferem dos métodos espectroscópicos no ultravioleta/visível, devido à maior complexidade do sinal espectral, à menor largura das bandas e às limitações instrumentais dos aparelhos de infravermelho (SKOOG et al., 2002).

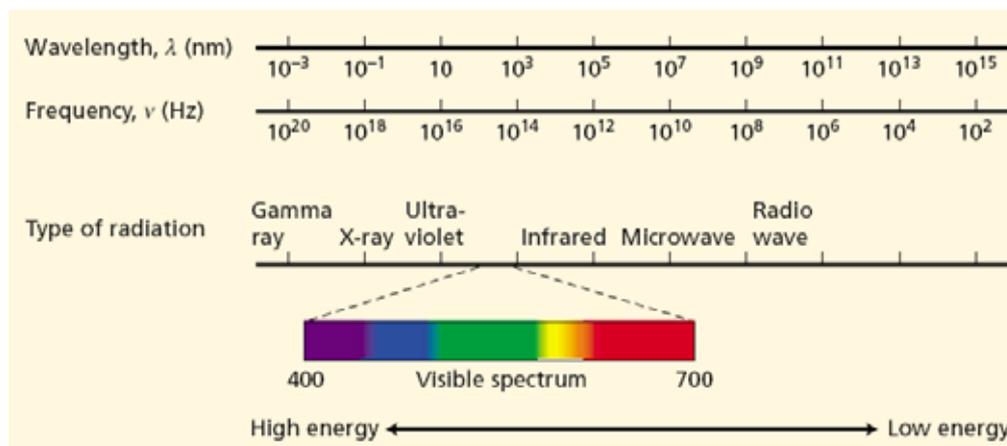


Figura 2.3. Espectro Eletromagnético (TAIZ e ZEIGEL, 2002).

A técnica envolve a aquisição de um espectro de absorvância/reflectância depois que a radiação de infravermelho próximo penetra em uma amostra. A reflectância da luz para cada comprimento de onda é medida com um espectrofotômetro (Figura 2.4) sendo utilizada para o cálculo da absorção. O espectro de absorção obtido (Figura 2.5) dá informação sobre as moléculas ou grupos moleculares envolvidos (SO et al., 2004), como mostra a Figura 2.6, sendo comparado com medidas obtidas usando técnicas analíticas convencionais como a análise multivariada.

O espectro na região infravermelho próximo não é de fácil interpretação, pois contém um alto número de bandas de fortes sobreposições. Entretanto, o mesmo contém informação sobre a molécula toda ou o sistema molecular. A energia absorvida pelo material é correlacionada com a propriedade desejada (NISGOSKI, 2005).

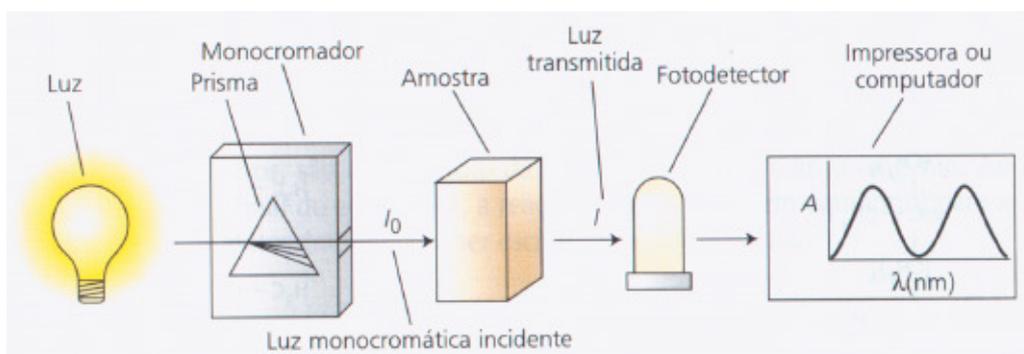


Figura 2.4. Esquema de um espectrofotômetro (NISGOSKI, 2005).

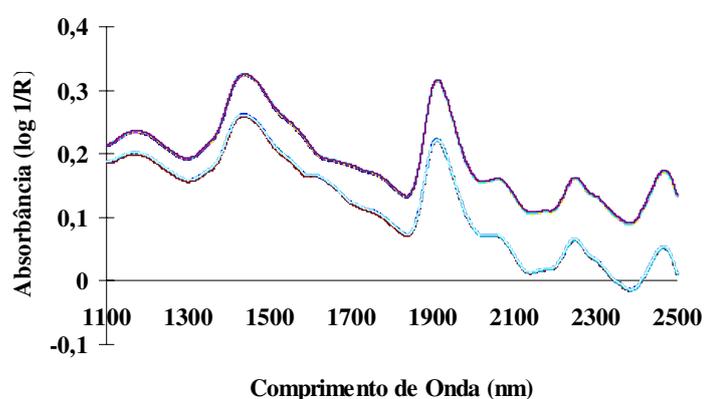


Figura 2.5. Espectro: gráfico de absorvância x comprimento de onda gerado pelo espectrofotômetro.

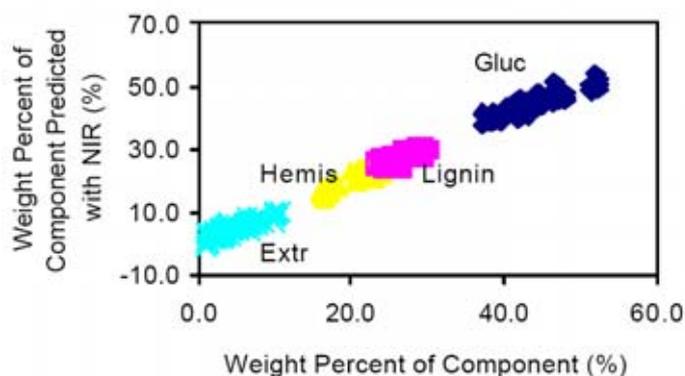


Figura 2.6. Análise química de componentes da madeira estimada com a utilização do *NIRS* comparado com análises laboratoriais convencionais (KELLEY et al., 2004).

Diversos trabalhos tem estimado as propriedades como a densidade, compressão, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, grau de decomposição e avaliação de preservantes utilizados para conservação de madeira (THYGESEN, 1994; HOFFMEYER e PEDERSEN, 1995;

SCHIMLECK et al. 2001a; RIALS et al., 2002; SCHIMLECK et al., 2003; KELLEY et al., 2004; SCHIMLECK et al., 2005;).

No Brasil, a aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo, nos últimos cinco anos, tem sido focada na análise de solos, medicamentos falsificados, controle de qualidade de lubrificantes e combustíveis como o petróleo (PANTOJA, 2006), entre outros. Na área florestal um dos trabalhos pioneiros foi o de Nisgoski (2005) onde são relacionadas informações obtidas pela espectroscopia no infravermelho próximo com características anatômicas da madeira e propriedades do papel de *Pinus taeda*. Nisgoski (2005) em seu estudo concluiu serem os espectros de infravermelho adequados para a predição da densidade da madeira. A espectroscopia no infravermelho próximo oferece um método rápido de análise química que fornece, em segundos, resultados de múltiplas propriedades em amostras não preparadas.

Assim afirma Nisgoski (2005) embora seja um método de análise não destrutiva, eficiente, preciso, rápido, onde seus equipamentos podem ser compactos, portáteis e proporcionam uma análise múltipla de componentes, este método apresenta alguns aspectos que dificultam determinadas análises, tais como:

- Necessidade de uma curva do espectro para associar a cada material a ser analisado e no caso da madeira varia de acordo com a espécie, idade, ritmo de crescimento, tipo de amostra (sólida, serragem, disco, bagueta etc.);
- Qualquer erro de determinação da variável para formação da curva de calibragem é levado para o método;
- Necessidade de ajustes/calibração (associação de espectros) para cada propriedade a ser avaliada;
- Proporciona uma avaliação superficial e pontual na madeira, apenas onde a luz penetra, não detectando defeitos ou variações internas.

Os espectros *NIRS* são submetidos à regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), que é o método mais comum de calibração multivariada para construção de modelos usando sinais de

espectros (GELADI e KOWALSKI, 1986). Para a construção do modelo faz-se necessária a determinação do número ideal de componentes (fatores) principais.

Martens e Tormod (1989) o número de componentes principais utilizados para a calibração influenciam bastante os resultados da modelagem. A calibração com um baixo número de fatores poderá fornecer resultados não satisfatórios, uma vez que toda a informação espectral disponível não é aproveitada. Por outro lado, se muitos componentes principais forem utilizados na calibração, ruídos poderão ser incluídos no processo de modelagem, resultando em problemas na predição. O número ideal de componentes principais é estimado por validação cruzada.

Oliveira (2006) em um estudo sobre análise de misturas diesel-óleos vegetais assim define a validação cruzada “Na validação cruzada de um modelo de calibração, uma amostra, ou mais de uma, são retiradas do conjunto das amostras de calibração. Os modelos de calibração são então elaborados com as amostras remanescentes para diferentes números de componentes principais, com a concentração da amostra que foi retirada determinada em cada modelo. Esse processo é repetido até que todas as amostras tenham suas concentrações determinadas”. A validação cruzada, segundo Braga (2004), é que a previsão de um modelo construído por parte de um conjunto de dados pode ser testada através da previsão do restante do conjunto de dados.

Um novo conjunto de amostras é utilizado para validar um modelo de calibração. Neste caso, as amostras que compõem o grupo de teste são diferentes daquelas usadas na calibração, o que possibilita maior confiança em relação ao nível de exatidão e à estabilidade do modelo com amostras desconhecidas. Os espectros das amostras do grupo de teste devem ser obtidos com os mesmos parâmetros dos obtidos para calibração (OLIVEIRA, 2006).

2.3.3 – Método Mecânico

Trata-se de um método pioneiro e um dos mais populares métodos não destrutivos utilizados para madeira. A avaliação das madeiras está baseada no princípio de correlação entre a resistência, representada pelo módulo de ruptura (MOR) e a elasticidade, obtida em teste de flexão estática, representada pelo módulo de elasticidade (MOE). Neste método, a peça de

madeira é flexionada por poucos instantes em máquina de classificação, o necessário para medir seu valor de rigidez, que permite estimar a resistência à flexão da peça por meio da correlação entre o MOE e o MOR (GORNIAK e MATOS, 2000). O parâmetro não destrutivo mais utilizado tem sido o MOE, algumas vezes associado à densidade aparente (SHIMOYAMA, 2005).

2.4 – AS ESPÉCIES DE MADEIRAS

O ecossistema florestal brasileiro, em 2006, segundo dados da ABIMCI (2007), atingiu 5.743.936 hectares de florestas plantadas, diante disso, Brasil é o sétimo país com maior volume de plantios florestais, representando uma participação de 3% no total mundial (192,1 milhões de ha).

Em 2006 dados refletem que o Brasil chegou aos 5.373.417 hectares com florestas plantadas, sendo 3.549.147 ha de *Eucalyptus* e 1.824.270 ha de *Pinus*. O estado de Minas Gerais é o que apresenta o maior número em área plantada no Brasil (1.235.744 ha), seguidos de São Paulo, Paraná e Santa Catarina (ABIMCI, 2007).

No que se refere à concentração de plantações de *Pinus*, os estados que mais se destacam são: Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Minas Gerais e São Paulo. Juntos, somam cerca de 90% do total plantado (ABIMCI, 2007). Quanto ao plantio de *Eucalyptus*, verifica-se uma maior concentração na região sudeste do país, cerca de 60% do total plantado, justificável pela presença de indústrias de celulose e papel.

De acordo com dados da Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário (ABIMÓVEL, 2004), sob o aspecto do comércio internacional, o mercado de *Eucalyptus* reúne algumas características que o tornam particularmente lucrativo. Diferentemente do mercado internacional de *Pinus* (segmento *softwood*) – *commodity*, cuja comercialização dá-se em grandes volumes, o mercado de *Eucalyptus* (segmento *hardwood*) caracteriza-se por pequenos volumes de produção, alta qualidade e preços mais elevados.

2.4.1 – *Pinus caribaea* Var. *Hondurensis*

De acordo com Shimizu (2005) a espécie *Pinus caribaea* compreende três variedades, de rápido crescimento, produtoras de madeira resinosa para processamento mecânico (*caribaea*, *hondurensis* e *bahamensis*). A variedade *hondurensis* ocorre na América Central, desde a Nicarágua estendendo-se até a parte Leste do México, em locais livres de geada, em altitudes desde o nível do mar até 700 m e, ocasionalmente, até 1.000 m, onde ocorrem precipitações médias anuais de 2.000 mm a 3.000 mm. É a variedade de *Pinus* mais plantada na região tropical brasileira (regiões Amazônica, Centro-Oeste, Central, Leste e Sudeste), abrangendo uma área de aproximadamente 700.000 ha. Os plantios, no Brasil, são restritos às regiões livres de geada.

Amaral et al. (1977), em trabalho realizado com populações de pinheiros tropicais, avaliaram a variação da densidade básica em função da idade e altura da árvore pelos métodos destrutivo e não destrutivo (máximo teor de umidade) concluíram que a estimativa da densidade média da árvore a partir de amostras retiradas ao nível do DAP pode ser feita tanto pelo método destrutivo (utilizando-se secções transversais), como pelo método não destrutivo (utilizando-se amostras Pressler), com o uso de equações lineares simples, verificando ainda uma tendência de a densidade diminuir com a altura da árvore para as espécies *Pinus caribaea* Var. *hondurensis*, *P. elliottii* Var. *densa*, *P. elliottii* Var. *elliottii*, *P. kesiya*, *P. oocarpa* e *P. patula*, embora essa tendência fosse mais pronunciada para o caso do *P. elliottii* Var. *elliottii*.

Do trabalho de Barrichelo e Brito (1979), ao ser estudada a variabilidade radial da madeira de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* aos 16 anos de idade, concluiu-se que a variação radial (sentido medula-casca) da densidade não mostrava um padrão definido quando os lenhos eram analisados isoladamente. Considerando-se ambos os lenhos de cada anel, a densidade aumentava rapidamente nos anéis próximos à medula, permanecendo a seguir mais ou menos constante. Na comparação anel por anel a densidade do lenho tardio se mostrou 30 a 100% maior que a densidade do lenho inicial. Os autores observaram que o comprimento e largura dos traqueídeos, tanto para lenho inicial como para lenho tardio, mostraram um aumento acentuado e praticamente linear até o 52º anel de crescimento, típicos de madeira juvenil. A partir do 7º anel, o aumento do comprimento é menos acentuado, tendendo para um valor mais ou menos constante.

Camargo et al. (1986) estudando as características da madeira de *P. caribaea* Var. *hondurensis* aos 11 e 13 anos de idade, obtiveram os valores de densidade básica média e comprimento médio de fibras para várias procedências, mostradas no Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Densidade básica média da madeira (g/cm^3) e comprimento médio das fibras (mm) de diferentes procedências de *P. caribaea* Var. *hondurensis*, aos 11 e 13 anos, em Agudos, SP.

Espécie	Procedência	Db (g/cm^3)	Comp. Fibra (mm)
<i>P. caribaea</i> Var. <i>hondurensis</i>	Alamicamba, Nicar.	0,396	4,10
	Poptum, Guat.	0,455	4,37
	Guanaja, Hond.	0,428	4,03
	Mt. Pine Ridge, Bel.	0,402	4,31
	Casa Branca, SP	0,401	4,09
Média		0,416	0,418

Em estudo feito por Rezende et al. (1995) analisando as propriedades físicas da madeira de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis*, aos oito anos de idade, por meio de análises dos anéis de crescimento pela técnica de radiação gama, observaram que a densidade a 0% de umidade aumentou consideravelmente com a idade da árvore. O crescimento anual foi de 4,1% mostrando que a árvore no seu oitavo ano tem uma densidade básica de 32,8% superior à observada no seu primeiro ano de vida e que sua retratibilidade volumétrica máxima foi de 10,2%, sendo que, no sentido longitudinal, esta foi aproximadamente nove vezes menor que no sentido tangencial e sete vezes menor do que no sentido radial. Estas relações mostram-se dependentes da densidade básica da madeira, e, portanto, dependentes da idade da árvore e principalmente da posição radial da qual foi extraída a amostra.

2.4.2– *Eucalyptus grandis*

Mangieri e Dimitri (1971) destacam que *Eucalyptus* é o gênero que adquiriu maior importância nos plantios comerciais na América do Sul, dada a sua grande variedade de espécies e boa adaptação em países de clima temperado, tropical e/ou subtropical. Devido às características de rápido crescimento, produtividade, ampla diversidade de espécies, grande capacidade de adaptação e por ter aplicação para diferentes finalidades (MORA e GARCIA, 2000), o *Eucalyptus* tem sido extensivamente plantado no Brasil desde a década de 60. Segundo dados da ABIMCI (2007) o Brasil possui uma área correspondente a mais de três milhões e meio de ha de plantios florestais com *Eucalyptus*.

Rizzini (1981), em seus estudos sobre as espécies brasileiras, não pode deixar de considerar a importância deste gênero, apesar de constituir uma espécie exótica. O autor apresenta uma breve descrição das principais espécies do gênero, destacando *E. paniculata*, *E. globulus*, *E. citriodora*, *E. camaldulensis*, *E. grandis* e *E. saligna*, entre outras.

Eucalyptus grandis é uma espécie que ocorre em clima quente-úmido, com temperatura máxima variando de 24 a 30° C, na região sudeste da Austrália, e de 29 a 32° C, na região nordeste; a mínima variando, respectivamente, de 3 a 8° C e de 10 a 17° C, com uma precipitação de 1.000 a 3.5000 mm (BOLAND et al., 1984).

A espécie *E. grandis* apresenta boas características físico-mecânicas, versatilidade no seu uso, beleza e coloração natural com grande aceitação para utilização refinada em interiores. No entanto, como madeira serrada, apresenta características que podem dificultar o seu processamento, como rachaduras e empenamentos devidos a presença de tensões nas toras, madeira juvenil, retração, colapso, nós, bolsas de resina e variabilidade em suas propriedades (CARVALHO, 2000; MALAN, 1998; PONCE, 1995).

O gênero *Eucalyptus* é qualificado como sendo de difícil desdobro proveniente das tensões de crescimento (WAUGH, 1998). Segundo Jankowsky (1995), é uma madeira de difícil secagem sendo um processo lento com grande probabilidade de aparecimento de defeitos. Lima (2005) afirma que a madeira formada na região da medula apresenta qualidades tecnológicas muito variáveis.

Mori et al. (2005) em estudo realizado com madeiras de clones de *Eucalyptus*, utilizando o sistema de determinação da cor CIE Lab, constatou que existe uma diferença na coloração da madeira dentro da posição longitudinal da árvore, madeiras na região da base (1,30 m) apresentaram cor diferente de uma madeira tomada a 2,80 m da altura total. Ainda segundo estes autores a determinação da cor das madeiras dos clones sofre grande influência da coordenada b* porém, a coordenada a* pode ajudar a diferenciar duas madeiras de cor amarelada muito próximas, naquelas que tem presença do pigmento vermelho. Os parâmetros colorimétricos mostraram que conforme a forma de desdobro da tora pode-se obter madeiras mais amareladas ou peças com influência da coloração vermelha.

Segundo Sella (2001), entre os motivos do crescente interesse para o gênero *Eucalyptus*, na utilização de madeira para processamento mecânico, pode-se destacar: as pressões ambientalistas pela preservação das florestas nativas remanescentes e o desenvolvimento de projetos industriais com a matéria-prima produzida de forma sustentável.

3 – MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na Universidade de Brasília, em conjunto com o Laboratório de Produtos Florestais – LPF/SFB (Serviço Florestal Brasileiro), e a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP – São Paulo).

3.1 – OBTENÇÃO DO MATERIAL LENHOSO

Neste estudo foram utilizadas duas espécies de madeiras: *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*. Para a obtenção dos corpos-de-prova da madeira de *Pinus* foram adquiridas, ao acaso, três pranchas de 4 x 20 x 250 cm, com idade estimada de 21 anos, em uma empresa do segmento de divisórias do Distrito Federal. Para a obtenção dos corpos-de-prova de *Eucalyptus*, foram recebidas duas doações: um torete de 1 m de comprimento x 20 cm de diâmetro de um plantio de 10 anos de idade, localizado em Monte Alto – GO (denominado *Eucalyptus* 1); e um torete de 1, 20 m de comprimento x 30 cm de diâmetro, de um plantio de 15 anos de idade proveniente da área verde do IBAMA – DF (denominado *Eucalyptus* 2). As madeiras foram identificadas no Laboratório de Anatomia da Madeira no LPF para confirmação das espécies.

3.1.1 – Corpos-de-prova

De cada prancha de *Pinus* e *Eucalyptus* foram confeccionados corpos-de-prova (Figura 3.7), ao acaso, com dimensões de 2 x 2 x 45 cm, totalizando 45 corpos-de-prova, que foram utilizados em ensaios por meio de técnicas não destrutivas (colorimetria, ultrassom, espectroscopia e análise de imagem) e convencionais (densidade e flexão estática).

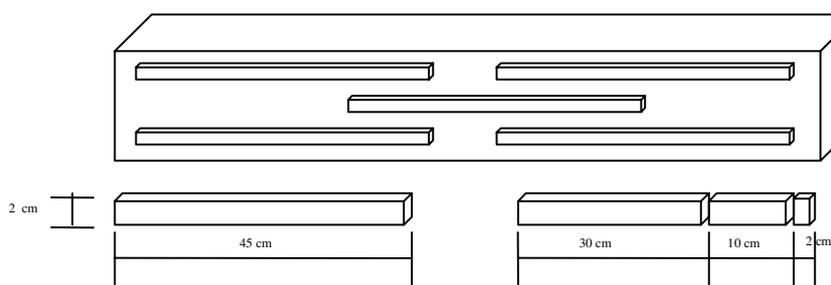


Figura 3.7. Esquema de confecção dos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova foram colocados em câmara de climatização, onde permaneceram por um período de 40 dias, para estabilização do teor de umidade, e posteriormente foram submetidos aos ensaios. O teor de umidade médio das amostras estava em $\pm 12\%$.

3.2 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

3.2.1 – Ensaio Convencionais

Os corpos-de-prova das espécies em estudo foram submetidos a ensaios convencionais de densidade básica e retratibilidade (COPANT 30:1 – 005/461 – 72 e COPANT 30:1 – 005/462 -71) e de flexão estática, norma COPANT 30:1 - 006/72. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia e Física do LPF/SFB.

A análise anatômica das madeiras foi realizada no Laboratório de Anatomia da Madeira no LPF/SFB, para a descrição microscópica foram montadas lâminas permanentes do material em estudo, com as três orientações (transversal, radial e tangencial). Os cortes histológicos foram obtidos em micrótomo de deslize, com espessura nominal de 18 μm . Usou-se coloração com safranina vermelha, e montagem permanente com "Entellan". As imagens microscópicas obtidas, no Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade de Brasília, foram utilizadas para ilustrar as diferenças entre as duas espécies.

3.2.2 – Ensaio Não Destrutivos (NDT)

3.2.2.1 – Análise de imagens

Os ensaios de análise de imagens foram realizados no Herbário da Universidade de Brasília (captura de imagens macroscópicas).

Foram utilizados 12 corpos-de-prova de cada material (*Pinus*, *Eucalyptus* 1 e 2) nas dimensões de 2 x 2 x 2 cm, obtidos dos corpos-de-prova utilizados para os ensaios convencionais de flexão estática. Os corpos-de-prova foram orientados no sentido transversal, radial e tangencial polido em micrótomo de deslize para melhor visibilidade dos elementos anatômicos, observados em lupa.

A descrição anatômica (macroscópica) foi realizada com a utilização de um estereoscópio Leica MZ6 com imagens captadas por câmera digital GC-QX5 HD da JVC (Figura 3.8) e analisadas em software *Image-Pro[®] Plus* version 6.0, com aumento de quatro vezes.

As propriedades físicas e mecânicas dos cubos de madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* foram preditas com base na quantificação dos espaços vazios/área, por meio de imagem utilizando o software *Image-Pro[®] Plus* version 6.0.



Figura 3.8. Estereoscópio Leica com câmera JVC (3.0 MP).

3.2.2.2 – Colorimetria

O ensaio de colorimetria foi realizado no Laboratório de Anatomia da Madeira no Laboratório de Produtos Florestais (LPF/SFB). Para o ensaio de colorimetria foi utilizado um espectrofotocolorímetro (Figura 3.9) Datacolor Microflash 200d acoplado a um microcomputador, com iluminante D65 e ângulo de 10° C, em temperatura ambiente.

Foram utilizados 12 corpos-de-prova de cada material (*Pinus*, *Eucalyptus* 1 e 2), nas dimensões de 2 x 2 x 10 cm, os mesmos corpos-de-prova foram utilizados nos ensaios convencionais de densidade e retratibilidade. Foram realizadas 25 leituras para cada face (radial e tangencial) do corpo de prova, totalizando 50 leituras por corpo de prova.

A metodologia adotada para a determinação dos parâmetros colorimétricos foi o sistema CIELAB 1976, conforme Camargos (1999). Os parâmetros colorimétricos determinados foram L^* (claridade), coordenadas a^* e b^* , C (saturação) e h^* (ângulo de tinta).

A saturação (C) foi determinada pela Equação 4:

$$C = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

C = saturação;

a^* = coordenada cromática sobre o eixo verde-vermelho;

b^* = coordenada cromática sobre o eixo azul-amarelo.

O ângulo de tinta (h^*) foi determinado pela Equação 5:

$$h^* = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que:

h^* = ângulo de tinta.

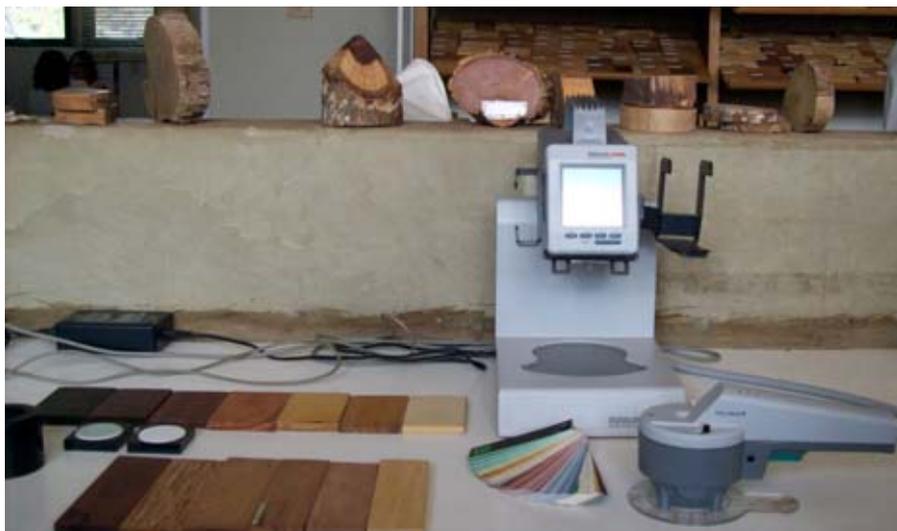


Figura 3.9. Espectrofotocolorímetro Datacolor Microflash 200d.

3.2.2.3 – Ensaios de ondas ultrassonoras

Os ensaios de ultrassom foram realizados na Universidade Estadual de Campinas – SP, utilizando-se 12 corpos-de-prova de cada (*Pinus* e *Eucalyptus* 1 e 2) (totalizando 36 corpos-de-prova) com teor de umidade de 12%. Os corpos-de-prova utilizados para a medição das ondas ultrassonoras (2 x 2 x 30 cm) também foram usados para os ensaios convencionais de flexão estática.

Foi utilizado um equipamento americano da marca Panametrics modelo EPOCH 4 (Figura 3.10) com frequência de 1 MHz. A frequência foi definida em função dos transdutores que acompanham o equipamento. Os transdutores possuem frequências fixas, as quais são compatíveis com as utilizadas na literatura para ensaios em peças de madeira. Os corpos-de-prova tiveram orientação longitudinal e as duas faces planas (transversais), rigorosamente paralelas. A Figura 3.11 ilustra o posicionamento dos transdutores no sentido longitudinal dos corpos-de-prova.



Figura 3.10. Equipamento de ultrassom, marca Panametrics modelo EPOCH 4.

Para cada corpo de prova foram feitas medições do tempo de propagação da onda ultrassônica longitudinal para determinar a velocidade. Para cada transdutor foram realizadas três medições de velocidade em cada corpo de prova, de forma que o desvio padrão considera as três medições.

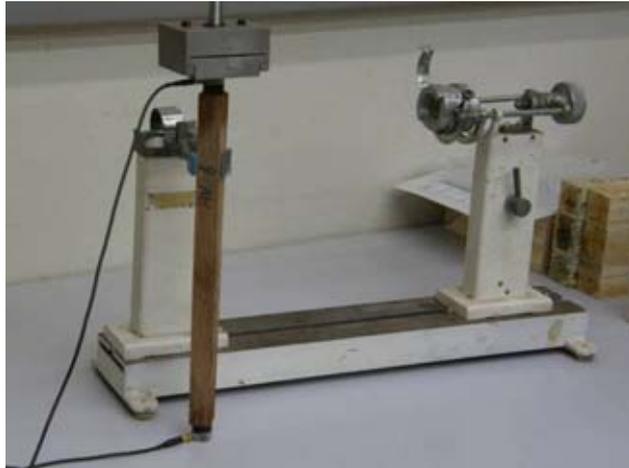


Figura 3.11. Posicionamento dos transdutores para ensaio de ultrassom no eixo longitudinal dos corpos-de-prova.

Com os valores dos tempos de propagação da onda ultrassonora e tendo-se a distância percorrida, foram calculadas as velocidades de propagação da onda. O comprimento de onda (λ) foi calculado em função da frequência do transdutor e da velocidade média percorrida pela onda ultrassonora nos corpos-de-prova com a seção transversal inicial (2 x 2 cm), segundo a Equação 6, e a constante dinâmica C_{LL} conforme Equação 3:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que:

V = velocidade longitudinal (m s^{-1});

f = frequência do transdutor (MHz).

3.2.2.4 – Espectroscopia no infravermelho próximo

O ensaio de espectroscopia no Infravermelho Próximo (*Near infrared spectroscopy – NIRS*) foi realizado no Setor de Química, Adesivos e Borracha Natural do Laboratório de Produtos Florestais (LPF/SFB).

Para o ensaio foram confeccionados três amostras de cada tipo de material, nas dimensões de 2 x 2 x 1 cm, com exposição da face (transversal, radial e tangencial), obtidos a partir dos corpos-de-prova utilizados no ensaio convencional de densidade e reprodutibilidade, totalizando

36 corpos-de-prova para *Pinus* e 72 para *Eucalyptus*. Os corpos-de-prova foram submetidos a acabamento com lixa de papel nº 80, para retirar marcas do instrumento de corte e o brilho da madeira, deixando a superfície áspera, para com isso aumentar a reflectância difusa e diminuir a reflectância especular.

Os espectros de reflectância foram obtidos por meio de um espectrofotômetro no infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIRS), marca Bruker, modelo Tensor 37 (Figura 3.12), com dispositivo de reflectância difusa EasyDiff da marca Pike (Figura 3.13).

A aquisição dos espectros foi realizada em sala climatizada. Uma referência foi usada para calibrar a absorção da luz infravermelha próxima. Este padrão tinha a superfície recoberta por um espelho e foi medido antes do início de cada série de leituras.

Foram tomados 5 espectros por amostra de madeira (em cada face exposta, escolhida para a medição): um em cada extremidade e um no centro do corpo de prova. Para cada amostra foram efetuadas 320 leituras (*scans*), sendo 64 leituras (*scans*) por espectro. Para adquirir um espectro o valor médio das 64 leituras foi comparado à referência.

Os espectros obtidos nos ensaios de *NIRS* foram submetidos à análise multivariada pelo método dos Mínimos Quadrados Parciais (PLS) e submetidos à validação cruzada para a obtenção da curva de calibração e correlação das propriedades físicas e mecânicas.



Figura 3.12. Espectrofotômetro no infravermelho próximo, da marca Bruker, modelo Tensor 37.

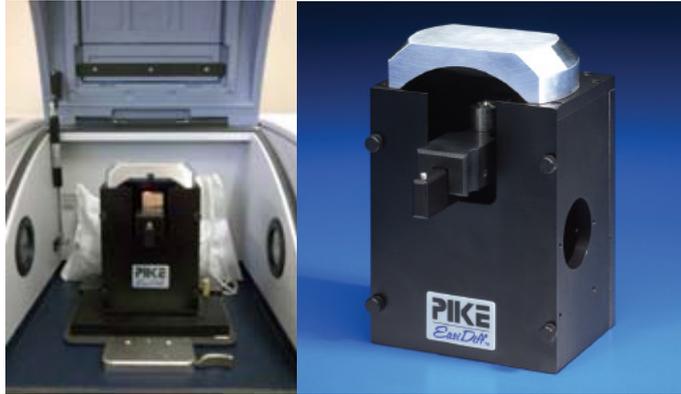


Figura 3.13. Dispositivo de reflectância difusa, marca Pike, modelo EasyDiff.

Na validação cruzada para os espectros de *Eucalyptus* as amostras foram divididas em dois conjuntos: dois terços ($\frac{2}{3}$) das amostras foram usadas para construir a calibração, enquanto as restantes, um terço ($\frac{1}{3}$), foram guardadas para a validação.

Para os espectros de *Pinus* usou-se a validação cruzada completa ou “validação cruzada deixe-uma-fora”, em que segundo Braga (2004), uma amostra é retirada de um conjunto de dados e o modelo é calculado com as amostras restantes, e então a amostra que foi removida é prevista através do modelo de regressão. O processo é repetido até que todas as amostras tenham sido previstas.

Buscando reduzir o número de dados e o tempo necessário para realizar todos os cálculos de calibração, a região do espectro acima de 9000 cm^{-1} foi eliminada. Dessa forma, segundo Barcellos (2007), deve-se eliminar as faixas que apresentam maior concentração de ruídos. Para a análise de *Pinus* não tiveram validação em amostras externas devido ao número restrito de amostras, logo o resultado obtido tende a apresentar um erro ligeiramente menor do que seria provavelmente encontrado com um conjunto externo de amostras.

3.3 – DELINEAMENTO E TESTES ESTATÍSTICOS

Os resultados obtidos nos ensaios convencionais foram submetidos à análise estatística descritiva: cálculo de média, mínimo, máximo e desvio padrão. Foram empregados a ANOVA (análise de variância), e teste F com significâncias a 1 e 5 % de probabilidade.

Os resultados obtidos nos ensaios convencionais foram correlacionados com os resultados dos ensaios não destrutivos. As correlações foram determinadas pelo método de correlação de Pearson a 1 e 5 %. Usou-se o teste de Tukey quando necessário. Foram calculadas regressões para ajustes de equações estimando valores de propriedades físicas e mecânicas das madeiras em estudo.

Os espectros obtidos nos ensaios de *NIRS*, foram submetidos à análise utilizando o pacote estatístico Quant 2 do software OPUS fornecido pela Bruker Optics.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

4.1.2 – Ensaio Convencionais

4.1.2.1 – Propriedades físicas (densidade básica e retratibilidade)

Os valores da densidade básica e das retratibilidades volumétrica, tangencial e radial para as madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Valores médios para a densidade básica e retratibilidades das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*.

Espécie	Densidade (g/cm ³)	Retratibilidade (%)			Anisotropia
		Volumétrica	Tangencial	Radial	Razão (T/R)
Pinus	0,47 (0,07) (14,39) (0,39) (0,65)	12,52 (1,75) (13,97) (9,71) (15,93)	7,99 (1,30) (16,21) (5,75) (11,51)	4,72 (1,12) (23,77) (2,87) (7,32)	1,77 (0,43) (24,10) (1,01) (2,55)
Eucalipto 1	0,56 (0,05) (7,66) (0,56) (0,72)	13,81 (0,97) (7,02) (12,31) (15,38)	7,63 (0,81) (10,62) (6,09) (8,85)	6,54 (0,95) (14,56) (5,10) (8,31)	1,20 (0,25) (20,77) (0,86) (1,57)
Eucalipto 2	0,62 (0,02) (4,36) (0,52) (0,61)	11,73 (1,91) (16,30) (6,54) (16,53)	6,28 (1,44) (22,91) (3,12) (10,43)	5,58 (1,17) (20,87) (3,79) (8,73)	1,16 (0,32) (27,19) (0,56) (1,75)
Eucalipto (média)	0,60 (0,05) (8,30) (0,52) (0,72)	12,77 (1,93) (15,64) (6,54) (16,53)	6,96 (1,42) (21,21) (3,12) (10,47)	6,06 (1,18) (20,09) (3,79) (8,73)	1,18 (0,29) (25,13) (0,56) (1,75)

Valores entre parêntesis são, respectivamente, desvio-padrão, coeficiente de variação (%), valores mínimo e máximo.

A madeira de *Pinus caribaea* é considerada de densidade leve (0,47 g/cm³), de acordo com Melo et al. (1990). O valor apresentado, para a madeira de Pinus, na Tabela 4.3 está de acordo com estudos realizados por Bendtsen (1978) e Gonzalez et al. (2008) que encontraram valores semelhantes para a espécie. Cangiani (1993) verificou que existe um aumento da densidade de *Pinus* com o aumento da idade, enquanto que Amaral et al. (1977) verificaram que essa mesma tendência ocorre de modo inverso para a localização da amostra na altura da árvore. Por outro lado, Mendes et al. (2002) estudando espécies de *Pinus* encontrou para o *Pinus caribaea* um valor médio de 0,37 g/cm³. A formação da madeira é influenciada por diversos fatores, podendo-se citar a qualidade de sítio, tratamentos silviculturais, idade do povoamento etc., produzindo madeiras com propriedades diferentes.

Os valores médios de retratibilidade tangencial, radial e volumétrica da madeira de *Pinus* estudada foram, respectivamente, 7,99 %, 4,72 % e 12,52 %. Esses valores de retratibilidade são esperados para o gênero *Pinus*, embora a retratibilidade radial seja o valor mais próximo ao da literatura, segundo Gonzalez et al. (2008). O coeficiente de anisotropia encontrado para

esta espécie pode ser considerado normal (1,77), inferindo que esta madeira não deverá trazer maiores problemas quando utilizada no segmento industrial, isto é, deverá apresentar estabilidade não devendo “trabalhar”. Embora o valor encontrado para o coeficiente de anisotropia seja superior aos descritos na literatura para este gênero (COSTA, 2005; GONÇALEZ et al., 2008) esta propriedade é de grande interesse para o segmento industrial que utiliza a madeira em usos interiores, como lambri, móveis, divisórias, etc.

Por sua vez a madeira de *Eucalyptus grandis* é considerada uma madeira de média densidade (0,60 g/cm³). Os valores apresentados na Tabela 4.3 estão de acordo com estudos realizados por Costa (1996), Stangerlin et al. (2008). Segundo Lima (2005) e Silva (2002) as variações ocorridas entre o *Eucalyptus* 1 e 2 podem ser consequências de serem as amostras provenientes de diferentes indivíduos, posição da amostra na árvore, procedência, idade, tratamentos silviculturais, entre outros. Hillis (2000) afirmou que os limites para o gênero *Eucalyptus* ficam entre 0,60 e 0,90 g/cm³, para as madeiras maduras, e entre 0,40 e 0,80 g/cm³, para as madeiras mais jovens.

A madeira de *Eucalyptus grandis* estudada apresentou valores de retratibilidades inferiores aos encontrados na literatura (GONÇALEZ et al., 2006; SILVA et al., 2006). Talvez o reduzido número de indivíduos utilizado no trabalho e por consequência um número de amostras não abrangentes para a espécie pode ajudar a explicar os valores inferiores para o material estudado.

Apesar da caracterização das propriedades das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* não ser o objetivo principal deste trabalho, mas sim a utilização de técnicas alternativas para o estudo de madeiras, o conhecimento dos valores de retratibilidade e do coeficiente de anisotropia do material de *E. grandis*, é importante pois apresenta uma boa estabilidade dimensional.

4.1.2.2 – Propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e de ruptura)

Os dados apresentados na Tabela 4.4 apresentam os valores médios do módulo de elasticidade (MOE) e do módulo de ruptura (MOR) para *Pinus* e *Eucalyptus*. Os valores encontrados para o MOE e MOR estão em conformidade com os normalmente encontrados na literatura.

Tabela 4.4. Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação dos módulos de elasticidade (MOE) e ruptura (MOR) em flexão estática (MPa) da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedades	Espécie		
	Pinus	Eucalipto	
MOE (MPa)	Média	10192	10189
	Desvio Padrão	1167	1011
	Coeficiente de Variação (%)	0,11	0,10
MOR (MPa)	Média	89	102
	Desvio Padrão	10	9
	Coeficiente de Variação (%)	0,12	0,10

O valor médio para o módulo de elasticidade de *Pinus caribaea* encontrado foi de 10192,80 MPa sendo os limites individuais superior e inferior, respectivamente, de 12884,22 MPa e 8985,32 MPa. Para o módulo de ruptura de *Pinus* o valor médio encontrado foi de 89,63 MPa sendo os limites individuais superior e inferior, respectivamente, de 110,80 MPa e 68,12 MPa. O MOR e o MOE apresentados pela madeira de *Pinus caribaea* mostram-se próximos aos encontrados por Santini (2000) e Gonzalez et al. (2008).

O valor médio para o módulo de elasticidade de *Eucalyptus grandis* encontrado foi de 10189,30 MPa sendo os limites individuais superior e inferior, respectivamente, de 11717,14 MPa e 7507,27 MPa. Silva (2002) estudando a mesma espécie com idades de vinte anos e dez anos encontrou um módulo de elasticidade de 12673,14 MPa e 7986,34 MPa, respectivamente. Para o módulo de ruptura de *Eucalyptus* o valor médio encontrado foi de 102,49 MPa sendo os limites individuais superior e inferior, respectivamente, de 117,04 MPa e 76,47 MPa. Os valores estão de acordo com estudos realizados por Silva (2002) que afirma que o menor valor do módulo de ruptura é encontrado para madeiras mais novas. Ashley e Ozarska (2000) estudando a madeira de *Eucalyptus grandis* de duas idades encontraram valores de 12062,18 MPa e 13238,98 MPa, para módulo de elasticidade, e valores de 76,69 MPa e 96,30 MPa para módulo de ruptura para as madeiras de vinte e dois e vinte e oito anos, respectivamente. ACOSTA (1998), analisando madeiras de *Eucalyptus grandis*, com doze e dezoito anos de idade, encontrou valores de 9644,35 MPa para MOE e, 71,69 MPa para MOR. Para a madeira

de *Eucalyptus grandis*, Oliveira (1997) encontrou valores de 8488,64 MPa para MOE e 60,02 MPa para MOR.

4.2 – ENSAIOS DESTRUTIVOS X NÃO DESTRUTIVOS

4.2.1 - Análise de Imagem

A madeira de *Pinus caribaea* apresenta traqueídeos individualmente indistintos a olho nu, mas visíveis com auxílio de lente com aumento de 10x, muito pequenos, com orientação radial; raios pouco notados no topo e na face tangencial; camadas de crescimento demarcadas por lenho inicial e tardio (Figura 4.14), com espessuras variáveis; textura média, cerne de coloração bege, levemente resinoso e de cheiro agradável. Ausência de parênquima e poros.

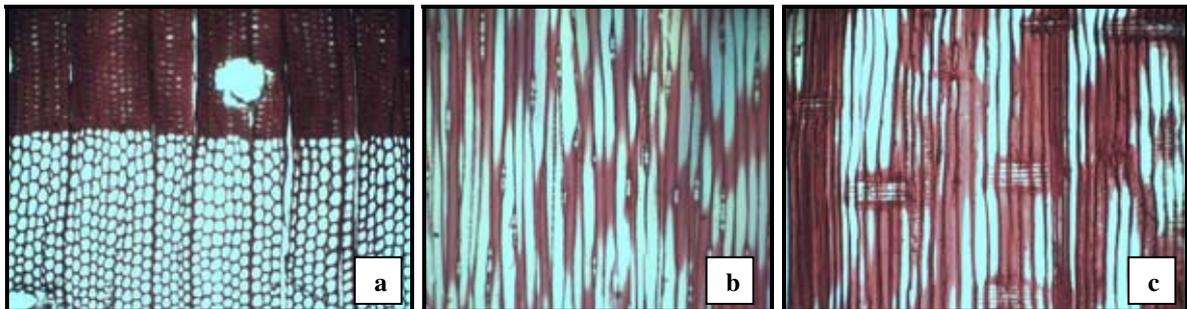


Figura 4.14. Imagem de lâminas histológicas de *Pinus caribaea*, corte transversal (a); Corte longitudinal tangencial (b) e; Corte longitudinal radial (c).

O *Eucalyptus grandis* possui parênquima visível sob lente, vasicêntrico, escasso e ocasionalmente disperso; poros visíveis a olho nu, numerosos, médios raramente com obstruções, ou geminados; vasos dispostos em diagonal, raios visíveis sob lente no topo e na face tangencial (Figura 4.15).

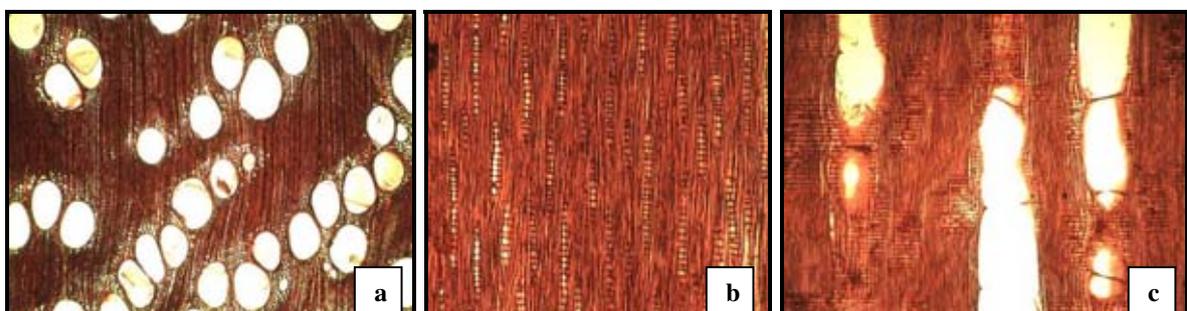


Figura 4.15. Imagem de lâminas histológicas de *Eucalyptus grandis* (corte transversal) (a); Corte longitudinal tangencial (b); Corte longitudinal radial (c).

As imagens de cubos de madeira (Figura 4.16) podem ser aplicadas para inferir valores de densidade das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, tanto em separado, quanto em conjunto.

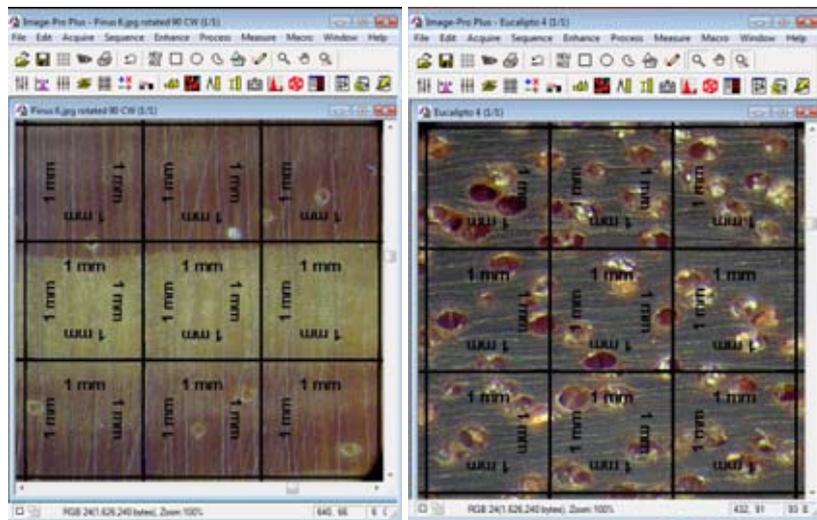


Figura 4.16. Imagens de cubos de madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* utilizadas na predição da densidade básica Software Image-Pro®Plus 6.0.

Analisando as madeiras em conjunto, obteve-se um coeficiente de determinação (R^2) de 0,87, significativo a 1% (Figura 4.17). Essa técnica permite agrupar as madeiras em classes de densidade versus espaços vazios.

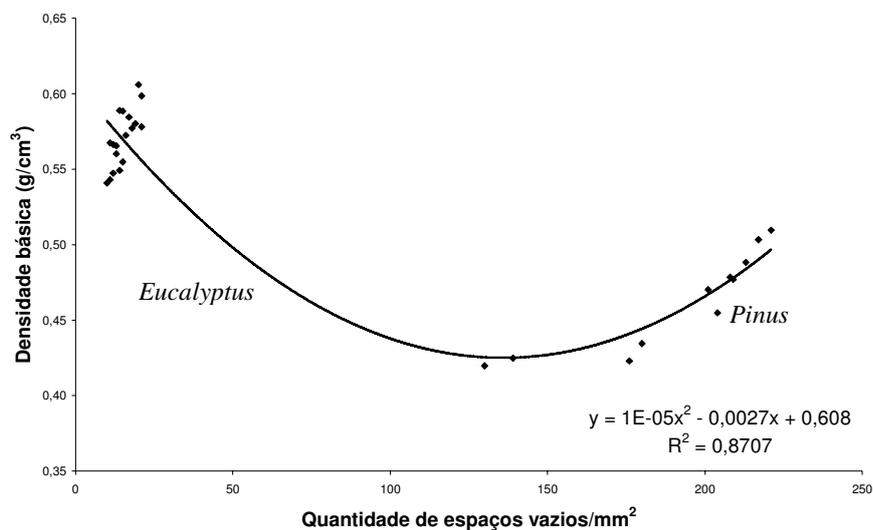


Figura 4.17. Análise de regressão em função da quantidade de espaços vazios e a densidade das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*.

Analisando-as em separado, na Figura 4.18, observa-se que a técnica prevê melhor os valores de densidade para a madeira de *Pinus*, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,96, em detrimento a 0,59 para o *Eucalyptus*, que mesmo com um R^2 menor que o de *Pinus*, ambos são significativos a 1%.

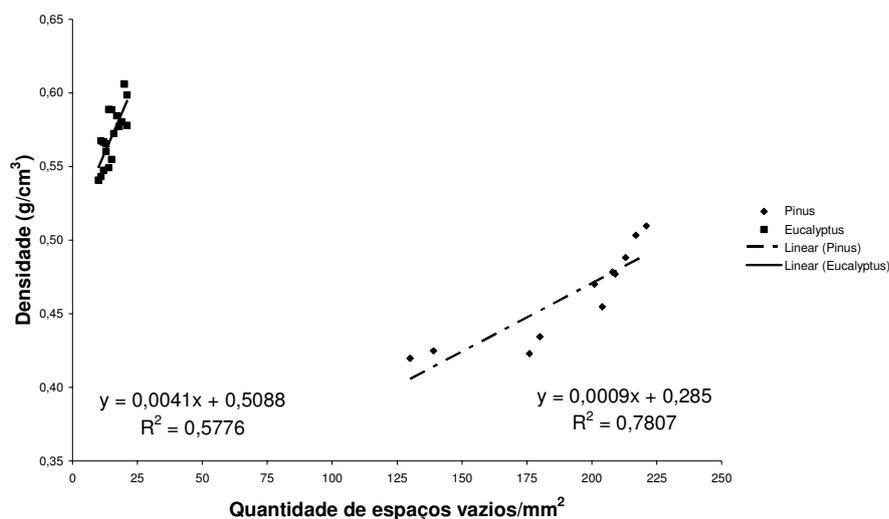


Figura 4.18. Análise de regressão em função da quantidade de espaços vazios e a densidade das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*.

Ao analisar as propriedades de MOE, MOR, coeficiente de anisotropia e retratibilidade volumétrica, considerando as duas madeiras em conjunto, observa-se que a técnica de análise de imagem permite simular a previsão das propriedades de MOR ($R^2 = 0,24$), e coeficiente de anisotropia ($R^2 = 0,47$), a 5 % e 1% respectivamente (Figuras 4.19 e 4.20).

Por outro lado, analisando as espécies separadas não se pode prever as propriedades de MOE ou MOR, elas não são significativas. Com as amostras de *Eucalyptus* essa técnica não permitiu a previsão dessas propriedades, já para *Pinus* apenas a propriedade da retratibilidade volumétrica é significativa a 5%, com coeficiente de determinação de 0,45 (Figura 4.21).

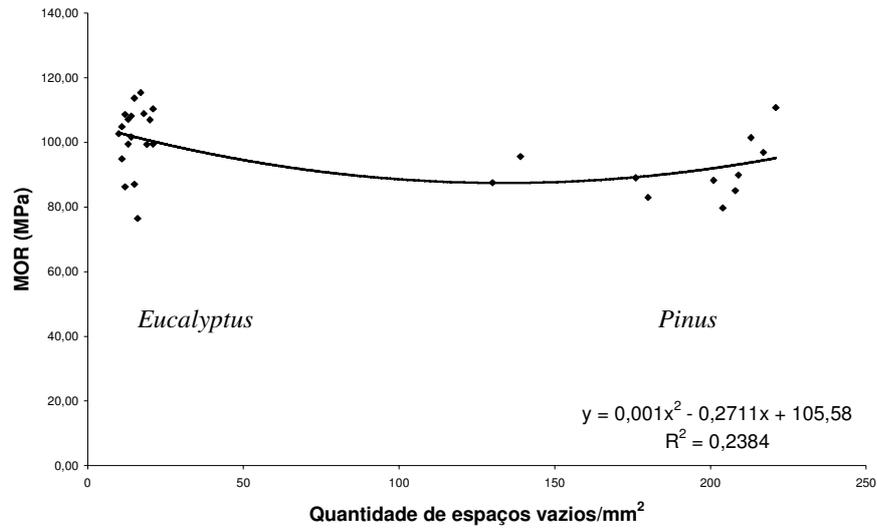


Figura 4.19. Análise de regressão em função da quantidade de espaços vazios e o módulo de ruptura (MOR) das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*.

A análise de imagens para predição de propriedades da madeira é mais indicada para a densidade. Todavia, os resultados obtidos foram melhores para a espécie de *Pinus* que para a de *Eucalyptus*. As demais propriedades poderão ser estimadas desde que possuam maior número de corpos-de-prova de cada espécie, provenientes de mais de um indivíduo, para que se tenha uma maior variação e amplitude de dados.

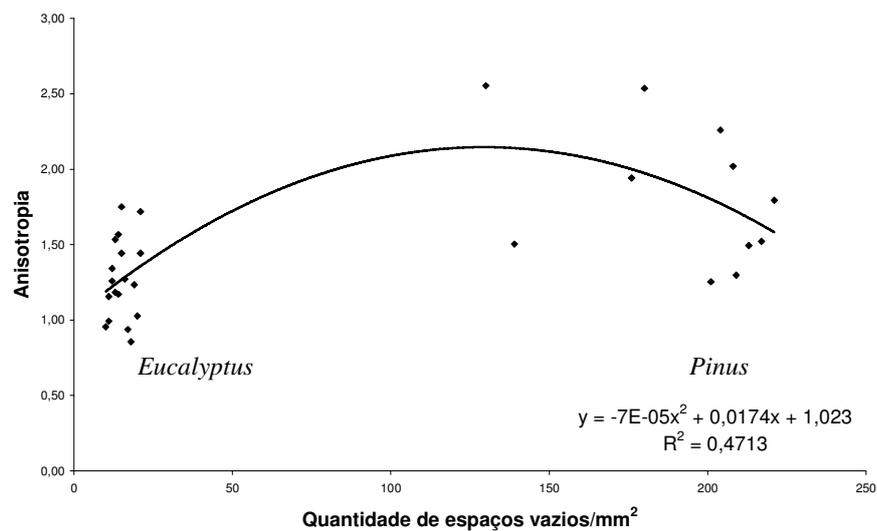


Figura 4.20. Análise de regressão em função da quantidade de espaços vazios e o coeficiente de anisotropia das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*.

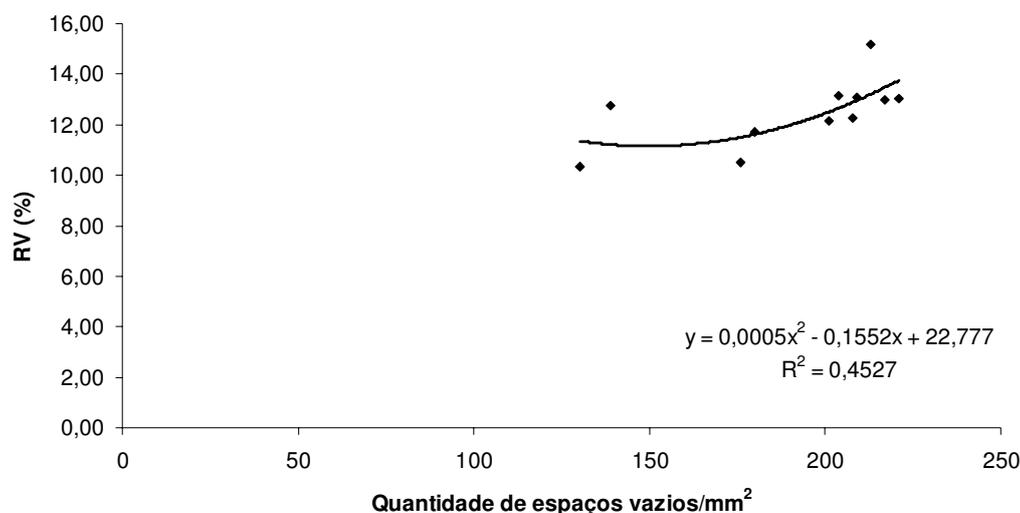


Figura 4.21. Análise de regressão em função da quantidade de espaços vazios e a retratibilidade volumétrica (RV) da madeira de *Pinus*.

4.2.2 – Análise Colorimétrica

Os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C e h^*) permitem caracterizar, de maneira quantitativa e qualitativa, a cor da madeira de uma determinada espécie. Os valores médios dos parâmetros colorimétricos das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* (média do *Eucalyptus* 1 e 2) são apresentadas na Tabela 4.5 e comparados a outras espécies.

Tabela 4.5. Valores médios dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C, h^*) das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* comparados com outras espécies reportadas na literatura.

Espécie	Parâmetros colorimétricos				
	L^*	a^*	b^*	C	h^*
<i>Pinus caribaea</i>	56,87	4,66	18,85	19,43	76,16
<i>Eucalyptus grandis</i>	46,77	10,57	14,08	17,61	53,10
Tauari ²	57,73	7,21	14,41	16,12	63,37
Ipê ³	39,00	10,00	16,00	18,90	58,00
Mogno ³	52,10	14,60	28,70	32,10	63,10
Pau marfim ³	84,10	3,30	21,80	22,10	81,40
Muirapiranga ¹	42,39	22,02	15,56	26,99	35,10
Hevea ¹	77,55	6,56	19,61	20,74	71,74

¹ – Autran e Gonzalez (2006); ² – Ribeiro et al. (2005); ³ – Gonzalez et al. (2001a).

A cor da madeira de *Pinus caribaea var hondurensis* é caracterizada pela claridade ($L^* = 56,87$), pelas coordenadas a^* (4,66) e b^* (18,85), além do ângulo de tinta ($h^* = 76,10$) e saturação ($C = 19,43$). Segundo a classificação proposta por Camargos (1999), esta madeira é de coloração branca amarelada. A coordenada b^* (pigmentação amarela) é a principal responsável pela formação da cor desta madeira. Entretanto a pigmentação vermelha (coordenada a^*) se faz presente influenciando a composição da coloração da espécie. O ângulo de tinta (h^*) confirma a maior proximidade do eixo amarelo, evidenciando a importância desta coordenada. Comparando com outras espécies madeiras (Tabela 4.5), verifica-se a particularidade da cor da espécie estudada. Segundo ainda a classificação de Camargos (1999) esta madeira é de coloração clara, pois possui valor de L^* maior que 54. A madeira desta espécie tem uma maior proximidade com as madeiras de pau marfim e seringueira. Assim, o seu uso em ambientes interiores poderá agregar valor dando uma opção interessante para a indústria.

A cor da madeira de *Eucalyptus grandis* é caracterizada pela claridade ($L^* = 46,77$), pelas coordenadas a^* (10,57) e b^* (14,08), além do ângulo de tinta ($h^* = 53,10$) e saturação ($C = 17,61$). Segundo Rizzini (1981) e Camargos (1999), esta madeira é de coloração rosa forte ou vermelho pardacento. A coordenada a^* (pigmentação vermelha) é a principal responsável pela formação da cor desta madeira. Entretanto a pigmentação amarela (coordenada b^*) se faz presente influenciando a composição da coloração desta espécie. O ângulo de tinta (h^*) confirma a maior proximidade do eixo vermelho, evidenciando a importância do pigmento vermelho (a^*). A madeira de *Eucalyptus* é considerada uma madeira escura, segundo a classificação proposta por Camargos (1999), pois L^* é menor que 54.

Os parâmetros colorimétricos da madeira de *Pinus caribaea* para as faces tangencial e radial são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Valores médios, das faces radial e tangencial, dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) da madeira de *Pinus caribaea*.

FACES	Parâmetros colorimétricos				
	L^*	a^*	b^*	C	h^*
Radial	56,53	4,72	18,86	19,45	75,98
Tangencial	57,91	4,60	18,84	19,40	76,45

Analisando os valores médios obtidos dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C e h^*), da madeira de *Pinus*, verificou-se que existem diferenças significativas entre as duas faces da madeira a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, exceto para a variável b^* . Verifica-se que a face radial é mais escura (L^* é menor) que a tangencial. A coordenada a^* (pigmento vermelho para este caso) é a principal responsável pela coloração mais escura desta face, pois apresenta valor superior ao da face tangencial. O ângulo de tinta (h^*) colabora para explicar este fato, apresentando valor inferior para a face. A Figura 4.22 apresenta a curva espectral de cada face. Devido as suas proximidades, essas podem ser diferenciadas por meio da análise estatística.

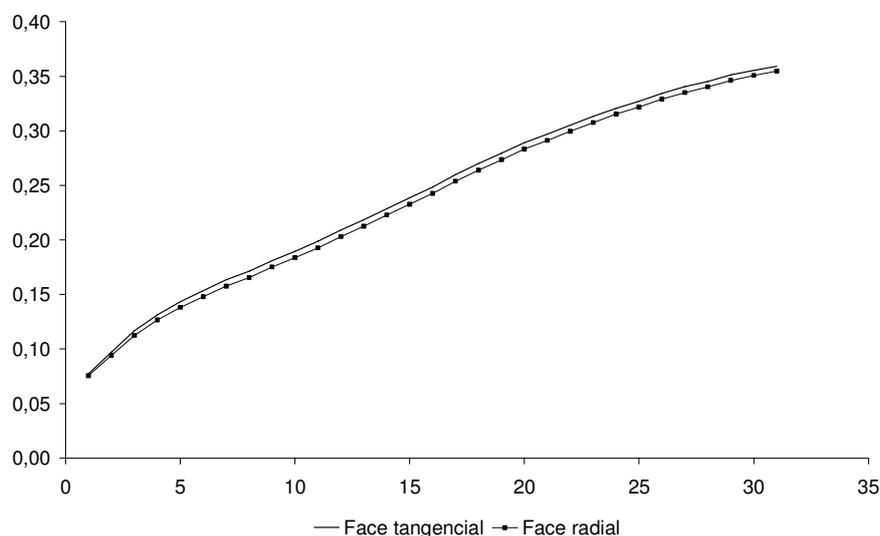


Figura 4.22 – Curva espectral das faces radial e tangencial de *Pinus*.

Os parâmetros colorimétricos da madeira de *Eucalyptus grandis* para as faces tangencial e radial são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Valores médios, das faces radial e tangencial, dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

FACES	Parâmetros colorimétricos				
	L^*	a^*	b^*	C	h^*
Radial	47,22	10,63	14,25	17,78	53,28
Tangencial	46,33	10,50	13,91	17,44	52,92

Quanto aos valores médios obtidos para os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C e h^*), da madeira de *Eucalyptus*, verificou-se que existem diferenças significativas entre as duas faces da madeira a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Observa-se que a face tangencial é mais escura (L^* é menor) que a radial. Essa afirmativa já fora feita por González et al. (2006) ao estudar as características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. A Figura 4.23 mostra a curva espectral das duas faces, podendo-se observar a diferença em suas colorações.

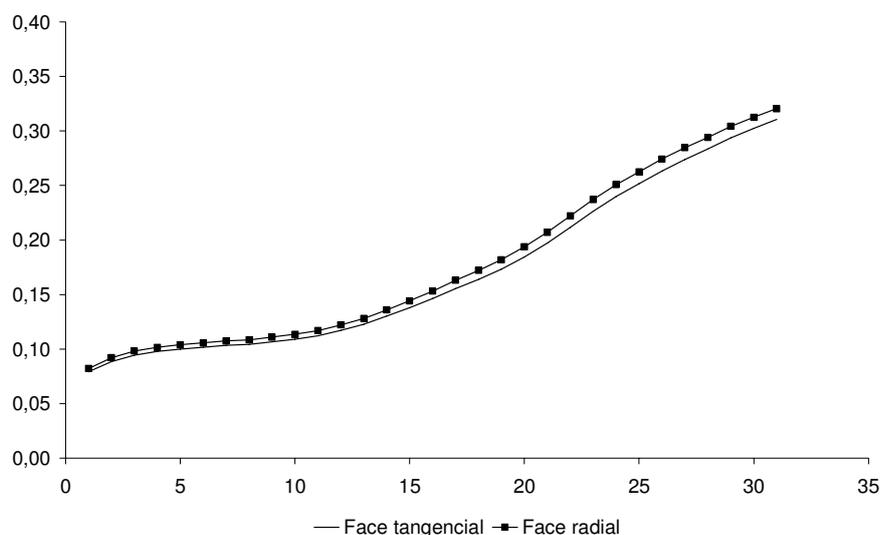


Figura 4.23 – Curva espectral das faces radial e tangencial de *Eucalyptus*.

A diferença colorimétrica entre as faces das madeiras permite o industrial optar durante o desdobro da madeira desta espécie em obter peças mais claras ou mais escuras, de acordo com a solicitação de mercado.

4.2.2.1 – Parâmetros colorimétricos x Propriedades da madeira

A análise colorimétrica, por ser uma análise quantitativa dos parâmetros colorimétricos da madeira, permite estimar suas propriedades físicas e mecânicas. Nas Figuras 4.24 a 4.28 verifica-se a separação em grupos das duas espécies conforme relação entre a densidade e os parâmetros colorimétricos.

Analisando a densidade observa-se correlação negativa para todos os parâmetros exceto para o a^* (pigmento vermelho). Observa-se que quanto maior o valor de L^* , menor a densidade da madeira e quanto maior o valor de a^* maior a densidade.

A correlação entre a densidade e o valor médio do ângulo de tinta (h^*) foi o que apresentou maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,82$), sendo o menor R^2 (0,67) representado pela relação densidade X cromaticidade (C). O melhor modelo para sua estimativa foi em relação ao ângulo de tinta (h^*), onde: $Y = -0,003x^2 + 0,0343x - 0,4004$. Neste caso é possível prever até 82% da propriedade com um erro de 4%. Esses resultados podem ser visualizados na Tabela 4.8.

Observando-se as Figuras 4.24 e 4.25, verifica-se que a face radial representada pelos parâmetros colorimétricos L^* (claridade) e a^* (coordenada cromática vermelha) são os mais recomendados para estimar a densidade.

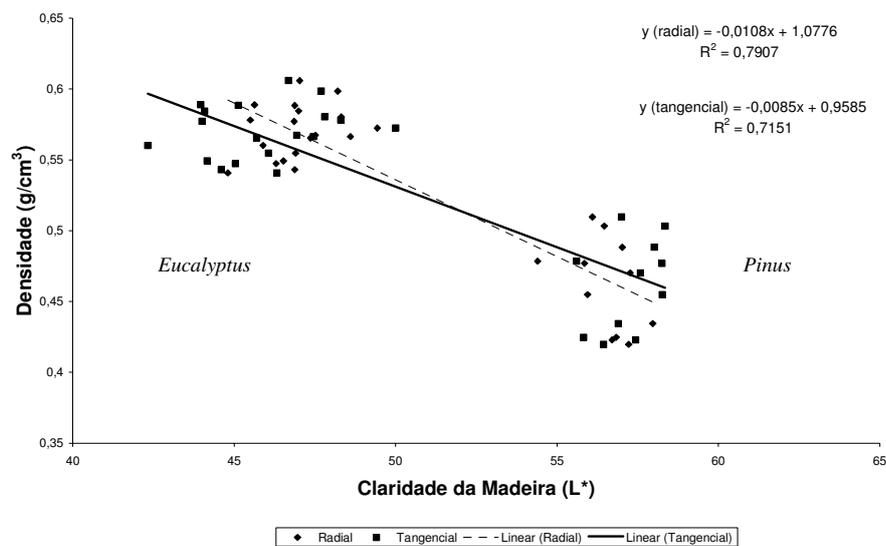


Figura 4.24. Análise de regressão da densidade das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função da claridade da madeira (L^*).

Tabela 4.8. Resultados da estatística de regressão para o agrupamento dos valores médios para as espécies.

RESULTADOS DA ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO				
Relações	R²	Função	Erro Padrão	F*
Densidade Básica x L*	0,803	$y = -0,0011x^2 + 0,1022x - 1,8281$	0,056961	2,09e-06
Densidade Básica x a*	0,807	$y = -0,0023x^2 + 0,0521x + 0,2715$	0,051638	6,87e-08
Densidade Básica x b*	0,785	$y = -0,0014x^2 + 0,0234x + 0,5121$	0,050569	3,33e-08
Densidade Básica x C	0,674	$y = 0,0106x^2 - 0,4443x + 5,1036$	0,052945	1,64e-07
Densidade Básica x h*	0,822	$y = -0,0003x^2 + 0,0343x - 0,4004$	0,051408	5,89e-08
Anisotropia x L*	0,424	$y = 0,0083x^2 - 0,7938x + 20,261$	0,370873	7,68e-05
Anisotropia x a*	0,435	$y = 0,0296x^2 - 0,5563x + 3,7953$	0,358090	2,22e-05
Anisotropia x b*	0,463	$y = 0,0096x^2 - 0,1839x + 1,8977$	0,343945	5,39e-06
Anisotropia x C	0,469	$y = -0,0606x^2 + 2,5835x - 25,458$	0,346783	7,19e-06
Anisotropia x h*	0,453	$y = 0,0022x^2 - 0,2539x + 8,5416$	0,353295	1,38e-05
Retratibilidade Volumétrica x L*	0,214	$y = 0,0256x^2 - 2,7365x + 84,81$	1,402805	0,35826
Retratibilidade Volumétrica x a*	0,257	$y = 0,2151x^2 - 3,1266x + 21,973$	1,408156	0,44285
Retratibilidade Volumétrica x b*	0,147	$y = 0,124x^2 - 4,2517x + 48,227$	1,415473	0,62308
Retratibilidade Volumétrica x C	0,049	$y = 0,0297x^2 - 1,4126x + 28,553$	1,420525	0,95757
Retratibilidade Volumétrica x h*	0,257	$y = 0,0147x^2 - 1,9407x + 74,402$	1,409568	0,47012
MOE x L*	0,048	$y = 17,902x^2 - 1850,9x + 57555$	1063,531	0,80563
MOE x a*	0,066	$y = 121,04x^2 - 1847x + 16167$	1064,479	0,97659
MOE x b*	0,214	$y = -0,3409x^2 - 59,471x + 11278$	1063,386	0,79184
MOE x C	0,032	$y = -166,84x^2 + 6172,9x - 46733$	1061,633	0,67117
MOE x h*	0,048	$y = 7,2056x^2 - 929,87x + 39224$	1064,386	0,93488
MOR x L*	0,397	$y = 0,2079x^2 - 22,78x + 712,76$	9,685539	0,00016
MOR x a*	0,341	$y = 1,2752x^2 - 17,269x + 142,35$	10,14609	0,00082
MOR x b*	0,373	$y = 0,4588x^2 - 18,172x + 267,86$	9,57118	0,00010
MOR x C	0,370	$y = 0,5127x^2 - 26,436x + 409,13$	9,531583	8,81e-05
MOR x h*	0,404	$y = 0,1136x^2 - 15,234x + 590,77$	9,951408	0,00041

F*- F de significância.

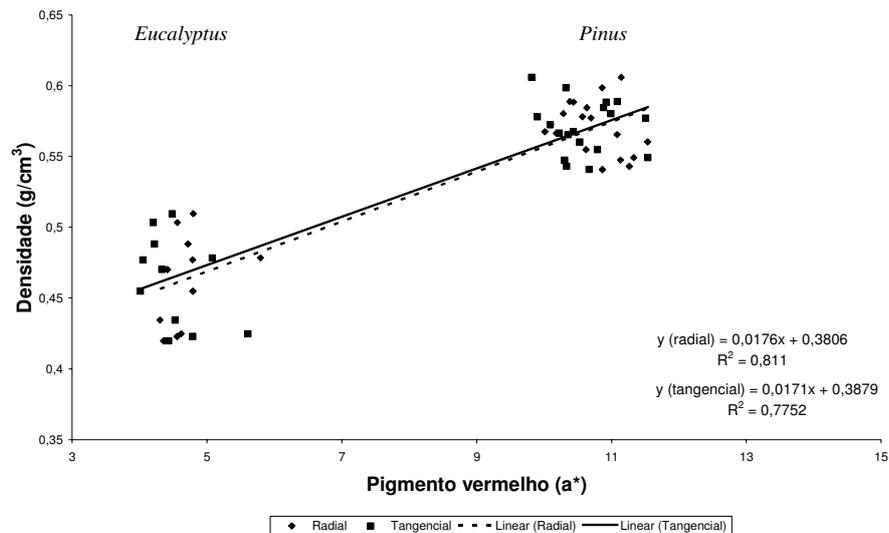


Figura 4.25. Análise de regressão da densidade das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função do pigmento vermelho da madeira (a*).

O mesmo não acontece para o pigmento amarelo da madeira (b*) e para a saturação ou cromaticidade da madeira (C), sendo mais recomendada a face tangencial para a estimativa da densidade (Figuras 4.26 e 4.27).

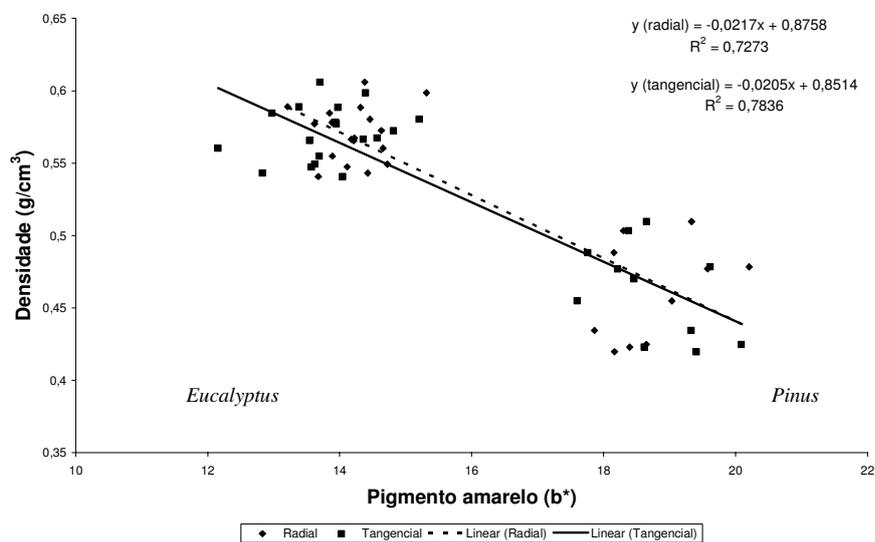


Figura 4.26. Análise de regressão da densidade das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função do pigmento amarelo da madeira (b*).

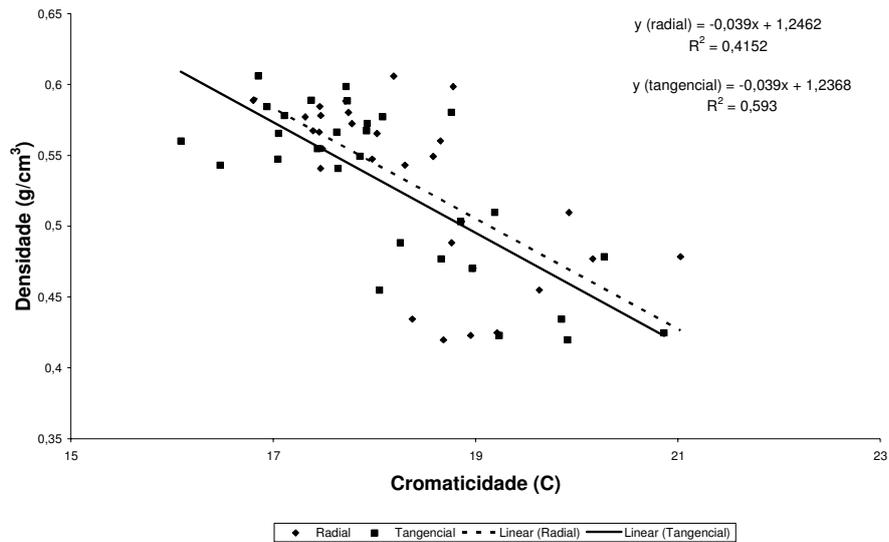


Figura 4.27. Análise de regressão da densidade das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função da saturação ou cromaticidade da madeira (C).

Comparando a face radial e tangencial da madeira (Figura 4.28), a radial é a que melhor prevê os valores de densidade, quando considerados os parâmetros: claridade, pigmento vermelho e ângulo de tinta.

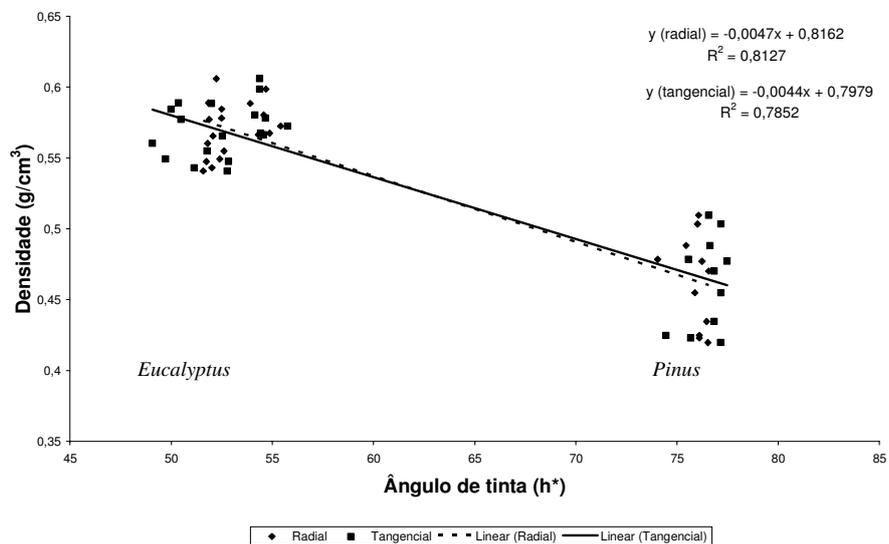


Figura 4.28. Análise de regressão da densidade das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função do ângulo de tinta (h^{*}).

Considerando o coeficiente de anisotropia para as duas espécies observa-se uma melhor regressão para a claridade e o pigmento b* (Figuras 4.29 e 4.30).

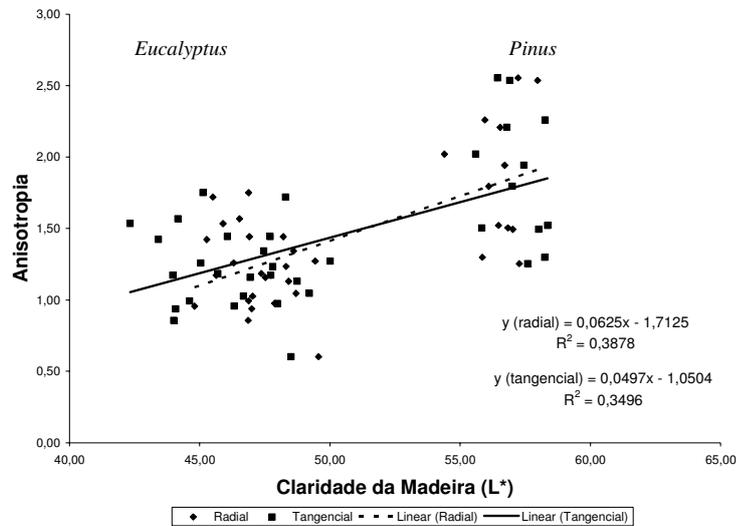


Figura 4.29. Análise de regressão do coeficiente de anisotropia das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função da clareza da madeira (L^*).

O melhor modelo para a estimativa do coeficiente de anisotropia foi em relação ao pigmento amarelo da madeira (b^*), permitindo uma estimativa de 46%, onde: $Y = 0,096x^2 - 0,1839x + 1,8977$. Embora os valores dos coeficientes de determinação dessa propriedade serem baixos, eles são significativos a 1% (Tabela 4.8)

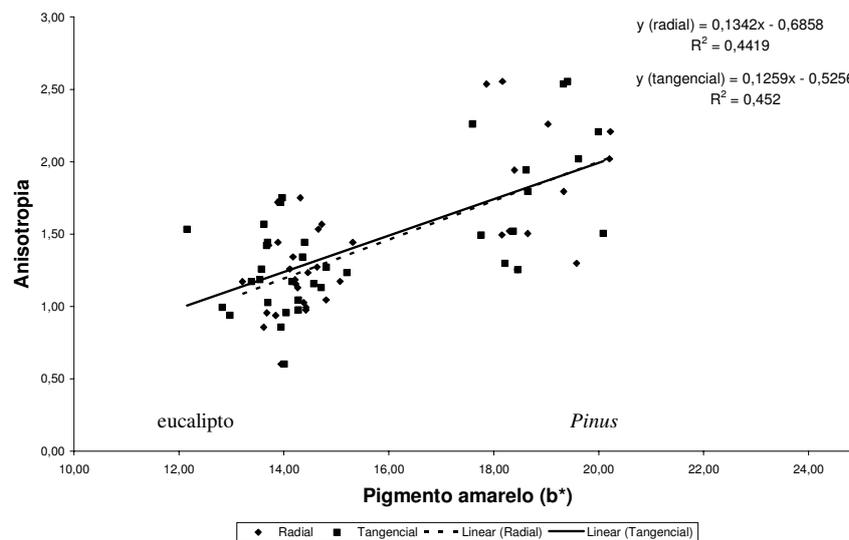


Figura 4.30. Análise de regressão do coeficiente de anisotropia das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função do pigmento amarelo (b^*).

Não se encontrou correlação significativa entre a retratibilidade volumétrica e os parâmetros colorimétricos. Assim como entre os parâmetros colorimétricos e o módulo de elasticidade (MOE) da madeira de *Pinus* e *Eucalyptus*. Já para o módulo de ruptura (MOR) as correlações foram significativas a 1% (Figura 4.31).

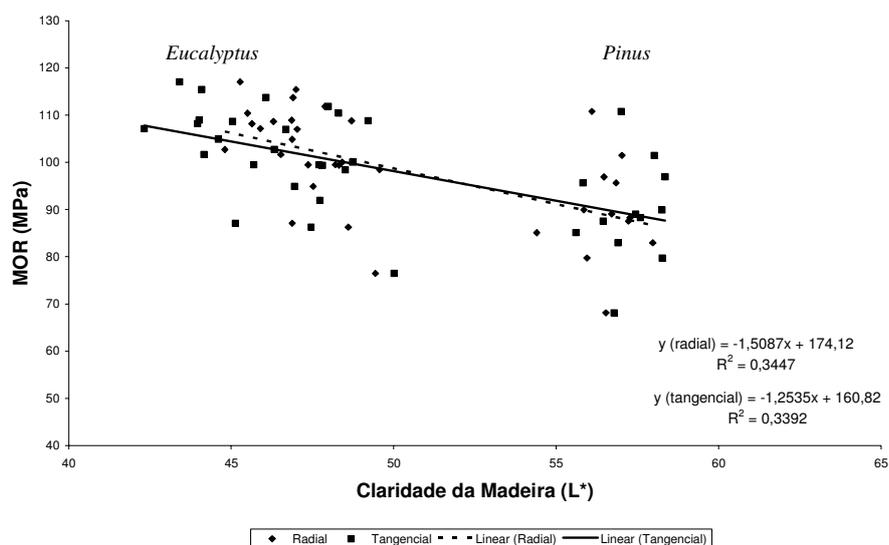


Figura 4.31. Análise de regressão do módulo de ruptura (MOR) das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função da claridade da madeira (L^*).

Para o módulo de ruptura (MOR), apesar de todos os coeficientes de determinação (R^2) serem baixos, as análises foram significativas e o melhor modelo para sua estimativa foi em relação a claridade da madeira, permitindo uma estimativa de 40% o valor do MOR, onde: $Y = 0,2079x^2 - 22,78x + 712,76$ (Tabela 4.8).

O erro padrão dá uma boa precisão da estimativa quando apresentam valores baixos. Esses erros para as relações com a densidade básica estão na ordem de 5%. As demais relações apresentam erros acima de 30%.

As correlações entre L^* , a^* , b^* , C e h^* e as propriedades de densidade, coeficiente de anisotropia e MOR para as madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* mostraram-se altas e promissoras. Ao correlacionar essas variáveis observa-se que a densidade e o MOR apresentam o mesmo padrão de correlação, com valores de coeficientes de correlação maiores para a densidade (Tabela 4.9).

Tabela 4.9. Correlação entre os parâmetros colorimétricos (L*, a*, b*, C, h*) e propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*.

Propriedades	Correlações				
	L*	a*	b*	C	h*
Densidade	-0,70	0,76	-0,77	-0,75	-0,76
Retratibilidade volumétrica	-0,16	0,13	-0,08	0,01	-0,12
Anisotropia	0,61	-0,64	0,68	0,67	0,66
MOE	-0,04	0,01	-0,05	-0,07	-0,01
MOR	-0,59	0,53	-0,60	-0,61	-0,56

4.2.3 – Análise por meio de Ultrassom

A velocidade com que as ondas ultrassônicas percorrem a madeira depende da direção de propagação e se mostra distinta para cada tipo de material estudado. A Tabela 4.10 apresenta os valores das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas para as madeiras de *Pinus caribaea* Var. *Hondurensis* e *Eucalyptus grandis* (média do *Eucalyptus* 1 e 2) em comparação com outras espécies de madeiras.

Tabela 4.10. Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, comparadas com outras madeiras reportadas na literatura.

Espécie	V _{LL} (m/s)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
<i>Pinus caribaea</i>	5716,19	5571,06	5988,79	112,98
<i>Pinus caribaea</i> ²	3886	3138	5000	-
<i>Pinus elliottii</i> ²	3923	2913	5057	-
<i>Eucalyptus grandis</i>	5058,31	4293,43	5467,66	339,80
<i>Eucalyptus grandis</i> ²	3836	3296	4360	-
<i>Eucalyptus citriodora</i> ²	4377	3906	4719	-
<i>Sterculia pruriens</i> (axixá) ¹	5296,60	5122,95	5420,05	76,64
<i>Tachigali myrmecophila</i> (taxi-preto) ¹	5400,22	4235,60	5530,37	81,99
<i>Vataireopsis speciosa</i> (fava-amargosa) ³	5169	-	-	365
<i>Aspidosperma macrocarpum</i> (peroba-mico) ³	5146	-	-	218

¹ – Zerbini. (2008); ² – Oliveira e Sales (2005); ³ – Gonzalez et al. (2001b)

Observa-se na Tabela 4.10 que os resultados encontrados para a madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* são semelhantes aos encontrados por Zerbini (2008) e Gonzalez et al. (2001b),

usando o mesma metodologia. Por outro lado, os valores obtidos no presente estudo são superiores aos encontrados por Oliveira e Sales (2005). Essa variação na velocidade longitudinal deve-se principalmente as dimensões do corpo de prova, além da orientação e das propriedades da madeira, como a densidade.

A utilização da velocidade ultrassônica para a predição das propriedades confirma o preconizado por Daniels e Clark III (2006), isto é, dentre as propriedades estudadas os melhores resultados foram os de predição do módulo de elasticidade. Para a densidade básica da madeira, os resultados foram significativos apenas para a madeira de *Pinus*, a 5 % com coeficiente de determinação de 0,30 (Figura 4.32).

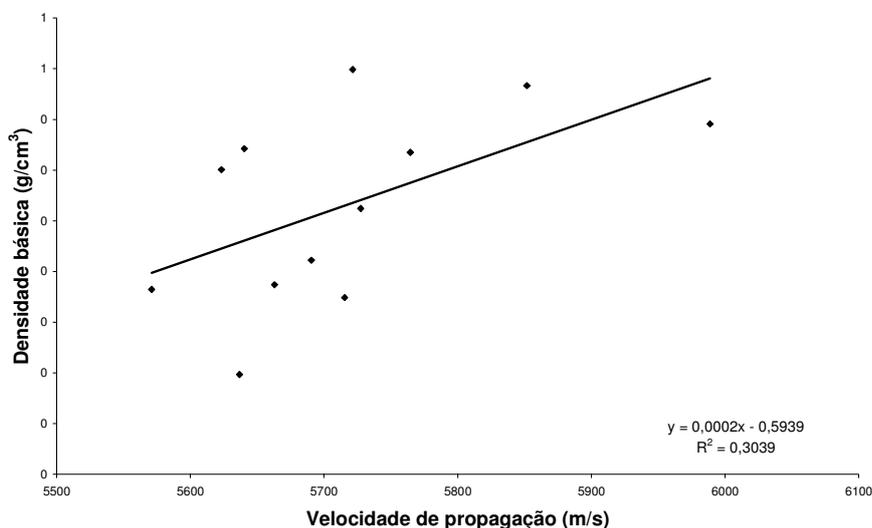


Figura 4.32. Diagrama de dispersão e reta de regressão entre densidade básica e a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas da madeira de *Pinus*.

A Figura 4.33 apresenta o gráfico de dispersão e a reta de regressão entre os dados do MOE medido no ensaio de flexão estática e o MOE medido pelo equipamento de ultrassom para as madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*. Para a análise dos dados foram ignorados os pontos extremos (*outliers*). A análise de variância foi usada para verificar a qualidade do modelo ajustado e é mostrada na Tabela 4.11.

Tabela 4.11. Quadro de ANOVA para os dados do MOE estático e do MOE dinâmico.

<i>Fonte de Variação</i>	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	1,23 e+08	1,23 e+08	73,72	4,96 e-10
Resíduo	34	56804838	1670731		
Total	35	1,8 e+08			

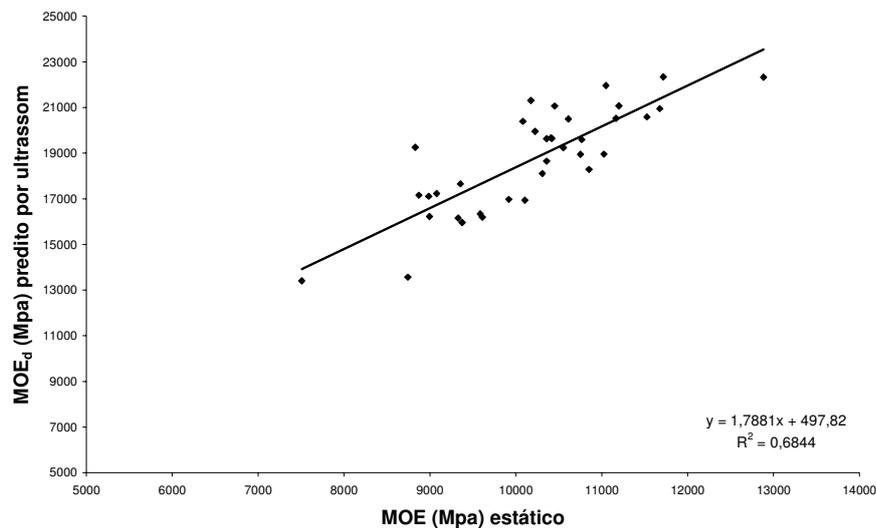


Figura 4.33. Diagrama de dispersão e reta de regressão entre MOE estático e MOE dinâmico.

A reta de regressão entre o MOE estático e o MOE dinâmico teve o valor de 0,68 para o coeficiente de determinação (R^2). Este resultado comprova a eficiência da técnica de emissão ultrassônica na medida do MOE. Embora o R^2 não seja muito elevado, a correlação é significativa. Observa-se que ao utilizar o ultrassom para predizer o MOE das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* a metodologia utilizada não permite uma separação das mesmas. A técnica não permite a separação das espécies uma vez que os valores para esta propriedade das madeiras são semelhantes.

Os valores dos coeficientes de determinação estão compatíveis com os usualmente encontrados na literatura (CARREIRA et al., 2006; SALES et al., 2004), e são considerados satisfatórios para um material de origem natural e anisotrópico como a madeira. A Figura 4.34 apresenta o gráfico dos resíduos contra valores estimados para os dados do MOE obtidos com o equipamento de ultrassom, no qual se observa a homogeneidade da variância.

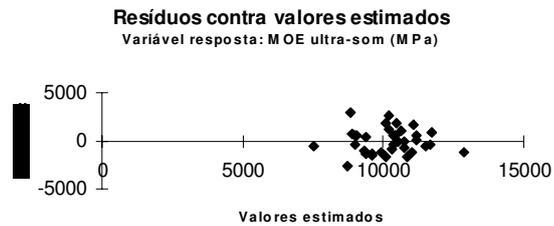


Figura 4.34. Resíduos contra valores estimados para os dados do MOE obtido com o equipamento de ultrassom.

A Figura 4.35 mostra a reta de regressão entre o MOE estático e o MOE dinâmico para a madeira de *Pinus*, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,85. Os resultados encontrados são superiores aos obtidos por Daniels e Clark III (2006) num estudo de quantificação e predição da qualidade da madeira de *Pinus*. Por outro lado, Carreira et al. (2006) obtiveram um coeficiente de determinação para a equação de regressão de 0,901 para o *Pinus sp.*

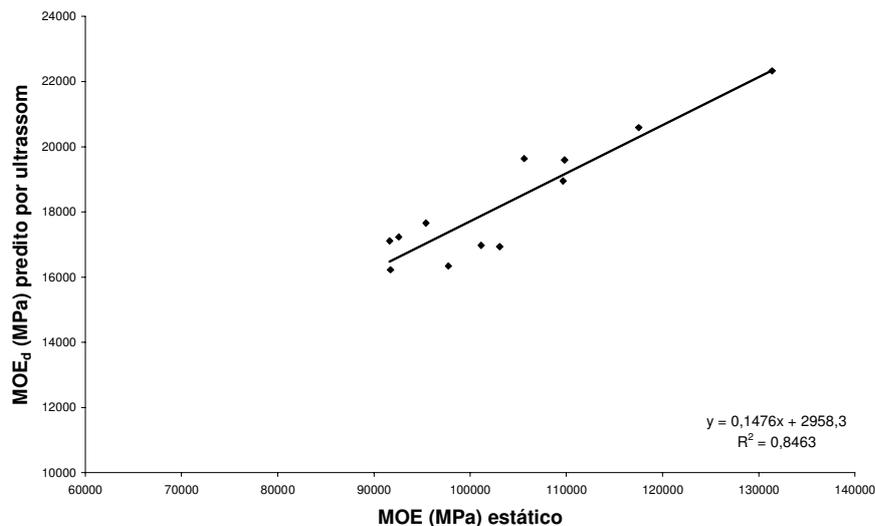


Figura 4.35. Diagrama de dispersão e reta de regressão entre MOE estático e MOE dinâmico para a madeira de *Pinus*.

A madeira de *Eucalyptus* apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,67 (Figura 4.36) para a correlação entre o MOE estático e o MOE dinâmico. O resultado encontrado é semelhante aos estudos da literatura. Sales et al. (2004) avaliando postes de *Eucalyptus citriodora* encontraram correlações entre o MOE estático e o MOE dinâmico, com coeficiente

de determinação (R^2) na ordem de 0,61. Por outro lado os valores encontrados neste estudo são superiores aos encontrados por Bartholomeu e Gonçalves (2007) comparando vigas de *Eucalyptus citriodora* e *grandis*, nas condições saturadas (umidade acima de 30%) e secas ao ar (umidade de 12%) encontraram para o *E. grandis* valores do coeficiente de correlação de 0,59 e 0,43 (R^2 de 0,35 e 0,18) para as condições, respectivamente.

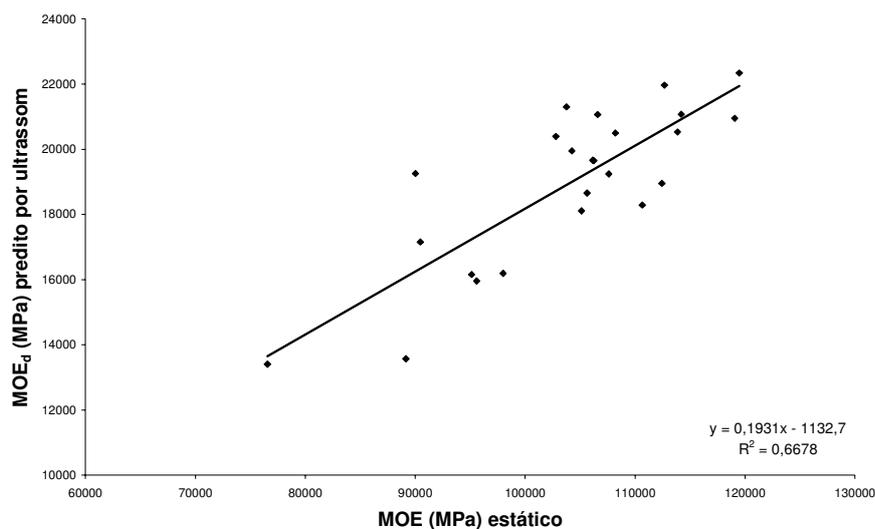


Figura 4.36. Diagrama de dispersão e reta de regressão entre MOE estático e MOE dinâmico para *Eucalyptus*.

A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas pode ser aplicada na predição do MOE das madeiras, uma vez que é mais rápida a sua aquisição. Tanto para o *Pinus*, quanto para o *Eucalyptus* as correlações foram significativas a 1 % e 5 %, respectivamente. Obteve-se melhor resultado na predição do MOE para a madeira de *Eucalyptus*, apresentando coeficiente de determinação (R^2) de 0,64 (Figura 4.37).

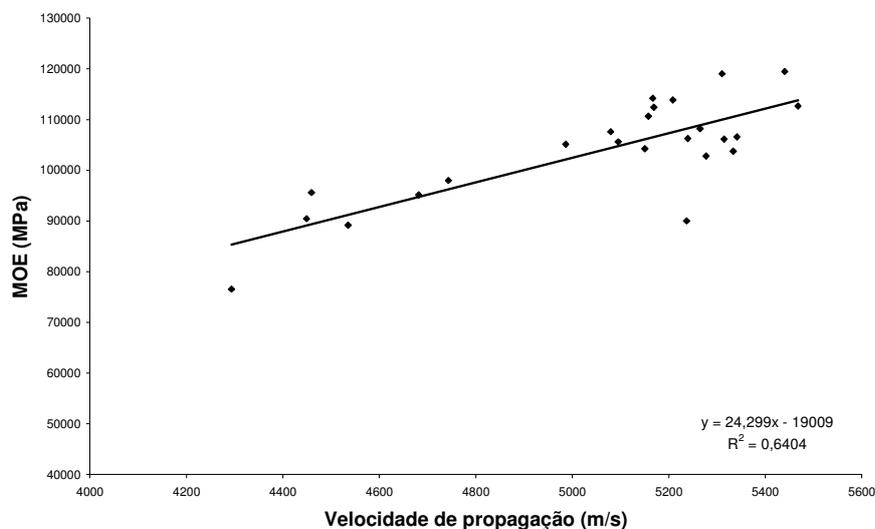


Figura 4.37. Diagrama de dispersão e reta de regressão entre MOE estático e a velocidade de propagação ultrassônica (V_{LL}) para a madeira de *Eucalyptus*.

Para ambas as madeiras foram observadas uma boa correlação entre os valores do MOE determinado pelo equipamento ultrassônico e pelo teste destrutivo, indicando que os valores do módulo de elasticidade medidos pela avaliação ultrassônica são bastante próximos dos valores obtidos pelo ensaio de flexão estática.

Dentre as vantagens da aplicação do ultrassom pode ser destacada a possibilidade de realização da avaliação e classificação das peças de madeira na linha de produção de uma indústria, com a vantagem adicional de se realizar a avaliação não somente de amostras, mas de toda a linha.

4.2.4 – Análise no Infravermelho Próximo

A Figura 4.38 mostra dois espectros típicos de reflexão difusa de *NIRS*, na região com comprimento de onda entre 11000 e 4000 cm^{-1} , obtidos dos materiais de *Pinus* e *Eucalyptus*. Esses espectros apresentam o mesmo aspecto para serragem de madeira reportados na literatura (MAGALHÃES et al., 2005), não havendo a superposição de curvas.

Cada banda de reflectância apresentada nos espectros corresponde a sobreposições de vibrações de grupos funcionais dos compostos químicos presentes na amostra. Como se trata

de uma análise comparativa entre amostras de coníferas e folhosas, formadas por constituintes químicos diferentes, essa diferença vai ser registrada nos espectros de reflectância das amostras como ilustrado na Figura 4.38. Observa-se, também, que nos espectros de infravermelho próximo as amostras refletem a luz com intensidades diferentes. Assim, as amostras de *Pinus* refletem a luz em uma intensidade maior que aqueles de *Eucalyptus*.

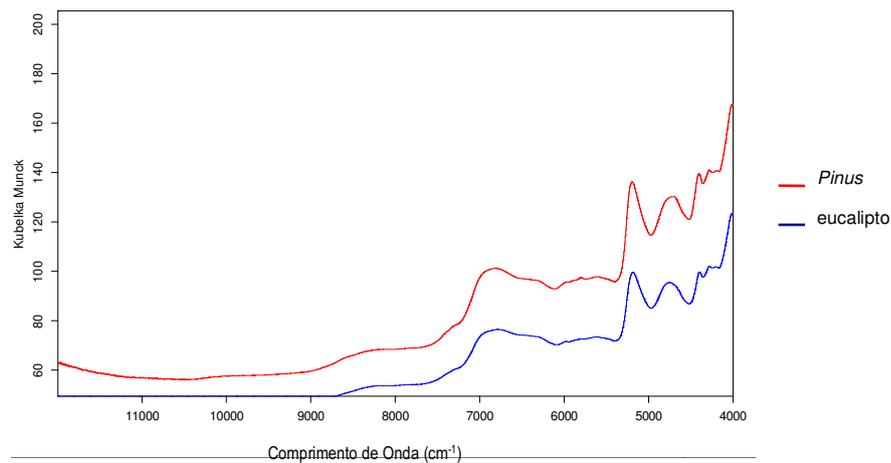


Figura 4.38. Espectros de infravermelho próximo das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*.

Os espectros de infravermelho gerados a partir da análise das faces radial e tangencial da madeira descrevem que estas possuem um comportamento diferenciado para cada face (Figuras 4.39 e 4.40). Nos espectros gerados para a madeira de *Pinus* (Figura 4.39) observa-se que as curvas de reflectância não seguem tendência, pois existe uma maior reflectância na face tangencial, seguida da face radial e transversal da madeira. Já o comportamento observado para a madeira de *Eucalyptus* (Figura 4.40), a maior reflectância foi para a face transversal, seguida da tangencial e da radial.

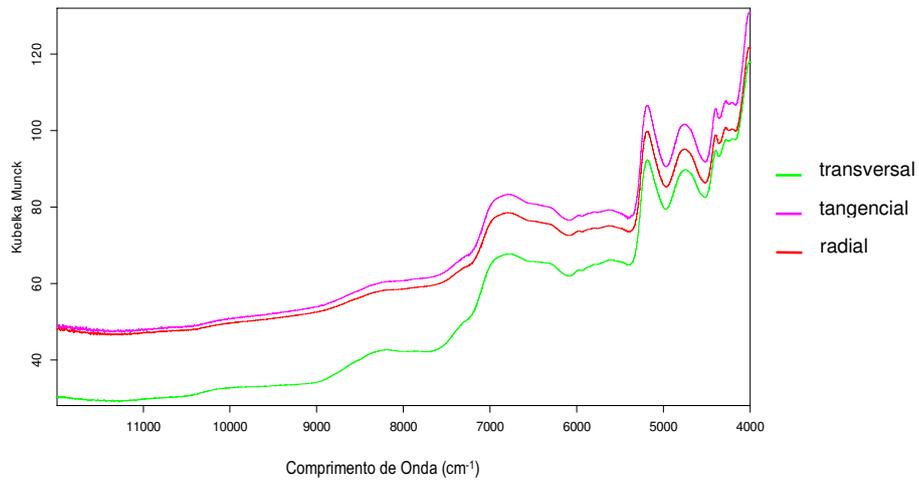


Figura 4.39. Espectros *NIRS* da madeira de *Pinus*.

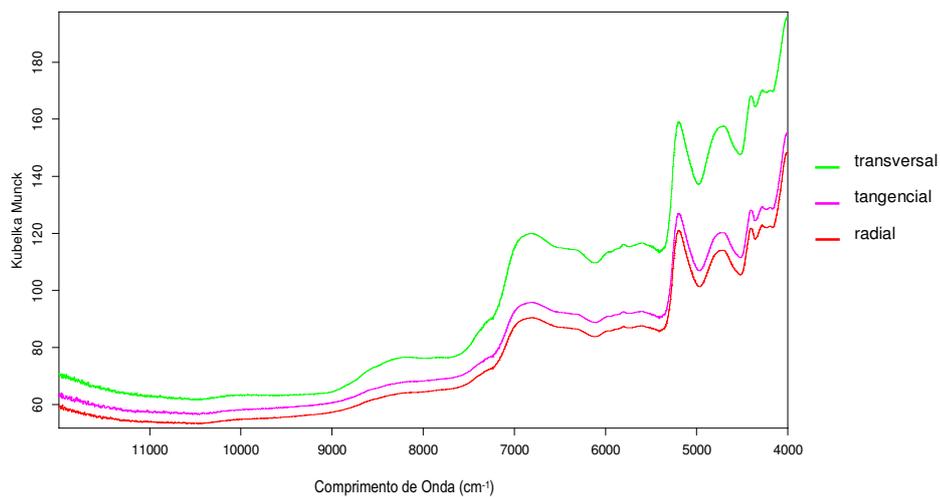


Figura 4.40. Espectros *NIRS* da madeira de *Eucalyptus*.

A técnica de infravermelho próximo é uma tecnologia que pode ser utilizada na separação ou agrupamento de madeiras e identificação das mesmas. Observa-se que ao tentar separar em dois grupos distintos, as madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, não importa a face que for utilizada para a aquisição dos espectros, a separação ocorre de forma bem definida (Figuras 4.41 e 4.42). Esta separação dos tipos de madeira foi realizada para verificar a possibilidade de construir apenas um modelo de calibração. Uma vez que foi observada uma boa separação, devem-se construir modelos distintos para cada tipo de madeira.

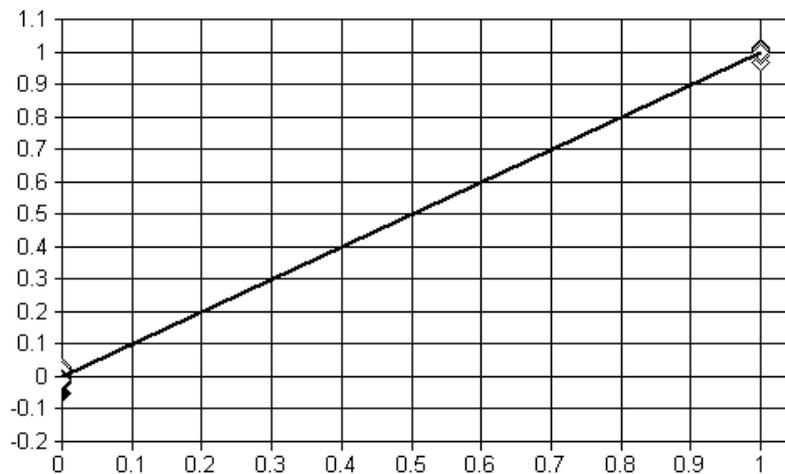


Figura 4.41. Calibração para separação em grupos das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, face radial.

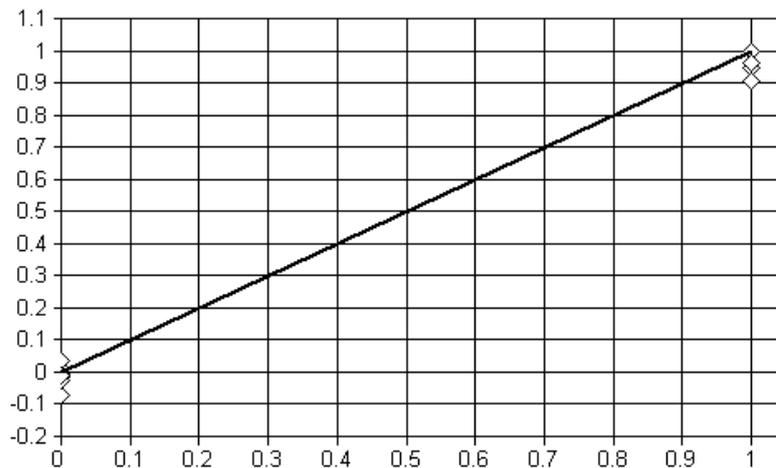


Figura 4.42. Validação cruzada para separação em grupos das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, face radial.

A precisão e exatidão da técnica do infravermelho próximo na medição de determinada característica são tão boas quanto a variação dos dados existentes nas amostras que representam o modelo. Uma distribuição dos dados grande, ampla e uniforme é recomendada durante o estágio de calibração. Isso pode ser comprovado ao separar as madeiras onde a calibração e a validação cruzada forneceram um R^2 de 0,99. Embora o conjunto teste tenha sido feito com um número pequeno de amostras, observou-se a eficiência da técnica para esse tipo de ensaio.

Entretanto, analisando-se as faces radial e tangencial juntas, elas não se separam totalmente, ocorrendo uma sobreposição, enquanto que a face transversal se destaca de ambas (Figuras 4.43 e 4.44). Para a calibração obteve-se um R^2 de 0,91 e na validação cruzada um R^2 de 0,88, com erro de 2%. Este resultado mostra que existem diferenças entre as faces.

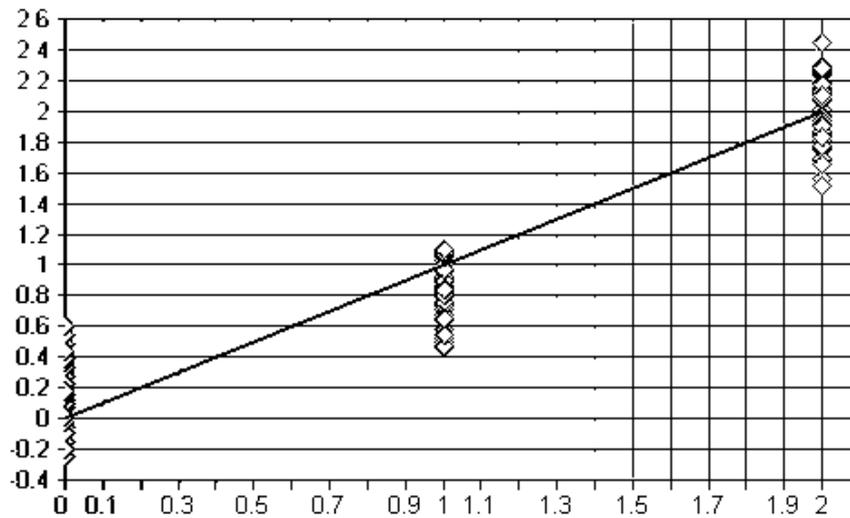


Figura 4.43 Calibração para separação em grupos das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, faces radial, tangencial e transversal.

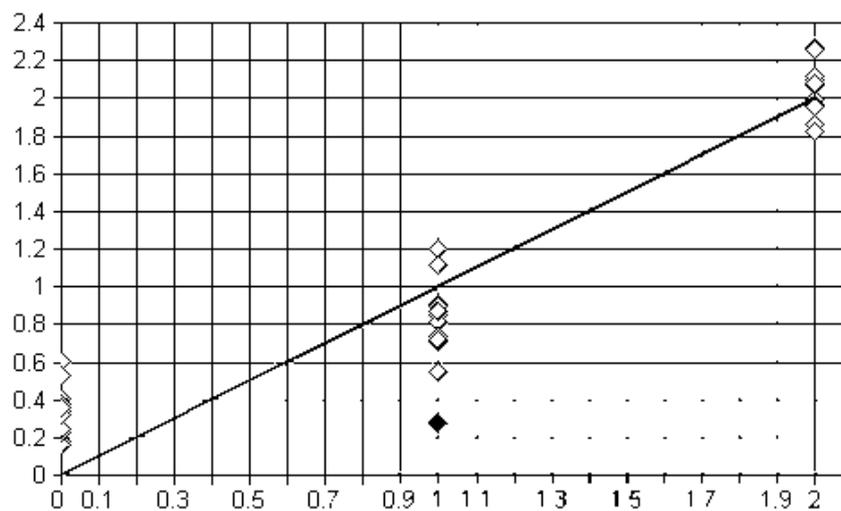


Figura 4.44. Validação cruzada para separação em grupos das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, faces radial, tangencial e transversal.

4.2.3.1 – NIRS x Densidade básica da madeira

Vários estudos (Barcellos, 2007; Caldeira, 2004; Schimleck et al., 2003) demonstram a eficiência do uso do infravermelho próximo para estimar as propriedades da madeira como a densidade, módulos de rigidez e elasticidade, variação dimensional e até mesmo o ângulo da microfibrila. O NIRS é uma técnica analítica que estima os valores dos parâmetros que tradicionalmente levam tempo e são difíceis para mensurar.

Para a madeira de *Eucalyptus*, analisando suas faces, a que melhor prediz os valores de densidade básica é a face tangencial, tanto na validação cruzada, quanto no conjunto teste. Efetuando-se a calibração de um modelo com dois fatores e utilizando a técnica do PLS obteve-se R^2 de 0,64 para a calibração (Figura 4.45) e 0,50 para a validação cruzada. Aplicando o modelo para a validação em amostras externas, a correlação foi inferior, 0,33 (Figura 4.46). Ao aumentar o número de fatores tem-se um aumento no coeficiente de determinação. No entanto, ao fazer isso e comparar os dados medidos em laboratório com os fornecidos pela espectroscopia de infravermelho próximo observa-se que o último superestima uma parte das amostras. Acuna (2006) e Nisgoski (2005) usam de 9 a 12 fatores para demonstrar o melhor resultado de suas pesquisas.

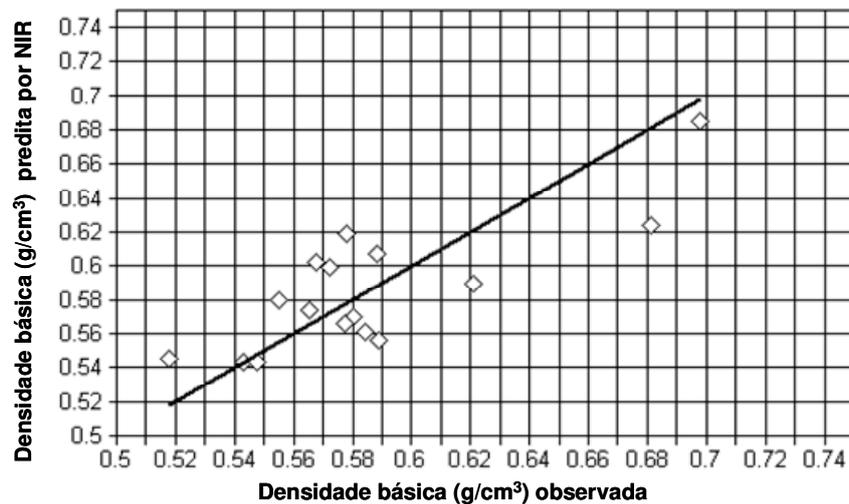


Figura 4.45. Calibração para a densidade básica de *Eucalyptus*, face tangencial.

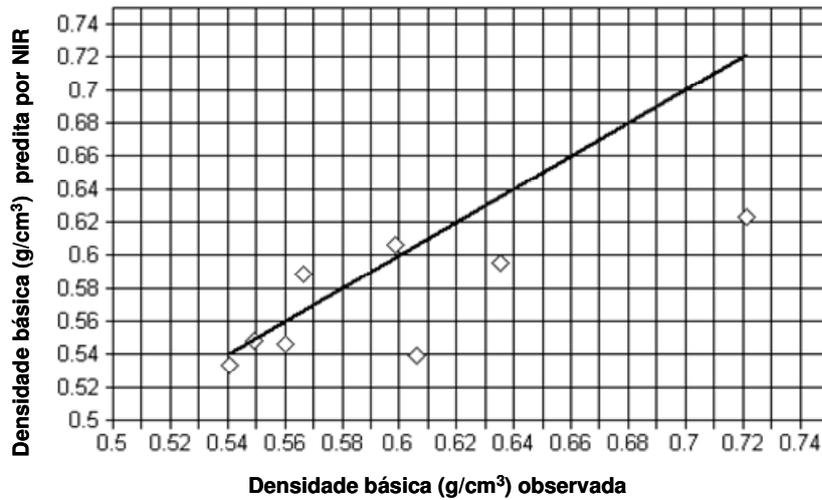


Figura 4.46. Validação cruzada para a densidade básica de *Eucalyptus*, face tangencial.

Analisando a madeira de *Pinus*, assim como a madeira de *Eucalyptus*, a face que melhor prediz os valores de densidade básica é a face tangencial. Efetuando-se a calibração de um modelo, com cinco fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se R^2 de 0,95 para a calibração (Figura 4.47) e 0,75 para a validação cruzada (Figura 4.48). Não se aplicou o modelo para a validação em amostras externas. Em função do pequeno número de amostras de *Pinus*, estas foram usadas na construção do modelo de calibração, necessitando de um conjunto teste para a validação.

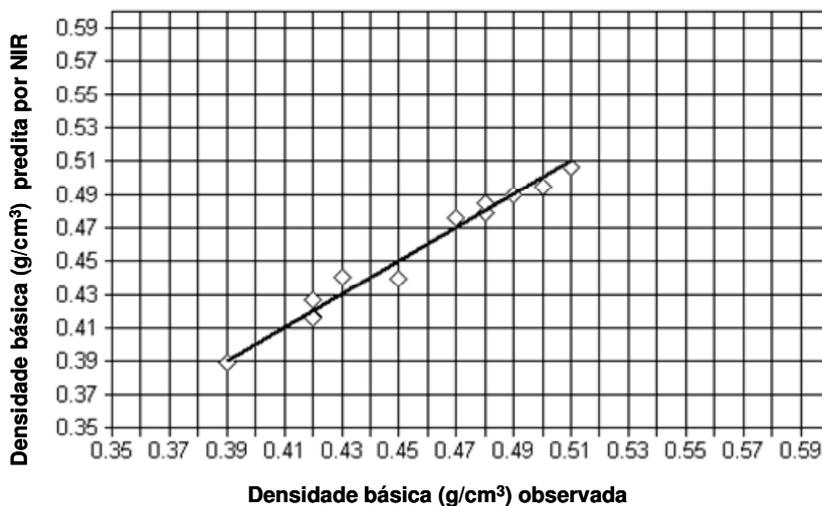


Figura 4.47. Calibração para a densidade básica de *Pinus*, face tangencial.

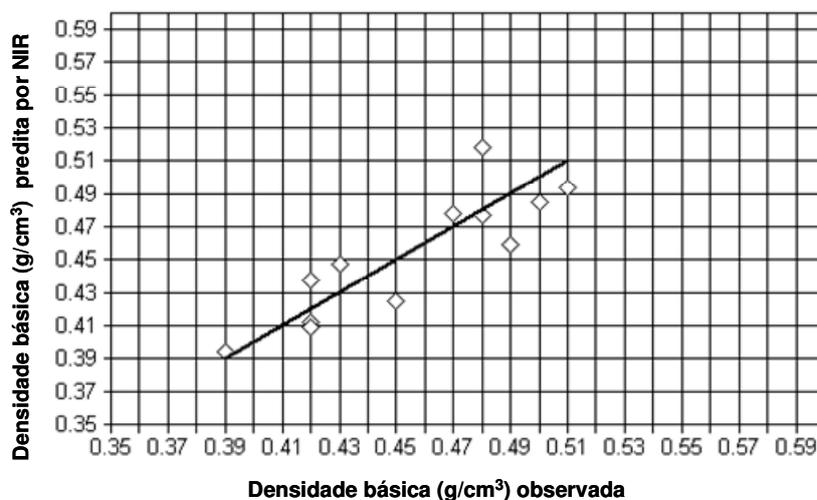


Figura 4.48. Validação cruzada para a densidade básica de *Pinus*, face tangencial.

A calibração e validação referente a densidade básica das madeiras em estudo não se apresentaram muito satisfatórias, o que pode ter sido causado pela mínima diferença existente nos valores de densidade básica observada entre as amostras utilizadas no estudo, podendo ser melhorada com a utilização de um número maior de amostras e que possuam um intervalo de valores de densidade básica mais contrastante. Schimleck et al. (2001b) em trabalho com *Eucalyptus delegatensis* obtiveram um coeficiente de determinação de 0,9 para a densidade, utilizando PLS da segunda derivada dos espectros. Nisgoski (2005) analisando a densidade de *Pinus taeda*, envolvendo a variação base-altura das árvores em duas idades (10 e 17 anos), efetuando a calibração de um modelo, com nove fatores, por meio de PLS obteve uma correlação de 0,87 na calibração e 0,78 na validação. A mesma autora ao analisar apenas a densidade média das árvores com a média dos espectros obteve R^2 de 0,92 e 0,81, para a calibração e validação respectivamente. Magalhães et al. (2006) num estudo para avaliar a técnica de análise por reflectância difusa de infravermelho próximo (NIRS) na determinação da densidade básica em pó da madeira de *Pinus taeda* encontraram R^2 de 0,80 para a calibração e 0,35 para a validação em amostras externas. Embora este resultado fora baixo, eles consideraram que para o caso da densidade básica a correlação ainda é alta e justifica a utilização desta metodologia.

4.2.3.2 – NIRS x Retratibilidade volumétrica da madeira

A variação dimensional da madeira é uma característica que também pode ser predita por NIRS (TAYLOR et al. (2008)). Ao analisar a retratibilidade volumétrica por NIRS, observou-se que para a madeira de *Eucalyptus* o modelo pode ser validado tanto pela face tangencial quanto pela face radial, enquanto que para a madeira de *Pinus* apenas a face tangencial consegue validar o modelo, apresentando para essas faces um coeficiente de determinação negativo.

Para a madeira de *Eucalyptus*, analisando suas faces, observa-se que ao efetuar a calibração de um modelo, com dois fatores, utilizando a técnica do PLS para a face tangencial obteve-se R^2 de 0,83 para a calibração (Figura 4.49) e 0,37 para a validação cruzada. Aplicando o modelo para a validação em amostras externas a correlação foi de 0,74 (Figura 4.50). Da mesma forma foi feito para a face radial, entretanto para a calibração (Figura 4.51) obteve-se R^2 de 0,74 e 0,47 para a validação cruzada. A validação em amostras externas a correlação foi de 0,85 (Figura 4.52). Na face radial obteve-se menor coeficiente de determinação para a calibração do modelo, embora ao validar o modelo com as amostras externas o R^2 foi maior. Os pontos escuros representam amostras anômalas (*outliers*).

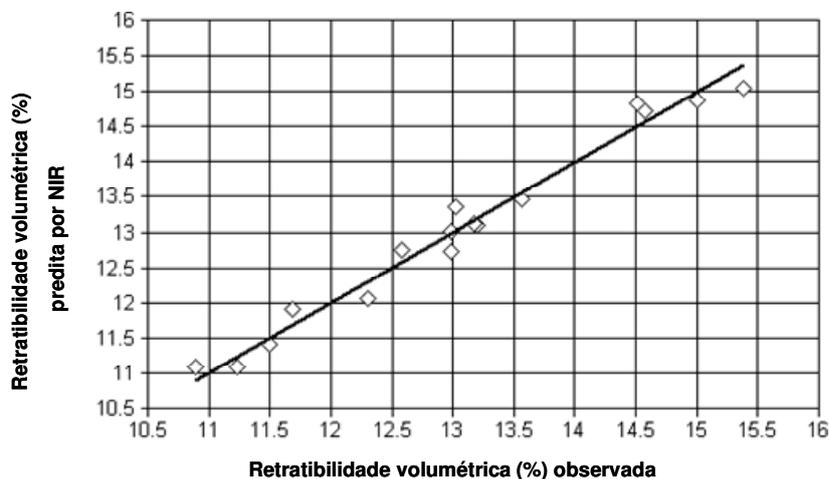


Figura 4.49. Calibração para a retratibilidade volumétrica de *Eucalyptus*, face tangencial.

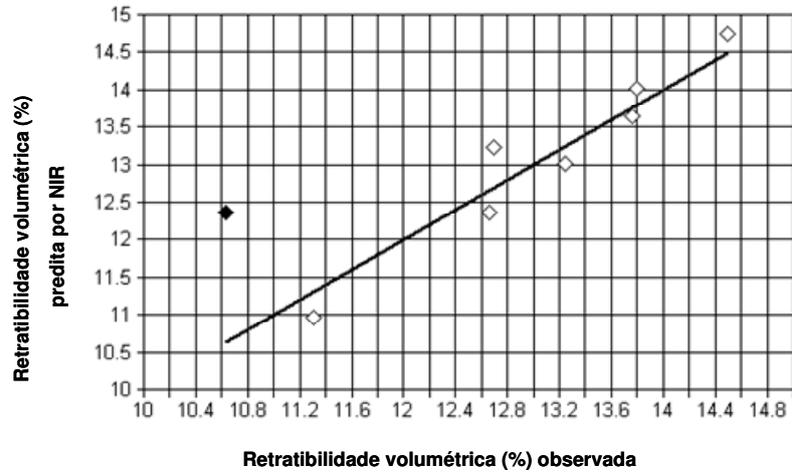


Figura 4.50. Validação cruzada para a retratibilidade volumétrica de *Eucalyptus*, face tangencial.

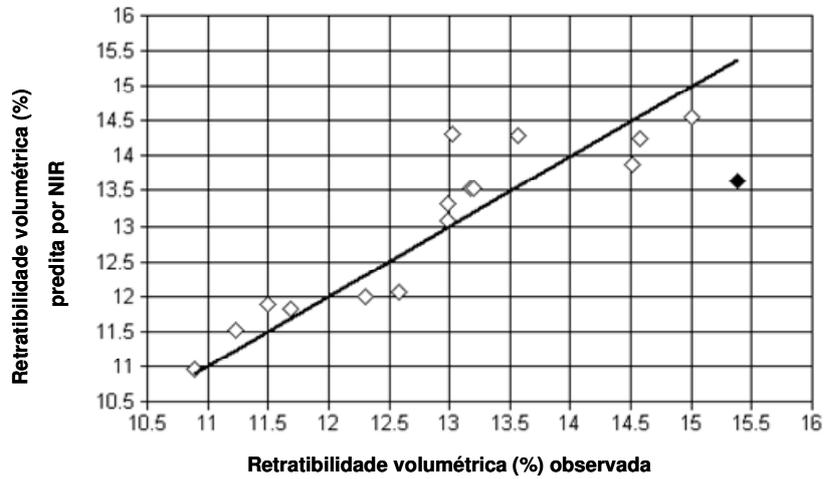


Figura 4.51. Calibração para a retratibilidade volumétrica de *Eucalyptus*, face radial.

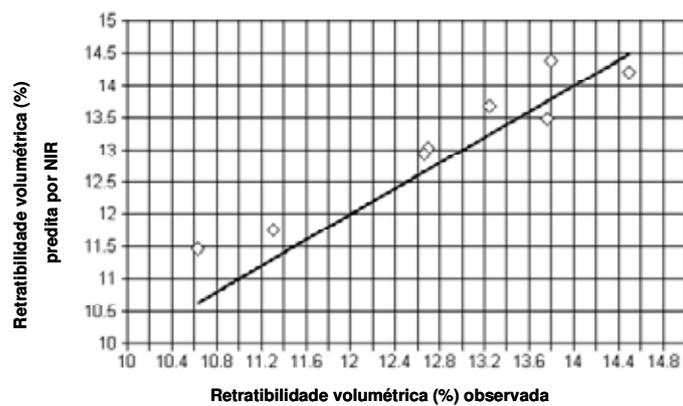


Figura 4.52. Validação cruzada para a retratibilidade volumétrica de *Eucalyptus*, face radial.

A madeira de *Pinus* (face tangencial), na calibração do modelo, obteve R^2 de 0,69 para a calibração (Figura 4.53) e 0,49 para a validação cruzada (Figura 4.54), com dois fatores.

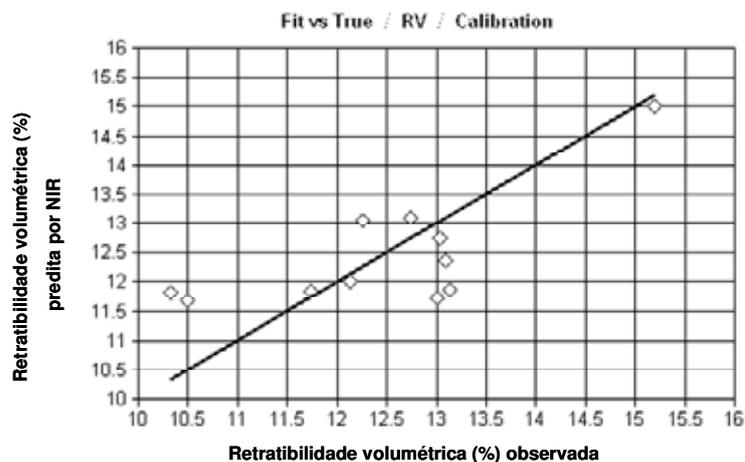


Figura 4.53. Calibração para a retratibilidade volumétrica de *Pinus*, face tangencial.

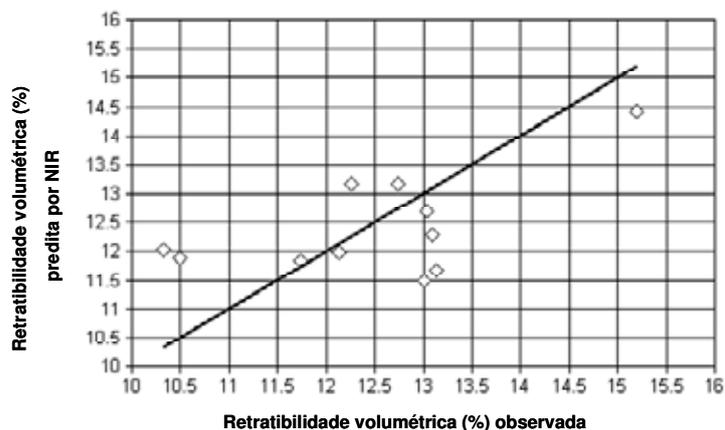


Figura 4.54. Validação cruzada para a retratibilidade volumétrica de *Pinus*, face tangencial.

A retratibilidade volumétrica não alcançou um resultado esperado, como pode ser observado nas figuras 4.49 a 4.54. Optou-se por deixar as figuras com *outliers* (pontos escuros), pois a retirada de cada *outlier* gerava outros. E quando no ajuste do modelo aparece muitos *outliers* significa que não se tem um bom modelo. Este resultado sugere a necessidade de se aumentar o número de amostras para a construção do modelo de forma a permitir uma melhor modelagem da variação existente no sistema.

4.2.3.3 – NIRS x Coeficiente de anisotropia da madeira

A predição do coeficiente de anisotropia das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus* não foram satisfatórias. Conseguiu-se montar um modelo de calibração, mas não se conseguiu uma validação aceitável para esse modelo.

Na calibração do modelo utilizando três fatores, ao analisar a face radial das amostras de *Eucalyptus* observou-se um R^2 de 0,51 para a calibração e de 0,16 para a validação em amostras externas. Já na face tangencial a calibração do modelo com quatro fatores o R^2 foi de 0,79 para a calibração e de 0,24 para a validação.

Para a madeira de *Pinus*, não importa a face todas as calibrações e as validações cruzadas foram boas, sendo que os valores de R^2 variaram entre 0,97 e 0,99 e 0,54 e 0,78, respectivamente. Lembrando que para as amostras de *Pinus*, não tiveram validação em amostras externas.

4.2.3.4 – NIRS x Módulo de elasticidade da madeira

O módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) são dois parâmetros normalmente determinados nos testes de flexão estática e são de grande importância na caracterização tecnológica da madeira; ambos fornecem uma boa aproximação da resistência do material, constituindo-se, na prática, parâmetros de grande aplicação na classificação dos materiais.

A melhor face para a predição do MOE para ambas as madeiras, *Eucalyptus* e *Pinus*, é a tangencial. A face transversal para as duas madeiras não permite a validação dessa propriedade, permite somente a construção do modelo de calibração.

A face tangencial do *Eucalyptus* permitiu uma calibração para o modelo com seis fatores, R^2 de 0,99 para a calibração (Figura 4.55) e de 0,23 para a validação cruzada, e 0,55 para a validação em amostras externas (Figura 4.56).

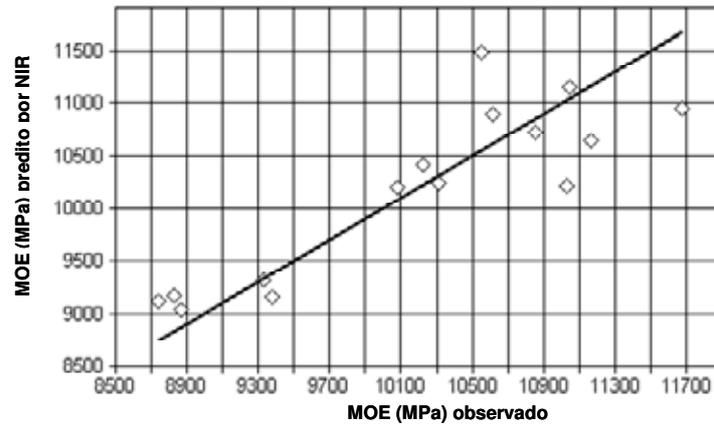


Figura 4.55. Calibração do MOE de *Eucalyptus*, face tangencial.

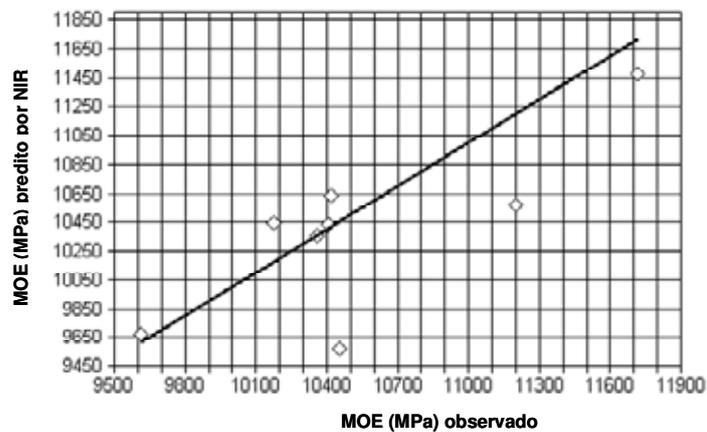


Figura 4.56. Validação em amostras externas do MOE de *Eucalyptus*, face tangencial.

A face tangencial do *Pinus* permitiu uma calibração para o modelo com seis fatores, R^2 de 0,99 para a calibração (Figura 4.57) e de 0,88 para a validação cruzada (Figura 4.58). A face radial permitiu uma calibração para o modelo também com seis fatores, R^2 de 0,99 para a calibração e de 0,70 para a validação cruzada.

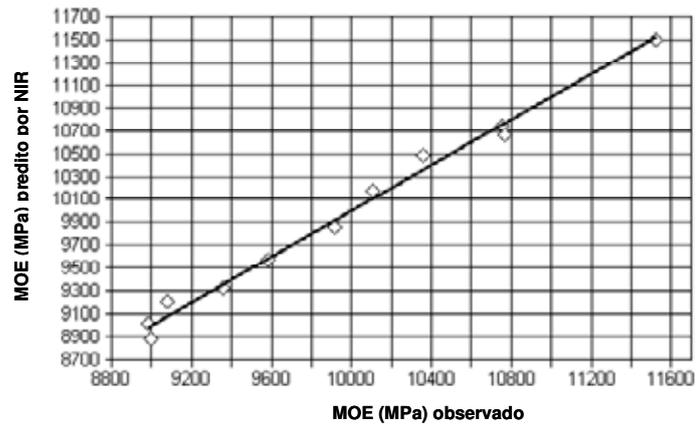


Figura 4.57. Calibração do MOE de *Pinus*, face tangencial.

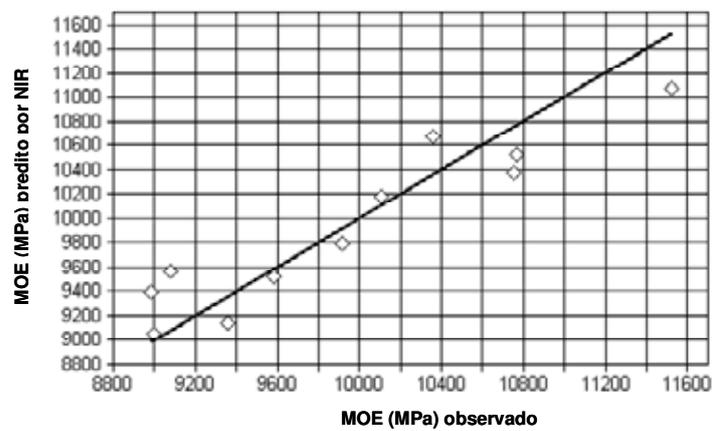


Figura 4.58. Validação do MOE de *Pinus*, face tangencial.

Os resultados encontrados conferem com os encontrados na literatura. Kelley et al. (2004) num estudo com madeira seca de poplar encontrou R^2 de 0,75. Rials et al. (2002) caracterizando painéis de MDF por meio de *NIRS* encontraram um coeficiente de determinação de 0,80 para o módulo de elasticidade.

4.2.3.5 – *NIRS* x Módulo de ruptura da madeira

O módulo de ruptura da madeira é uma importante característica, que determina o seu uso para fins estruturais.

Na predição do MOR por meio do infravermelho próximo pode-se observar que os coeficientes de determinação foram baixos considerando um número pequeno de fatores, e nem sempre foi possível a validação do modelo.

Ao submeter as faces da madeira de *Eucalyptus* aos ensaios de *NIRS*, notou-se que para a face tangencial, que havia sido a melhor face para a predição das outras propriedades, é possível montar um modelo de calibração com R^2 de 0,52 (Figura 4.59), utilizando três fatores, pela técnica do PLS, embora não se possa validar esse modelo, por falta de um maior número de amostras no conjunto teste, com maior amplitude de dados.

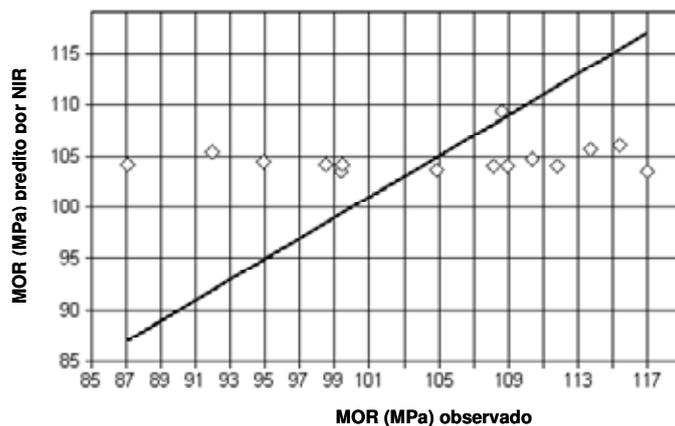


Figura 4.59. Calibração do MOR de *Eucalyptus*, face tangencial.

Já para as faces transversal e radial é possível fazer a validação do modelo com amostras externas. A face transversal do *Eucalyptus* permitiu uma calibração para o modelo com quatro fatores, R^2 de 0,98 para a calibração (Figura 4.60) e 0,39 para a validação em amostras externas (Figura 4.61).

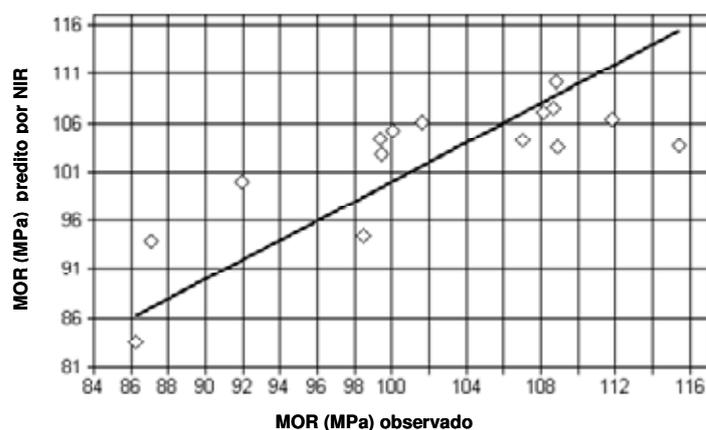


Figura 4.60. Calibração do MOR de *Eucalyptus*, face transversal.

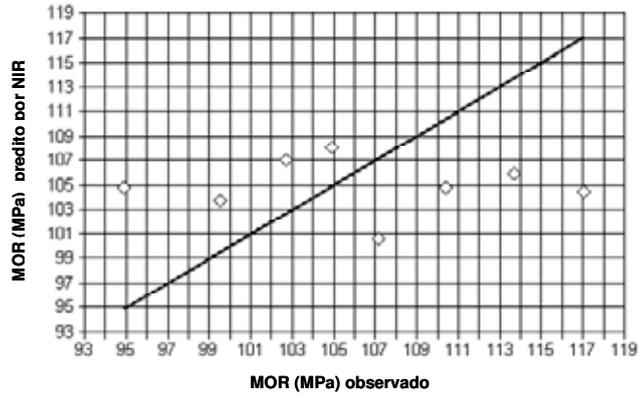


Figura 4.61. Validação em amostras externas do MOR de *Eucalyptus*, face transversal.

A face radial do *Eucalyptus* permitiu uma calibração para o modelo com quatro fatores, R^2 de 0,82 para a calibração (Figura 4.62) e de 0,28 para a validação cruzada, e 0,37 para a validação em amostras externas (Figura 4.63).

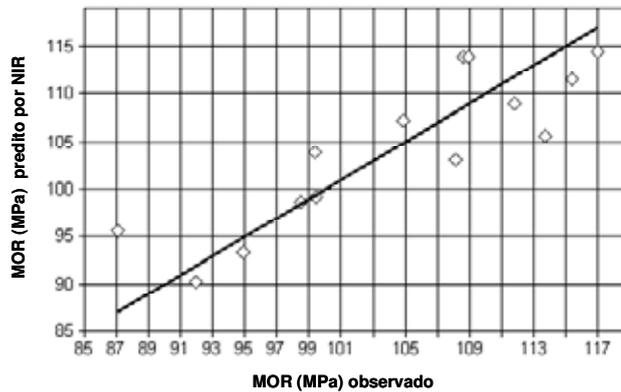


Figura 4.62. Calibração do MOR de *Eucalyptus*, face radial.

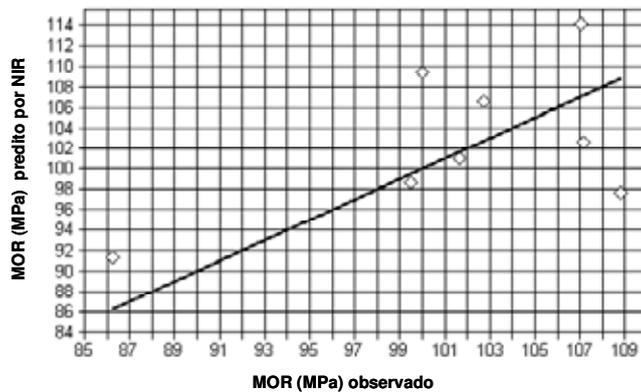


Figura 4.63. Validação em amostras externas do MOR de *Eucalyptus*, face radial.

Analisando os espectros *NIRS* para as faces de *Pinus*, observou-se, que as faces tangencial e radial permitiram a construção de um modelo de calibração com sete fatores com R^2 de 0,99 (Figuras 4.64 e 4.65) para ambas as faces. No entanto este não pode ser validado pela validação cruzada completa. Para a face transversal, a calibração e a validação apresentaram R^2 de 0,99 e 0,50 (Figuras 4.66 e 4.67) respectivamente.

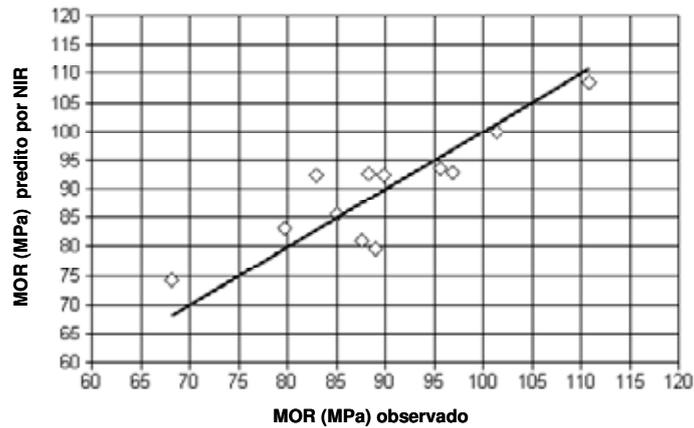


Figura 4.64. Calibração do MOR de *Pinus*, face tangencial.

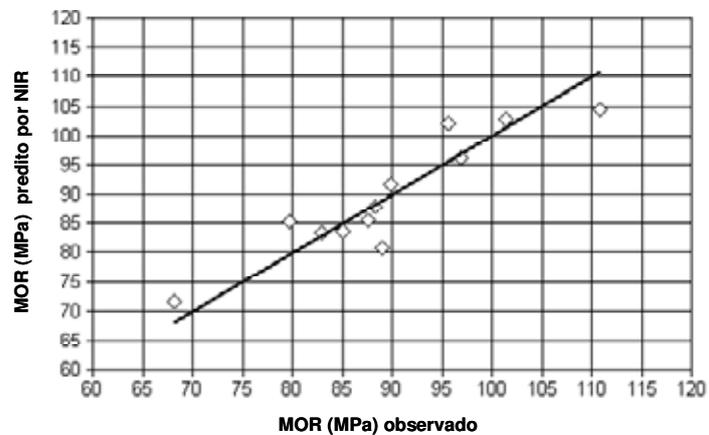


Figura 4.65. Calibração do MOR de *Pinus*, face radial.

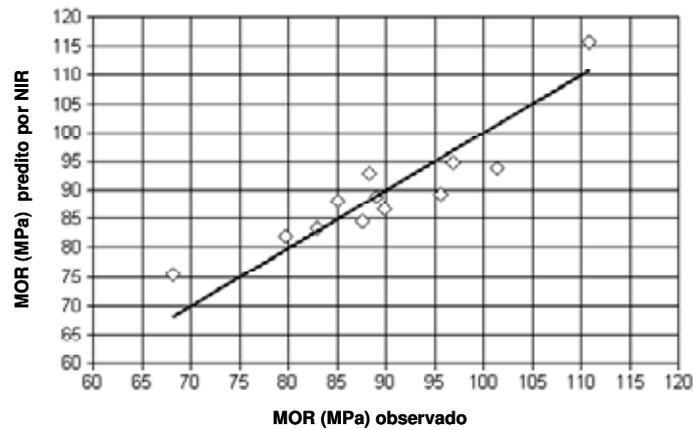


Figura 4.66. Calibração do MOR de *Pinus*, face transversal.

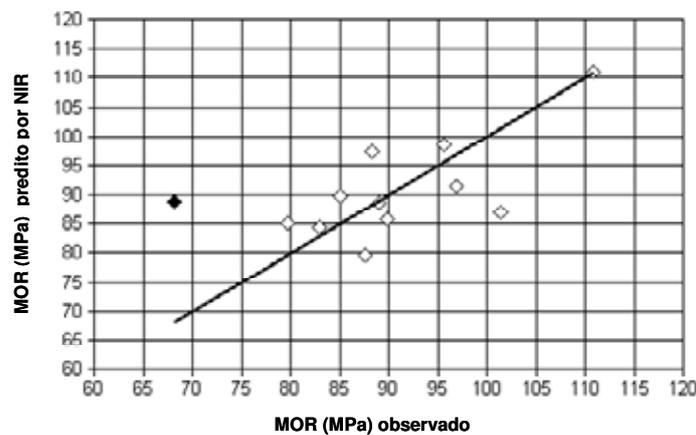


Figura 4.67. Validação cruzada do MOR de *Pinus*, face transversal.

A importância da amostragem é um item a ser observado nesse estudo, por que embora tenha se conseguido bons modelos de calibração para as propriedades da madeira, o mesmo não pode ser dito da validação, até mesmo por que para o *Pinus* não foi feito o conjunto teste para que fosse feita a validação em amostras externas. Segundo Perez et al. (2008) para a obtenção das calibrações *NIRS* são necessárias um número significativo de amostras (usualmente um mínimo de 50 amostras) que são divididas em dois subconjuntos: 75% são usadas para a construção do modelo de calibração e 25% para fins de validação.

Os resultados encontrados para o módulo de ruptura conferem com os reportados na literatura. Kelley et al. (2004) num estudo com madeira de diferentes espécies de *Southern pine* encontrou coeficiente de correlação de 0,86. Rials et al. (2002) caracterizando painéis de MDF por meio de *NIRS* encontrou um coeficiente de determinação de 0,82.

Segundo Schimleck et al. (2005) estimando a densidade, o MOE e o MOR do *Pinus taeda* usando o *NIRS* com amostras de lenho juvenil e tardio obtiveram boas calibrações, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,90 (densidade básica, face radial) , 0,77 (MOE, face radial) e 0,86 (MOR, face transversal).

Observou-se que ao predizer as propriedades de densidade, retratibilidade volumétrica, MOE e MOR para as espécies por meio do *NIRS*, a face que melhor apresentou resultados foi a face tangencial, embora outras literaturas contradigam essa afirmação, considerando a face radial da madeira, a face mais ilustrativa (THUMM and MEDER (2001); GIELINGER et al. (2004); SCHIMLECK et al. (2006); HEIN, 2008).

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- As técnicas de análise de imagem, de colorimetria, de infravermelho próximo e de ondas ultrassônicas para as madeiras podem ser consideradas alternativas para a caracterização das madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*.
- As técnicas utilizadas permitem concluir que as espécies podem ser separadas em grupos de coníferas e folhosas, pelas características distintas, e suas propriedades físicas e mecânicas podem ser preditas com a utilização de qualquer uma dessas técnicas não destrutivas, embora algumas propriedades tenham se destacado mais que outras (densidade, módulo de elasticidade e módulo de ruptura).
- A técnica da análise de imagem em cubos de madeira maciços permite determinar a quantidade de espaços vazios possibilitando a predição de propriedades físicas, sobretudo na estimativa de valores de densidade da madeira, e mecânicas das espécies.
- A colorimetria quantitativa, como técnica para a caracterização e qualificação da madeira, mostrou-se precisa e adequada. Por meio dos dados fornecidos pelo sistema CIELAB 1976, foi possível diferenciar as madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis* e estimar as suas propriedades. Essa predição pode ser feita utilizando a mensuração da cor em qualquer uma de suas faces.
- O método ultra-sonoro é uma importante ferramenta para inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade da madeira. Apesar dos valores absolutos dos módulos de elasticidade obtidos pelos métodos destrutivo e não destrutivo serem diferentes em razão da natureza viscoelástica da madeira, o método ultra-sonoro foi eficiente por avaliar, de forma rápida e eficaz.
- As correlações obtidas entre as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas e os ensaios destrutivos realizados para a obtenção do módulo de elasticidade das espécies de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis* possibilitam inferir sobre o uso da técnica para a caracterização das madeiras. As excelentes correlações com a velocidade são resultados muito significativos para a indústria, uma vez que sua determinação é muito mais simples e direta do que a determinação das constantes dinâmicas. Do ponto de vista industrial esse resultado é bastante significativo, tendo em vista que o procedimento é rápido, simples, não exige mão de obra especializada, tornando a transferência tecnológica aplicável.

- A técnica do infravermelho próximo (NIRS) para a separação em grupos de madeiras com propriedades distintas e a predição dos valores de propriedades físicas e mecânicas das madeiras de coníferas e folhosas mostrou-se muito eficaz do ponto de vista econômico e prático, já que não exige preparo elaborado de amostras e nem utiliza reagentes químicos, além de independer da experiência do operador.
- As propriedades de densidade, retratibilidade volumétrica, MOE e MOR podem ser previstas com a utilização do NIRS para as madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*.
- A face que melhor ilustra a predição das propriedades físicas (densidade e retratibilidade volumétrica) e mecânicas (MOE e MOR) para as madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, por meio do NIRS, é a face tangencial.
- Para todos os ensaios não destrutivos realizados nesse estudo, faz-se necessário uma quantidade significativa de corpos-de-prova, com maior amplitude de dados.
- Recomenda-se o estudo de espécies com características semelhantes, para que possam ser obtidos melhores resultados para a estimativa dos valores das propriedades físicas e mecânicas das madeiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Estudo setorial 2007. Indústria de madeira processada mecanicamente.** Ano base 2006.
- ABRAHÃO, C. P.; VARELLA, C. A. A.; PINTO, F. A. C.; KHOURY JUNIOR, J. K. Quantificação da falha na madeira em juntas coladas utilizando técnicas de visão artificial. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.1, p.71-78, 2003.
- ACOSTA, M. S. Estado de la tecnología en usos no tradicionales de la madera de *Eucalyptus* en el Mercosur y otros países. In: Seminário internacional sobre produtos sólidos de madeira de alta tecnologia – Encontro sobre tecnologias apropriadas de desdobro, secagem e utilização da madeira de *Eucalyptus*. Belo Horizonte. **Anais....** Viçosa: SIF/UFV/DEF, p. 82-105, 1998.
- ACUNA, M. A. Wood properties and use of sensor technology to improve optimal bucking and value recovery of Douglas-fir. **Dissertation (Doctor of Philosophy)** – Oregon State University: 166 p., 2006.
- AMARAL, A.C.; FERREIRA, M.; COUTO, H. T. Z. do. Métodos de avaliação da densidade básica da madeira de populações de pinheiros tropicais. **IPEF**, Piracicaba, (15): 47-67, 1977.
- ARAÚJO, H. J. B. Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do projeto de colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas. **Dissertação (mestrado)**. Piracicaba: 168 p., 2002.
- ASHLEY, P. N.; OZARSKA, B. Furniture from young, plantation grown *Eucalyptus*. In: The future of *Eucalypts* for wood products. Launceston, Tasmania. **Proceedings...** Launceston, IUFRO, p. 150-158, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DO MOBILIÁRIO (Abimóvel), 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI) - **O Setor Florestal e o Segmento de produtos de Madeira Sólida no Brasil**, Brasília, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI) – **Estudo setorial 2007. Indústria de madeira processada mecanicamente. Ano Base 2006**, Brasília, 2007.
- AUTRAN, C. S.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens*Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone

- Tjir 16 Müll Arg.) visando à utilização em interiores. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 445-451, 2006.
- BARCELLOS, D. C. Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. **Tese (Doutorado)** – UFV. Viçosa: 162 p., 2007.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.19-28, jan./abr. 2005.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Variabilidade radial da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, Piracicaba (18): 81-102, 1979.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; MIGLIORINI, A. J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. **Silvicultura**, v.8, n.28, p.726-31, 1983.
- BARTHOLOMEU, A. Classificação de peças estruturais de madeira através do ultrassom. **Tese (Doutorado)** – UNICAMP. Campinas, 73 p., 2001.
- BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R. Predição do Módulo de Elasticidade à Flexão em vigas de Eucalipto saturadas e secas ao ar utilizando a velocidade longitudinal de ultrassom. **Anais... IV Conferencia Panamericana de END**. Buenos Aires. 2007.
- BEALL, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. **Wood Science and Technology**. v. 36, p.197-212, 2002.
- BENDTSEN, B. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Production Journal**, v. 28, n. 10, p. 61-72, 1978.
- BERGER, R. Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização. **Dissertação (Mestrado)**. Santa Maria – RS: Universidade Federal de Santa Maria, 126p., 2000.
- BERNDT, H.; SCHNIEWIND, A. P.; JOHNSON, G. C. Ultrasonic energy propagation through wood: where, when, how much. In: Symposium NDT of wood, 12, 2000, Sopron. **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, p. 57-65, 2000.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar: Krieger, 712 p., 1993.
- BOLAND, D. J.; BROOKER, M. I. H.; CHIPPENDALE, G. M.; HALL, N.; HYLAND, B. P. M.; JOHNSON, R. D.; KLENING, D. A.; TURNER, J. D. **Forest trees of Australia**. Melbourne: Thomas Nelson, 687p., 1984.

- BRAGA, J. W. B. Avaliação de figuras de mérito em calibração multivariada, aplicada na determinação de carbamazepina por espectroscopia no infravermelho próximo e médio. **Dissertação (Mestrado)**. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo: 187 p., 2004
- BROWN, A. E. **Rationale and summary of methods of determining ultrasonic properties of materials at Lawrence National Laboratory**. UCRL – ID – 119958. New York: CRC Press, 1997.
- BUCUR, V.; BÖHNKE, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. **Ultrasonics**, v. 32, n. 5, p. 385-390, 1994.
- BUCUR, V. **Acoustics of wood**. New York: CRC Press, 1995.
- BUCUR, V. **Nondestructive characterization and imaging of wood**. New York: Springer-Verlag, p. 324, 2003.
- BURGER, L. M., RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Ed. Nobel, 154p. 1991.
- BUSNARDO, C. A., GONZAGA, J. V., FOELKEL, C. E. B. Em busca da qualidade ideal da madeira do *Eucalyptus* para produção de celulose: III. A importância da altura de amostragem para avaliação da densidade básica média da árvore. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3, 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, v.1, p. 55-72, 1983.
- CAI, Z; HUNT, M.O; ROSS, R.J; SOLTIS, L.A. Static and vibration module of elasticity of salvaged and new joists. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 2, p. 35-40, 2000.
- CALDEIRA, B. R. P. P. caracterização das propriedades físico-mecânicas e determinação da percentagem de cerne da madeira de *Tectona grandis*. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. **Dissertação (Graduação)**. 84 p., 2004.
- CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. Campina Grande – PB: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.335-338, 2003.
- CALORI, V. J.; DIAS, G. L. Emprego do ultrassom na determinação expedita da densidade básica da madeira. In: Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. **Anais...** São Carlos: UFSC, p. 149-155, 2000.
- CAMARGO, F. R.; LIMA, M. M.; BARRICHELO, L. E. G. Caracterização da madeira de procedências de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *P. caribaea* var. *caribaea*, *P. kesiya* e *P. oocarpa* para a produção de celulose kraft. **Silvicultura**, São Paulo, v. 41, p. 195-197, 1986.

- CAMARGOS, J. A. A. Colorimetria aplicada na elaboração de uma tabela de cores para madeiras tropicais. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- CANGIANI, S. M. P. Qualidade da madeira de *Pinus* na Duraflora. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 9, n. 27, p. 30 – 34, 1993.
- CARREIRA, M. R.; CHEUNG, A. B.; F. OLIVEIRA, G. R.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR, C.; SALES, A.; CANDIAN, M. Classificação de peças estruturais de *Pinus sp* por ultrassom. **Anais...** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil: p. 8316-8328, 2006.
- CARVALHO, A. M. Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha. **Dissertação**. USP, São Paulo, Piracicaba: 138 p., 2000.
- CIENFUEGOS, F. Análise Instrumental: Conceitos e Avanços da Análise no Infravermelho, **Revista Química e Derivados**, São Paulo, ano 38, n. 413, p.40-46, 2003.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **Maderas: método de determinación del peso específico aparente**. 461. COPANT, 5p. 1972.
- COSTA, E. M. A madeira de *Eucalyptus* na indústria moveleira. In: Seminário sobre processamento e utilização da madeira de reflorestamento, 1996. Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABPM/ SBS, p. 75- 89, 1996.
- CZARNESKI, C. M.; FREITAS, G. F.; CORADIN, V. T. R; CAMARGOS, J. A. A. Estudo anatômico comparativo de quatro espécies da família Lauraceae ocorrentes na Amazônia. **Brasil Florestal**, n. 70, p. 48-60, 2001.
- DANIELS, R. F.; CLARK III, A. Quantifying and predicting wood quality of Loblolly and Slash Pine under intensive forest management. – USDA Forest Service and SilviScan, CSIRO. **Final Technical Report**.16 p., 2006.
- ELLIS, T. J.; ROSEN, D.; CAVAGH, J. B. Automated measurement of peripheral nerve fibres in transverse section. **Journal of Biomedical Engineering**, Oxford, v. 2, n. 4, p. 272-280, Oct. 1980.
- 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.
- FAHRENFORT, J. Attenuated Total Reflection - A new principle for the production of useful infra-red reflection spectra of organic compounds, **Spectrochim. Acta**, 17, p. 698-709, 1961.

- FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook : wood as an engineering material. Madison : U. S. Department of Agriculture. **Forest Service**. Forest Products Laboratory, 463 p. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113), 1999.
- GARCIA, S. L. R. Importância de características de crescimento, de qualidade da madeira e da polpa na diversidade genética de clones de *Eucalyptus*. Viçosa: UFV, 1998.103 p. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- GELADI, P.; KOWALSKI, B. R. Partial Least-Squares Regression: A Tutorial. **Anal. Chim. Acta.**, v.185, p.1-17, 1986.
- GIELINGER, N.; SCHWANNINGER, M. ; WIMMER, R. Characteristics and classification of Fourier-transform near infrared spectra of the heartwood of different larch species (*Larix* sp.). **Journal Near Infrared Spectroscopy**, v. 12, p. 113-119, 2004.
- GONÇALEZ, J.C. Caracterization technologique de quatre especes peu connues de la foret amazonienne: anatomie, chimie, couleur, propriétés physiques et mécaniques. **Thèse de Doctorat**. Ministere de l'Agriculture et de la Peche, Nancy, 446 p., 1993.
- GONÇALEZ, J. C.; KELLER, R.; PERRÉ, P. Mesure de la densité des bois par analyse d'image. **Bois et forêts des tropiques**, n. 250, 1996.
- GONÇALEZ, J. C.; JANIN, G; SANTORO, A. C. S.; COSTA, A. F. da.; VALE, A. T. do. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, n. 72, p. 47-58, 2001a.
- GONÇALEZ, J. C.; VALE, A. T. do.; COSTA, A. F. da. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultrassônicas (ultrassom). **Revista Cerne**, v. 7, n. 2, p. 81-92, 2001b.
- GONÇALEZ, J. C.; BRENDA, L. de C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F. da; VALE, A. T. do. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Revista Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.
- GONÇALEZ, J. C.; ZERBINI, N. J.; GOUVEIA, F. N.; MACEDO, D. G.; D'AMBROS, J. Características tecnológicas da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* visando sua utilização em ambientes interiores. In: **Anais... XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira**. Londrina, 2008.
- GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. O uso do ultrassom na determinação de constante elástica da madeira. In: Congresso nacional de ensaios não destrutivos. **Anais...** São Paulo: ABENDE, p.135-40, 2000.

- GONÇALVES, R.; SILVA, S. A. M. **Correlações entre módulo de elasticidade e constante dinâmica em chapas MDF**. Rio de Janeiro: III Pan-American Conference for Nondestructive Testing. PANNDT 2003.
- GÖRLACHER, R. Ein neues meßverfahren zur bestimmung des elastizitätsmodulus von Holzs. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 42, n. 6, p. 219-222, 1984.
- GORNIAK, E.; MATOS, J. L. M. Métodos não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira. In: Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. **Anais...** São Carlos: UFSC, p. 121-131, 2000.
- HART, J.R.; NORRIS, K.H. & GOLUMBIC, C. Determination of the moisture content of seeds by near – Infrared Spectrophotometry of their methanol extracts , **Cereal Chem.**, 39, 94 – 99, 1962.
- HEIN, P. R. G. Avaliação das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo. **Dissertação (Mestrado)**. Universidade Federal de Lavras – MG. 88 p., 2008.
- HILLIS, W. E. Wood quality and growing to meet market requirements. In: The Future of Eucalypts for Wood Products. Launceston, Tasmania. **Proceedings...** Launceston: IUFRO, p. 256 – 264, 2000.
- HOFFMEYER, P.; PEDERSEN, J.G. Evaluation of density and strength of Norway spruce by near infrared reflectance spectroscopy. **Holz als Roh- und Werkst.** 53:165-170. 1995.
- HUBER, F. An enzymatic method to facilitate quantitative studies of wood with an image analyser. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 1, n. 4, p.185-187, 1980.
- IAWA COMMITTEE. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, n. 10(3). 1989.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL – IBDF. **Madeiras da Amazônia: características e utilização. Floresta Nacional do Tapajós**. Brasília: IBDF, v.1, 113 p., 1981.
- INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS – IPEF. Queda na extração de madeira nativa. **Correio de notícias**. 2008. Disponível em : <http://www.ipef.br/servicos/clipping/view.asp?Id=2310>.
- JANIN, G. La couleur du bois, um facteur clé de qualité. **Mesures**, n.17, p.61-65, 1986.
- JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In: Seminário internacional de utilização da madeira de *Eucalyptus* para serraria. **Anais...** São Paulo: IPEF/IPT/IUFRO/LCF/ESALQ/USP, p. 109-118, 1995.

- JAYNE, B. A. Vibrational properties of wood as indices of wood quality. **Forest Products Journal**, Madison, v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.
- KELLEY, S. S.; RIALS, T. G.; GROOM L. H.; SO, C. L. **Use of Near Infrared Spectroscopy for characterization of wood**. 5ª. Conferência internacional de biomassa das Américas. In: <http://www.brdisolutions.com/pdfs/bcota/abstracts/29/z362.pdf>. 2004.
- KOLLMAN, F. F. P.; CÔTÊ JUNIOR, W. A. Principles of wood science and technology. Berlin: **Springer**, v. 2, 674 p., 1968.
- KLOCK, U. Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore. **Tese (Doutorado)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 291 p., 2000.
- KLOOT, N. H. Methods of assessing properties. In: Ifru World Congress, 16, 1976, Normay. **Proceedings...** Normay, p.76-99, 1976.
- LEE, J.; ROSEN, D. The application of automated microscopy to wood anatomy. In: **WOOD ANATOMY MEETING OF IAWA AND IUFRO**, 1983, Hamburg, Germany.
- LIMA, I. L. Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Tese (Doutorado)** – Universidade de São Paulo, USP, Piracicaba: 164 p., 2005.
- LISBOA, C. D. J. Estudo das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Tese (Doutorado)** – Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 275p., 1993.
- MADY, F. T. M. **Conhecendo a madeira: informações sobre 90 espécies comerciais**. Manaus: Sebrae, 2000.
- MAGALHÃES, W. L. E.; PEREIRA, J. C. D.; MUÑIZ, G. I. B.; KLOCK, U. SILVA, J. R. M. Determinação de propriedades químicas e anatômicas de madeira com o uso da reflexão difusa de infravermelho próximo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 50, p. 25-36, 2005.
- MAGALHÃES, W. L. E; ZANGISKI, F.; KLEIN C. H.; HIGA, A. R. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (*NIRS*) para predição não-destrutiva de densidade básica da madeira de *Pinus taeda*. Colombo-PR: Embrapa Florestas, **Comunicado técnico n. 159**, 4 p., 2006.
- MALAN, F. S. Properties, processing and utilization of eucalypts. The south African experience. In: Seminário internacional sobre produtos sólidos de madeira de alta tecnologia – encontro sobre tecnologias apropriadas de desdobro, secagem e utilização da madeira de *Eucalyptus*, 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa: SIF/UFV/DEF, p.134-143, 1998.

- MANGIERI, H. R., DIMITRI, M. J. *Los Eucalyptus en la silvicultura*. Buenos Aires: Acme, 226 p., 1971.
- MARTENS, H. E.; TORMOD, N. **Multivariate calibration**. New York: J. Wiley, 1989.
- MATOS, J. L. M. Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L. Curitiba. **Tese (Doutorado)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná: 117 p., 1997.
- MATOS, J. L. M.; KEINERT JR., S.; ROSA, G. M. Uso de métodos de emissão acústica para determinação não destrutiva de propriedades de painéis compensados de madeira. In: Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. **Anais...** São Carlos: UFSC, p. 131-137, 2000.
- MELO, J. E. de; CORADIN, V. T. R. e MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. In: **Anais...** 6. Congresso Florestal Brasileiro, vol.3, p.695-699, 1990.
- MENDES, L. M.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. de; KEINERT JR, S.; SALDANHA, L. K. *Pinus* spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 135-145, 2002.
- METRIGUARD INC. Metriguard Model 239 A Stress Wave Timer. **Manual care and instructions, theory and data reduction**. Pullman, 1997.
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do Eucalyptus no Brasil**. São Paulo: SBS, 112 p., 2000.
- MORALES, E. A. M. Técnicas de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis OSB. **Tese (Doutorado)** – Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, p. 94, 2006.
- MORI, C. L. S. de O.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; TRUGILHO, P. F.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 137-146, 2005.
- MOURA, M. C. Variações em características de crescimento e da madeira em clones de *Eucalyptus*. Lavras. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Lavras: 63 p., 2000.
- MUÑIZ, G. I. B. Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *P. elliottii* Engelm e *P. taeda* L. **Tese (Doutorado)** – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba: 235 p., 1993.

- MURPHY, J.F. Commentary on factors affecting transverse vibration using an idealized theoretical equation. Madison: **Forest Products Laboratory** Research Note, 4 p., 2000.
- NISGOSKI, S. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. **Tese (Doutorado)**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná: 2005.
- NISHIYAMA, P.; ALVAREZ, M.; VIEIRA, L. G. E.; **Arq. Biol. Tecnol.** 34, 361, 1991.
- NOGUEIRA, M. V. P., VALE, A. T. Densidade básica de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* proveniente de cerrado: relação com a densidade básica média e variação radial e axial. Viçosa – MG: **Revista Árvore**, v.21, n.4, p.547-554, 1997.
- OLIVEIRA, J. T. S. Caracterização da madeira de *Eucalyptus* para a construção civil. **Tese (Doutorado)**. São Paulo, v. 2, 429p., 1997.
- OLIVEIRA, F. G. R. Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultrassom. 2001. 104f. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade de São Paulo, 2001.
- OLIVEIRA, J. T. da S.; SILVA, J. de C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. Viçosa – MG: **Revista Árvore**, v.27, n.3, p.381-385, 2003.
- OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. **Revista Minerva**, v. 2, n. 1, p. 25-31, 2005.
- OLIVEIRA, F. G. R. de.; MILLER, K. P.; CANDIAN, M.; SALES, A. Influência da seção transversal na velocidade ultrassônica na madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 197-203, abr./jun. 2005
- OLIVEIRA, F. C. C. Modelos de calibração multivariada associados à espectroscopia vibracional para análise de misturas diesel-óleos vegetais. **Dissertação (Mestrado)**. Universidade de Brasília: 120 p., 2006.
- OLIVEIRA, F. G. R. de.; MILLER, K. P.; CANDIAN, M.; SALES, A. Efeito do comprimento do corpo de prova na velocidade ultrassônica em madeiras. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.1, p.141-145, 2006.
- PANSHIN, A. J., ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4.Ed. New York: McGraw-Hill, 705 p., 1970.
- PANTOJA, P. A. Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização da carga de petróleo para o processo de destilação atmosférica. **Dissertação (Mestrado)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: 88 p., 2006.

- PASQUINI, C., “Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals Practical Aspects and Analytical Applications”, **J. Braz. Chem. Soc.**, vol 14, N°2, pp. 198 – 219, 2003.
- PASTORE, T. C. M.; OLIVEIRA, C. C. K de; RUBIM, J. C.; SANTOS, K. O. Efeito do intemperismo artificial em quatro madeiras tropicais monitorado por espectroscopia de infravermelho (DRIFT). **Revista Química Nova**, v. 31, n. 8, p. 2071-2075, 2008.
- PEDROSA, I. **Da cor à cor inexistente**. Rio de Janeiro: Leo Christiano Editorial Ltda. 5. Ed., (co-editado pela Ed. UnB), 224 p., 1989.
- PELLERIN, R. F. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 15, n. 3, p. 93-101, 1965.
- PELIZAN, T. R. Estudo de propriedades mecânicas de peças roliças de Eucalipto citriodora utilizando a técnica de ultrassom. **Dissertação (Mestrado)**. São Carlos: Universidade de São Paulo – USP, 2004.
- PEREZ, D. da S.; GUILLEMAIN, A.; PETIT-CONIL, M. Alguns fatores que influenciam a estimação de propriedades da madeira e da polpa por espectroscopia no infravermelho próximo. **O papel**. Artigo técnico: p. 60-76, 2008
- PONCE, R. H. Madeira serrada de *Eucalyptus*: desafios e perspectivas. In: Seminário internacional de utilização da madeira de *Eucalyptus* para serraria. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT/IUFRO/LCF-ESALQ-USP, p.50-58, 1995.
- PUCCHINI, C. T.; GONÇALVES, R.; BALLARIN, A. W. Dispersão de ondas de ultrassom em peças de madeira serrada de Pinho do Paraná em função do comprimento. In: Congresso nacional de ensaios não destrutivos, **Anais...** São Paulo: 2001. CD-ROM.
- RAZERA NETO, A. Espécies de madeiras tropicais brasileiras na produção de móveis com madeira sólida na região de Curitiba e municípios vizinhos. **Dissertação (Mestrado)**. Curitiba: Universidade do Paraná, 2005.
- REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; GUERRINI, I. A. Estudo das interrelações entre massa específica, retratibilidade e umidade da madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* aos 8 anos de idade. **IPEF**, n. 48/49, p. 133-141, 1995.
- RIALS, T. G.; KELLEY, S. S.; SO, C. Use of advanced spectroscopic techniques for predicting the mechanical properties of wood composites. **Wood Fiber Science**. 34(3): p. 398–407, 2002.
- RIBEIRO, P. G.; Gonzalez, J. C.; Camargos, J. A. A de; Martins, I. S. Avaliação colorimétrica das faces radial e tangencial da madeira de tauari (*Allantoma lineata*) visando sua utilização em interiores. In: Fortaleza – CE: **Anais...** 57ª Reunião Anual da SBPC, 2005.

- RICHTER, H. G., BURGER, L. M. **Anatomia da madeira**. 2. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná – UFPR, 78p., 1978.
- RIZZI, M. Indústria de Base Florestal no Brasil. Guia Técnico, Anuário do Setor Industrial Madeireiro – **Revista Referência**, 2008.
- RIZZINI, C. T. **Árvores e madeiras úteis do Brasil**: manual de dendrologia brasileira. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. **Forest Products Journal**, v. 38, n. 5, p. 39 – 45, 1985.
- ROSS, R.J.; RITTER, M.A.; SCHAD, K.C. Determining in-place modulus of elasticity of stress-laminated timber decks using NDE. In: National Conference on Wood Transportation Structures, 1994, Madison: **Forest Products Laboratory**, p.277-281, 1994.
- ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 14-19, jan. 1998.
- ROSS, R. J. Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools – A guide for use and interpretation. **Forest Products Laboratory**, Madison, General Technical report, n. 114, abr. 1999.
- ROSS, R.J.; WANG, X.; MATTSON, J.A.; EICKSON, J.R.; FORSMAN, J.W.; GESKE, E.A.; WEHR, M.A. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs In: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 12, 2000. **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, p.155-163, 2000.
- ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; WANG, X.; WHITE, R.H.; PELLERIN, R. F. Wood and timber condition assessment Manual. **Forest Products Laboratory**, Madison, 2004.
- ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; Structural condition assessment of in-service wood. **Forest Products Journal**: 56; 6; ABI/INFORM Global, p. 4, 2006.
- SALES, A.; PELIZAN, T. R.; OLIVEIRA, F. G. R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F. F.; SALGON, J. F.; MILLER, K. P. (2004). Avaliação de propriedades mecânicas de peças roliças de *Eucalyptus* por meio de ultrassom. In: IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, **Anais...** Cuiabá, 2004. IBRAMEM/LaMEM.
- SANDOZ, J. L. Grading of construction timber by ultrasound. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 23, p. 95-108, 1989.

- SANTINI, E. J.; HASLEIN, C. R.; GATTO, D. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas de três coníferas de floresta plantada. **Ciência Florestal**, Santa Maria RS, v. 10, n.1, p 85-93. 2000.
- SCANAVACA JÚNIOR, L. Caracterização silvicultural, botânica e tecnológica do *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e de seu potencial para utilização em serraria. **Dissertação (Mestrado)**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 108 p., 2001.
- SCHAD, K. C.; SCHMOLDT, D. L.; ROSS, R. J. Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs. US Forest Laboratory. **Research Paper FPL** n. 546, Madison, fev. 1996.
- SHIMIZU, J. Y. **Cultivo do Pinus**. Embrapa Florestas. Sistemas de Produção. 2005.
- SCHIMLECK, L.; EVANS, R.; ILLIC, J. Application of near infrared spectroscopy to a diverse range of species demonstrating wide density and stiffness variation. **IAWA Journal**, v. 22 (4), p. 415– 429, 2001a.
- SCHIMLECK, L. R.; EVANS, R.; ILLIC, J. Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**. Canadá, v.31, n.10, p.1671-1675, 2001b.
- SCHIMLECK, L.; EVANS, R.; ILLIC, J. Application of near infrared spectroscopy to the extracted wood of a diverse range of species. **IAWA Journal**, v. 24 (4), p. 429– 438, 2003.
- SCHIMLECK, L. R.; JONES, P. D.; CLARK III, A.; DANIELS, R. F.; PETER, G. F. Near infrared spectroscopy for the nondestructive estimation of clear wood properties of *Pinus taeda* L. from the southern United States. **Forest Products Journal**, v. 55, n. 12, p. 21-28, 2005.
- SCHIMLECK, L. R.; STÜRZENBECHER, R.; MORA, C; JONES, P. D.; DANIEL, R. F. Comparison of *Pinus taeda* L. wood property calibrations based on NIR spectra from the radial-longitudinal and radial-transverse faces of wooden strips. **Holzforschung**, 59, p. 214-218, 2006.
- SELLA, R. L. Técnicas silviculturais e de exploração para a obtenção de madeira de qualidade para a laminação e serraria In: Seminário madeira de *Eucalyptus*: tendências e usos. Curitiba, 2001. **Anais...** Curitiba: FUPEF, p.19-24, 2001.
- SHIMOYAMA, V. R. S. Variações da densidade básica e características anatômicas da madeira em *Eucalyptus* spp. Piracicaba. **Dissertação (Mestrado)** – Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 93 p., 1990.

- SHIMOYAMA, V. R. S. Estimativas de propriedades da madeira de *Pinus taeda* através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado. **Tese de (Doutorado)** – Universidade Federal do Paraná, 2005.
- SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. Berlim: Springer-Verlag, 223 p., 1984.
- SILVA, J. C. Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira. **Tese (Doutorado)**. Curitiba: UFPR, 181 p., 2002.
- SILVA, D. A. da.; TRUGILHO, P. F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Revista Cerne**, v. 9, n. 1, p. 056-065, 2003.
- SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; SANTOS, A. F.; CASTRO, V. R. Variação da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, em função da idade e da posição radial no tronco. **Revista Árvore**, v. 30, p. 803-810, 2006.
- SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M.; PATORE JUNIOR, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. Santa Maria: **Ciência Florestal**, v. 17, n. 1, p. 17-23, 2007.
- SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator s manual**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 274 p., 1991.
- SKOOG, D.A.; HOLLER, J.F.; NIEMAN, T.A. **Princípios de Análise Instrumental**, Quinta Edição, Porto Alegre: Bookman, 2002.
- SO, C; LEBOW, S. T.; GROOM, L. H.; RIALS, T. G. The application of near infrared (*NIRS*) spectroscopy to inorganic preservative-treated wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 36, n. 4, p. 329-336, 2004.
- STAR COLOR. **CIE Lab Color System**. Disponível em <<http://www.starcolor.co.th/1qc.html>> Acesso em: 3 dez. 2004.
- STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; SANTINI, E. J. O.; DOMINGUES, J. M. X. O.; GATTO, D. A. O.; MELO, R. R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v.3, n.2, p.145-150, 2008.
- TAYLOR, A. M.; BAEK, S. H.; JEONG, M. K.; NIX, G. Wood shrinkage prediction using NIR spectroscopy. **Wood Fiber Science**, v. 40, p. 301-307, 2008.
- TAIZ L.; ZEIGER E. **Plant Physiology**. Sinauer Assoc. Inc. Publ., Sunderland, Mass: p.690, 3rd. edition, 2002.

- TEIXEIRA, M. L.; SOUZA, A. N. de; SOUZA, M. A. M. de; FILHO, H. F. Avaliação da qualidade da madeira de seringueira *Hevea* sp. para produção de celulose e carvão vegetal. In: Congresso Florestal Brasileiro. **Anais...** Curitiba, p. 588-590, 1993.
- THOMPSON, R. M. Resistência de painéis de partículas orientadas (OSB) tratados termicamente frente ao intemperismo. **Dissertação (Graduação)**. Universidade de Brasília – UnB. 2006.
- THYGESEN, L. G. Determination of dry matter content and basic density of Norway spruce by near infrared reflectance and transmission spectroscopy. **J. Near Infrared Spectroscopy**. 2: 127–135. 1994.
- TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de 8 espécies de *Eucalyptus* cultivadas no Brasil. **Revista IPEF**. V. 29, n. 1., p. 25-36. 1983a.
- TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **Revista IPEF**. V. 29, n. 1, p. 37-45. 1983b.
- VAN DER SLOOTEN. H. J. **Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para manufatura de instrumentos musicais**. Manaus: INPA/CPPF, 123p., 1993.
- VETTER, R. E.; BOTOSSO, P. C. Análise de imagem empregada na pesquisa de produtos florestais. I. Determinação de poros da madeira. Manaus: CPPF/INPA, 10 p., 1985. (**Série Técnica n. 10**).
- WAUGH, G. Sawing of young, fast growing eucalypts. In: Seminário internacional sobre produtos sólidos de madeira de alta tecnologia. Encontro sobre tecnologias apropriadas de desdobro, secagem e utilização da madeira de *Eucalyptus*. **Anais...** Viçosa: SIF/UFV/DEF, p. 69-81, 1998.
- WATSON, C. A. Near Infrared reflectance spectrophotometric analysis of agricultural products, **Anal. Chem.**, 49, 835A – 840A, 1977.
- ZERBINI, N. J. Madeiras tropicais com potencial comercial da região do rio Xingu (Pará, Brasil): propriedades tecnológicas e cadeia produtiva. **Tese (Doutorado)**. Brasília: UnB, 196 p., 2008.